

## CARACTERISATION DE COUCHES MINCES ZnO ELABOREES PAR PULVERISATION CATHODIQUE

T. Mahdaoui<sup>1,2</sup>, M. Hamidouche<sup>1,3</sup>, N. Bouaouadja<sup>3</sup> and J. M. Albella<sup>4</sup>

(1) *Unité de Recherche des Matériaux Emergents, Université Sétif 1 - Algérie.*

(2) *Département des Enseignements de Base en Technologie, Faculté de Technologie, Université Sétif 1 - Algérie.*

(3) *Institut d'Optique de Mécanique de Précision, Université Sétif 1 - Algérie.*

(4) *Surface Physics and Engineering Department, Institute of Materials Science (CSIC), Cantoblanco University, Madrid, Spain.*

E-mail: mah\_touf@yahoo.fr

### Résumé

L'oxyde de zinc (ZnO), déposé sous forme de couches minces, est couramment employé en raison de son important potentiel d'utilisation dans les dispositifs électroniques (transducteurs, capteur à gaz) ainsi que dans la conversion photovoltaïque (cellules solaires). Le présent travail consiste à étudier l'influence des paramètres de déposition des couches de ZnO sur des substrats en verre. Des couches minces d'oxyde de zinc sont déposées sur des substrats en verre sodocalcique par la méthode de pulvérisation cathodique (Sputtering) dans différentes conditions expérimentales (pression de pulvérisation, pourcentage de gaz réactif (O<sub>2</sub>) dans le mélange gazeux (Ar/O<sub>2</sub>) et puissance injectée dans la décharge. Nous avons réalisé plusieurs séries d'échantillons revêtus que nous avons caractérisés sur le plan structural, optique, mécanique et électrique. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la pression de pulvérisation entraîne l'augmentation de la transmission optique des échantillons revêtus. L'augmentation de la pression provoque une diminution de la dureté Vickers des couches d'une manière quasi-linéaire. La ténacité diminue aussi lorsque la pression de pulvérisation augmente, elle est de l'ordre de l'unité (1 MPa√m) pour une pression de 20 mTorr et une faible charge (0,2 N). D'autre part, elle diminue sensiblement d'une façon presque linéaire en fonction de la charge appliquée.

L'analyse des spectres DRX montre que les couches réalisées présentent une orientation préférentielle (002) pour des faibles pressions (inférieurs à 100 mTorr). La résistivité électrique diminue avec la pression pour devenir sensiblement constante à des pressions élevées. Nous avons observé aussi qu'elle augmente d'une façon importante en fonction du pourcentage d'oxygène et la puissance de décharge.

**Mots clés** : couche mince, ZnO, pulvérisation cathodique

### 1- INTRODUCTION

L'oxyde de Zinc (ZnO) est un matériau binaire. Il possède de bonnes potentialités dans le développement des technologies émergentes dans les dispositifs optoélectroniques, principalement en raison de ses bonnes propriétés physiques très appréciées, comme sa transparence élevée dans la région spectrale visible et proche infrarouge [1], [2], sa haute énergie de la bande interdite ( $\approx 3,26$  eV) [3] et sa grande énergie de liaison (O-Zn) à la température ambiante [4] et [5]. Vu leurs bonnes propriétés optiques et électriques, les couches minces de ZnO trouvent plusieurs applications telles que : les cellules solaires [6], [7], les capteurs à gaz [8], les capteurs piézoélectriques [9], [10], les écrans plats [11], les dispositifs acoustiques

[12], les guides d'ondes optiques [13], les diodes Laser [14] ...etc. Les films minces de ZnO peuvent être élaborés par plusieurs techniques, nous pouvons citer : spray pyrolyse (SP) [15], sol-gel [16], évaporation thermique [17], ablation laser (PLD) [18] et pulvérisation cathodique [19-21].

Dans le présent travail et dans le but d'obtenir des couches conductrices transparentes, des films minces de ZnO ont été déposés par la technique de pulvérisation réactive sur des substrats en verre silico-sodocalcique. Nous avons focalisé nos efforts sur l'optimisation de l'influence des paramètres de dépôt sur la qualité des couches déposées, comme la pression de pulvérisation, le rapport de gaz réactif (O<sub>2</sub>) dans le mélange de gaz (O<sub>2</sub>/Ar) et la puissance injectée dans la décharge.

## 2- ETUDE EXPERIMENTALE

### 2.1- Matériaux utilisés

Dans notre étude, les échantillons utilisés sont en verre plat de type silico-sodo-calci que d'épaisseur 3 mm et fabriqué par l'entreprise Algérienne AfricaVer (Taher, Jijel). Le choix du verre comme substrat a été adopté en raison de la valeur du coefficient de dilatation thermique qui est assez proche de celle l'oxyde ZnO ( $\lambda_{\text{verre}} = 8,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{ZnO}} = 7,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Ces valeurs proches permettent de minimiser les contraintes à l'interface couche/substrat, pour leur transparence qui s'adapte bien pour la caractérisation optique des films dans le visible et aussi pour des raisons économiques.

La composition chimique du verre utilisé, exprimée en pourcentage de masse, est mentionnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Composition chimique moyenne du verre utilisé (% en masse).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
72,123	14,759	6,743	4,212	1,217	0,324
TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
0,276	0,267	0,039	0,023	0,009	0,008

La qualité du dépôt et par suite celle de l'échantillon dépend de la propreté et de l'état du substrat. Son nettoyage est donc une étape très importante : il faut éliminer toute trace de graisse et de poussière et vérifier, à l'œil, que la surface du substrat ne comporte, ni rayures ni défauts de surface. Ces conditions sont indispensables à la bonne adhérence du dépôt sur le substrat, et à son uniformité.

La procédure de nettoyage de la surface des substrats a été faite comme suit : Les substrats sont coupés à partir de la même plaque de verre à l'aide d'un stylo à pointe en diamant. Ils sont dégraissés dans un bain d'alcool méthylique pendant 5 minutes, rincés à l'eau distillée et puis rincés à l'acétone pendant 15 minutes. Enfin avant d'être séchés dans une étuve à 70°C, les échantillons sont rincés une dernière fois dans un bain d'eau aux ultrasons pour éliminer les traces de graisses et d'impuretés collées à la surface du substrat.

### 2.2- Procédure expérimentale

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de physique des surfaces et interfaces (Institut des Sciences des Matériaux, Université Cantoblanco de Madrid). Les couches minces d'oxyde de zinc ont été

déposées sur des substrats en verre sodocalcique par pulvérisation cathodique en continu à partir d'une cible commerciale ("Goodfellow") de ZnO de diamètre de 100 mm, d'épaisseur de 6 mm et de pureté de l'ordre de 99,999%. La distance cible-substrat est maintenue fixe à 4 cm. Nous avons réalisé les dépôts en jouant sur la variation des paramètres suivants :

\* Mélanges gazeux Argon/oxygène : 20, 40, 60, 80 et 100% d'oxygène,

\* Pression totale variable : 20, 60, 100 et 140 mTorr

\* Puissances qui varient de 25 à 200 Watts avec un pas de 25 Watts.

Les couches minces ont été déposées à une température constante (350°C).

Le processus du dépôt peut se définir comme étant l'éjection d'atomes superficiels d'une cible (ZnO) par des atomes ionisés d'un gaz neutre (Argon) et le transfert de ces atomes éjectés sur un substrat. Ce processus se déroule dans une enceinte à vide où sont placés la cible et le substrat. Les ions de bombardement sont créés à partir de l'Argon (gaz neutre). L'épaisseur déposée est mesurée par une balance à quartz placée dans l'enceinte.

Dans notre travail, les couches minces d'oxyde de zinc non dopé ont été élaborées sur des substrats de verre sous un plasma d'Argon. Avant chaque dépôt, une durée de 45 minutes de pré-pulvérisation a été effectuée pour éliminer les impuretés dans le vide. Pendant la durée de dépôt, la vitesse d'injection du plasma créé a été fixée à 40 cm<sup>3</sup>/min et la couleur du plasma était d'une couleur violette. Nous avons obtenu des couches de ZnO transparentes et d'épaisseurs grossièrement proportionnelles à la durée de déposition. Les épaisseurs sont comprises entre 380 nm (1 h 30 minutes de dépôt) et 850 nm environ (environ 4 h de dépôt). Les dépôts ont été systématiquement effectués à une température de 350°C. Enfin, nous avons procédé à une caractérisation structurale et physique des différents échantillons revêtus.

### 2.3- Moyens utilisés

Pour assurer une bonne déposition des couches, nous avons réalisés des essais préliminaires pour optimiser l'influence des différents paramètres. Par la suite, nous avons observé la structure des couches déposées par microscopie électronique à balayage (MEB). Pour mesurer la transmission optique

dans le spectre UV/VIS/IR, on a utilisé un spectrophotomètre de type Shimadzu, modèle SolidSpec-3700D UV à double faisceau.

Pour effectuer les essais de dureté instrumentée, nous avons utilisé un Microduremètre de type Zwick/Roell ZHV $\mu$ . Le profilomètre DEKTAK Veeco-150 nous a permis de mesurer le profil de rugosité des couches par contact à l'aide d'un stylus de balayage sur la surface de l'échantillon. La détermination des spectres de diffraction des rayons X (DRX) nous a servie pour obtenir des informations sur les directions de croissance cristallographiques des couches déposées. Ces caractérisations sont importantes car elles conditionnent directement les caractéristiques électriques et mécaniques.

La microdureté Vickers  $H_V$  et la ténacité  $K_C$  sont calculées en utilisant les formules suivantes :

$$H_V = 0,1854 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

et

$$K_C = 0,016(P \cdot c^{-1,5})(E/H_V)^{0,5} \quad (2)$$

Où :  $P$  est la charge appliquée (N),  
 $d$  : la diagonale de l'empreinte générée par l'indenteur Vickers (mm),  
 $c$  la longueur de la fissure radiale (mm) et  
 $E$  le module d'élasticité du composé couche/substrat ( $N/mm^2$ ).

#### 2.4- Mesures de résistivité

Pour les mesures de résistivité, des contacts métalliques sont déposés soit en ligne soit en carré sur la surface de l'échantillon. Quatre pointes sont ensuite posées sur ces contacts (méthode quatre points). On applique un courant  $I$  entre les deux points les plus éloignés l'un de l'autre et on mesure la tension  $\Delta V$  entre les deux autres points. On utilise cette configuration afin que la mesure ne soit pas gênée par la résistance de contact.

La résistivité est donnée par :

$$\rho = R_{\blacksquare} \cdot d \quad (3)$$

Avec :

$$R_{\blacksquare} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

$R_{\blacksquare}$  : est la résistance carrée.

$d$  : est l'épaisseur de la couche.

### 3- RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1- Transmission optique

La figure 1 représente la variation de la transmission optique des verres revêtus par des couches d'oxyde de zinc (ZnO) en fonction des longueurs d'ondes (UV/VIS/IR) pour différentes pression de pulvérisation.

Nous notons que l'augmentation de la pression de pulvérisation entraîne une amélioration de la transmission optique des échantillons revêtus. Ceci laisse penser que le rendement de la pulvérisation dépend de la pression de dépôt, donc la variation de la pression. Cette dernière influe sur l'épaisseur de la couche et par conséquent sur la transmission optique. Plus la pression est faible, plus la transmission chute.

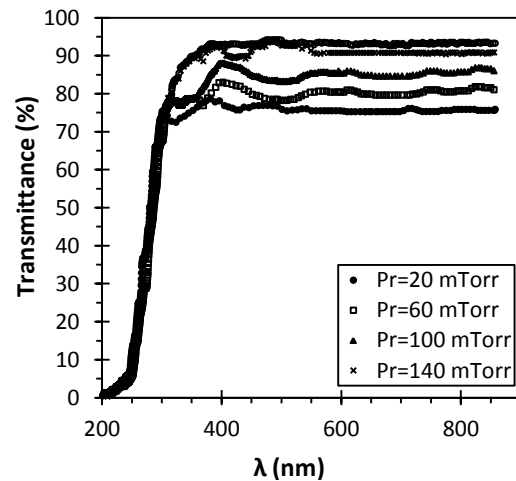


Fig. 1 : Variation de la transmission optique en fonction de la longueur d'onde pour des verres revêtus par des couches d'oxyde de Zinc (ZnO) déposées sous différentes pression de pulvérisation.

Le facteur de transmission varie dans la gamme (73-92)% dans l'intervalle (400-850 nm), qui correspond au domaine visible. Le film déposé à 20 mTorr présente un facteur de transmission relativement inférieure. Les fluctuations de transmission remarquées dans la gamme (300-800 nm) sont dues à des franges d'interférence, ce phénomène peut être observé dans le cas des films homogènes [13].

#### 3.2- Dureté Vickers

La figure 2 représente la variation de la dureté Vickers en fonction de la charge appliquée pour différentes pressions de pulvérisation. On peut voir que la dureté des échantillons revêtus par des couches d'oxyde

de zinc est supérieure à celle du verre brut qui reste presque constante (4,50 GPa). Lorsque la pression augmente, la dureté des échantillons revêtus diminue d'une manière quasi-linéaire. Par exemple pour une pression de 20 mTorr et une puissance de 50 Watt, la dureté atteint une valeur maximale (de l'ordre de 6,5 GPa) pour des faibles charges (0,2 N). L'allure générale de la dureté des couches tend à rejoindre celle du substrat, ce qui est confirmé par de nombreux travaux.

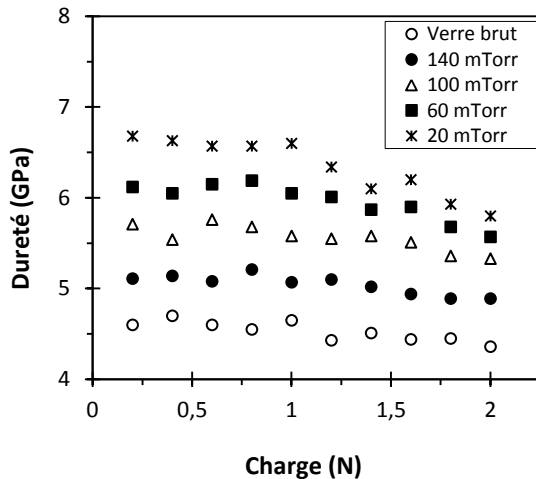


Fig. 2 : Variation de la dureté Vickers en fonction de la charge appliquée pour différentes pressions de pulvérisation ( $P_u = 50$  Watt et  $Ar/O_2 = 50/50$ ).

### 3.3- Ténacité

La figure 3 représente l'évolution de la ténacité en fonction de la charge appliquée pour différentes pressions de pulvérisation ( $P_u = 50$  Watt et un rapport  $Ar/O_2 = 50/50$ ).

Nous constatons que la résistance à la fissuration (ténacité) diminue lorsque la pression de pulvérisation augmente. Elle est de l'ordre de l'unité (1  $MPa\sqrt{m}$ ) pour une pression de 20 mTorr et une faible charge de 0,2 N. D'autre part, elle diminue sensiblement d'une façon quasi-linéaire en fonction de la charge appliquée. Par exemple pour une charge de 0,2 N, la ténacité diminue de 0,98  $MPa\sqrt{m}$  pour un verre revêtu, à 0,87  $MPa\sqrt{m}$  pour une charge de 2,0 N (pour les mêmes conditions de revêtement). D'une manière générale, les différentes courbes de ténacité ont tendance à rejoindre celle du verre substrat lorsque la charge appliquée augmente, ce qui est logique.

Pour les paramètres suivants ( $Pr = 20$  mTorr,  $P_u = 100$  watt et un rapport gazeux  $Ar/O_2 = 50/50$ ) et pour des charges relativement grandes (de 1,5 à 2 N), le facteur  $K_{Ic}$  a une

tendance à diminuer vers une valeur constante de l'ordre de 0,87  $MPa\sqrt{m}$ . Cette dernière est à peu près égale à celle du substrat.

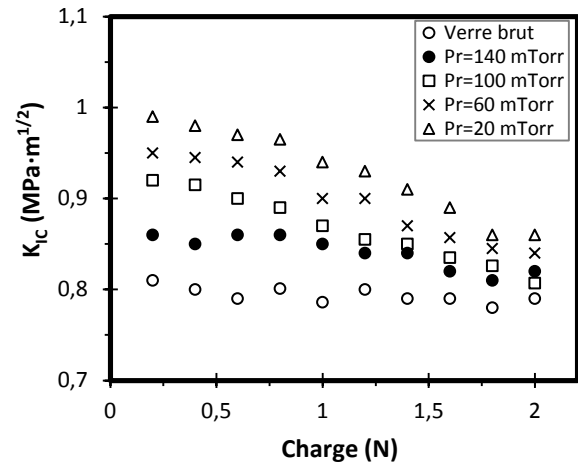


Fig. 3 : Variation de la ténacité en fonction de la charge appliquée pour différentes pressions de pulvérisation ( $P_u = 50$  Watt et  $Ar/O_2 = 50/50$ ).

### 3.4- Vitesse de croissance

La variation du taux de croissance en fonction de la puissance de dépôt est représentée sur la figure 4.

On remarque que la vitesse de dépôt augmente avec l'augmentation de la puissance d'une façon presque linéaire comme le montre la courbe représentée sur la figure. Ce comportement est normal vu que l'augmentation de la puissance dans la décharge augmente la réactivité de celle-ci. Par conséquent, le taux de pulvérisation de la cible devient important, ce qui induit une augmentation de la vitesse de croissance [22].

La figure 5 représente l'évolution de la vitesse de croissance en fonction de la pression de dépôt. On remarque une diminution du taux de croissance si on augmente la pression. D'après Dengyuan et al. [23] le rendement de la pulvérisation dépend de la pression de dépôt et la distance cible/substrat. On peut déduire que la variation de la pression influe directement sur le libre parcours moyen des atomes pulvérisés et par suite sur le transport des particules pulvérisées. Pour une pression élevée, on a un faible rendement [24].

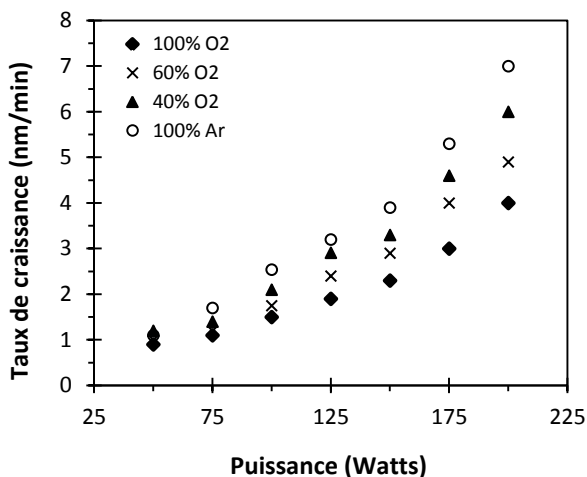


Figure 4 : Taux de croissance en fonction de la puissance de dépôt ( $P_r = 100$  mTorr).

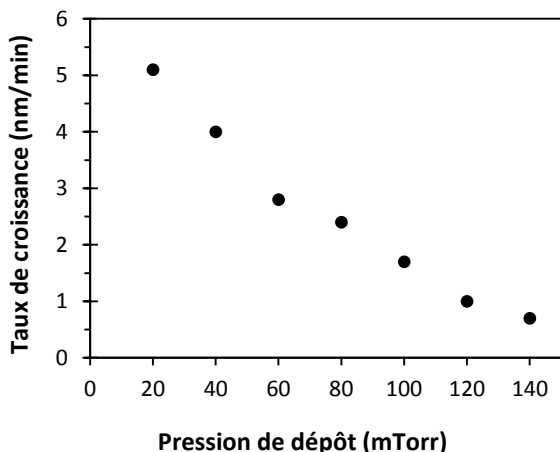


Figure 5 : Taux de croissance en fonction de la pression de dépôt.  $P_u = 50$  Watt et  $[O_2] = 20\%$ .

La figure 6 représente l'évolution de la vitesse de dépôt en fonction de la concentration d'oxygène dans le mélange (Ar/O<sub>2</sub>). Nous constatons que la vitesse de dépôt des couches diminue avec l'augmentation de la concentration d'oxygène. Ceci est dû à la masse moléculaire de l'argon qui est plus grande que celle de l'oxygène, par conséquent, le taux de pulvérisation dû aux ions d'argon est plus important [5].

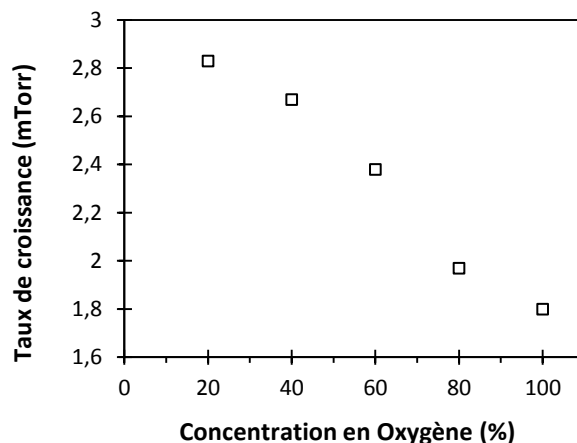


Figure 6 : Taux de croissance en fonction du pourcentage d'oxygène dans le mélange (Ar/O<sub>2</sub>),  $P_r = 90$  mTorr ;  $P_u = 50$  Watt.

### 3.5- Diffraction des rayons X

La figure 7 montre le spectre de diffraction des rayons X des échantillons de verre revêtus par des couches de ZnO à pressions différentes, allant de 20 mTorr jusqu'à 140 mTorr.

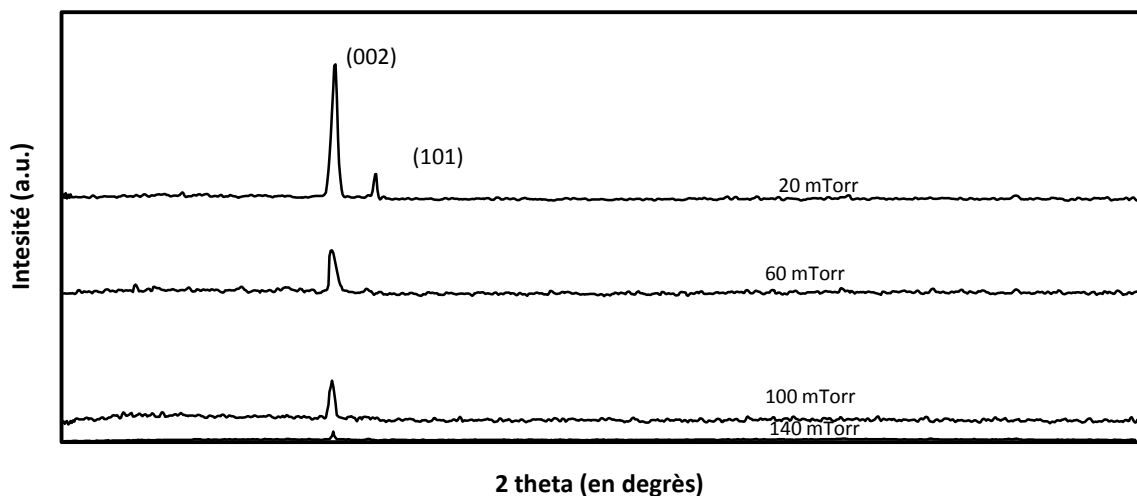


Figure 7 : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de verre revêtus par des couches de ZnO dans différentes conditions

On peut remarquer l'existence de deux pics très distincts que l'on peut répertorier à l'aide des fichiers ASTM du ZnO. En effet, on trouve les pics représentatifs du ZnO (002) et (101) aux angles respectifs  $2\theta = 34.5^\circ$  et  $36.8^\circ$ .

De plus, nous observons que pour une pression de 20 mTorr, on a une orientation préférentielle relative au plan (002); nous avons de plus observé qu'en augmentant la pression de dépôt, il y'a diminution du pic (002). Cela peut être expliqué comme suit : à une pression supérieure à 20 mTorr, avant d'atteindre la surface du substrat, les atomes d'oxygène et de zinc entrent en collision avec les ions du plasma d'une manière plus importante. Il en résulte que ces atomes n'ont plus assez d'énergie pour former des arrangements de structures selon l'orientation (002) à la surface du substrat. A une pression beaucoup plus forte (140 mTorr), le rendement de la pulvérisation est pratiquement nulle d'où l'épaisseur de la couche est plus faible, ce qui justifie presque l'absence des pics de diffractions sur la figure.

### 3.6- Caractérisation électrique

Nous avons déterminé les propriétés électriques des couches de ZnO par la méthode de quatre pointes. En effet, il a été rapporté qu'une résistivité élevée à la surface des films de ZnO a un effet très positif sur le bon fonctionnement des dispositifs de couches minces (capteurs et filtres). En effet, une résistivité de surface élevée diminue le courant de fuites [25].

#### 3.6.1- Résistivité électrique

Nous avons déterminé les propriétés électriques des couches de zinc (ZnO) par des mesures des quatre pointes. La figure 8 montre la variation de la résistivité électrique des couches de ZnO déposées en fonction de la pression de dépôt. On observe qu'elle diminue légèrement avec la pression jusqu'à  $P_r = 70$  mTorr pour devenir sensiblement constante par la suite. Cet effet a ainsi tendance à diminuer l'énergie cinétique des espèces chimiques présentes dans le plasma et donc leur vitesse, ce qui peut expliquer la diminution de l'épaisseur du dépôt à forte pression.

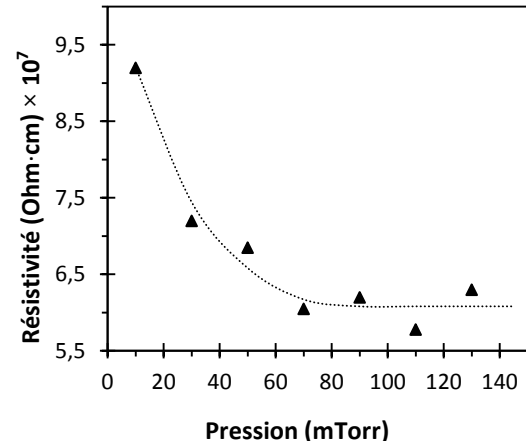


Figure 8 : Evolution de la résistivité en fonction de la pression d'oxygène

#### 3.6.2- Etude en fonction de la puissance

La figure 9 montre la variation de la résistivité électrique des couches de ZnO en fonction de la puissance injectée dans la décharge. Nous constatons qu'il y a une chute très nette de la résistivité qui tend vers 0 au-delà de 140 Watts. La valeur la plus élevée est obtenue pour une puissance de 50 W. Néanmoins nous avons montré avec les dépôts, qu'il est possible d'atteindre une très forte résistivité (de l'ordre de  $9 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ) environ. Ces valeurs sont plus élevées par rapport à celles obtenues par la première série données sur la figure 8 ( $\sim 9 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ).

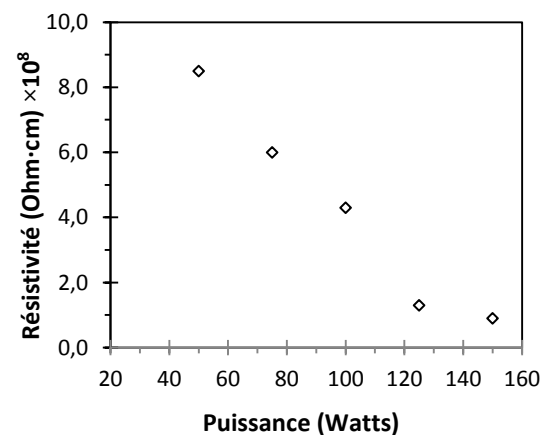


Figure 9 : Evolution de la résistivité électrique des films déposés en fonction de la puissance.

#### 3.6.3- Effet de la concentration d'oxygène

Nous avons suivi l'évolution de la résistivité électrique en fonction des pourcentages d'oxygène dans le mélange (Ar/O<sub>2</sub>). Les résultats des mesures sont représentés sur la figure 10. Nous pouvons observer une

augmentation importante de la résistivité avec le pourcentage d'oxygène.

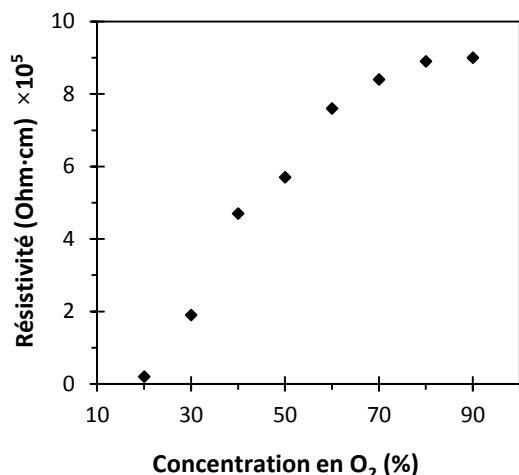


Figure 10: Evolution de la résistivité électrique des films en fonction de la concentration en Oxygène.

### 3.7- Observation microscopique

La figure 11 montre une micrographie obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) d'une couche d'oxyde de zinc déposée sur un substrat en verre sodocalcique. Cette figure montre bien que la surface est irrégulière et qu'il y a existence d'une faible porosité

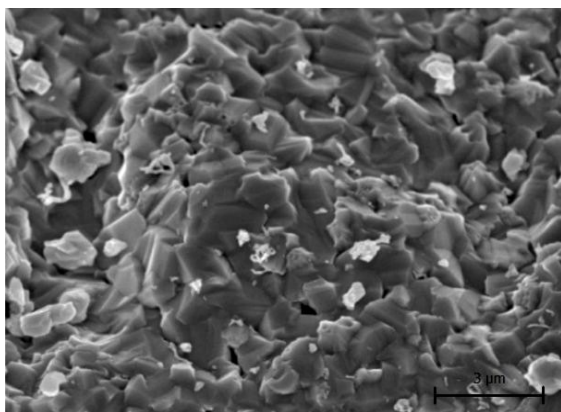


Fig. 11: Micrographie MEB d'une couche d'oxyde de zinc (ZnO) déposée sur un substrat de verre silico-sodocalcique.

## 4- CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons déposé des couches d'oxyde de zinc (ZnO) sur des substrats en verre silicosodocalcique par la méthode de pulvérisation cathodique (Sputtering) dans différentes conditions expérimentales (pression de pulvérisation,

pourcentage de gaz réactif (O<sub>2</sub>) dans le mélange gazeux (Ar /O<sub>2</sub>) et puissance injectée dans la décharge. Nous avons réalisé plusieurs séries d'échantillons que nous avons caractérisés par la suite sur le plan structural, optique, mécanique et électrique.

Les résultats ont été trouvés en faisant varier successivement chacun des paramètres expérimentaux tout en gardant les autres constants. Nous avons montré que les paramètres de dépôts tels que les pressions de pulvérisation, les puissances de décharge et les concentrations relatives d'oxygène et d'argon ont une importance capitale sur la structure interne des couches déposées.

Notre étude a conduit aux points suivants :

- L'augmentation de la pression de pulvérisation entraîne l'augmentation de la transmission optique des échantillons revêtus par les couches de ZnO déposées, suggère que la pression influe directement l'épaisseur de ces couches. Les fluctuations de transmission remarquées dans la gamme du visible sont dues à des franges d'interférence.
- L'augmentation de la pression provoque une diminution de la dureté Vickers des couches d'une manière quasi-linéaire
- La résistance à la fissuration diminue aussi lorsque la pression de pulvérisation augmente, elle est de l'ordre de l'unité (1 MPa√m) pour une pression de 20 mTorr et une faible charge (0,2 N). D'autre part, elle diminue sensiblement d'une façon presque linéaire en fonction de la charge appliquée.
- L'analyse des spectres DRX montre que les couches réalisées présentent une orientation préférentielle (002) pour des faibles pressions (inférieurs à 100 mTorr).
- La vitesse de dépôt des couches diminue avec l'augmentation de la pression de dépôt même phénomène a été enregistré en variant la concentration relative d'oxygène, mais elle augmente en augmentant la puissance.
- La résistivité électrique diminue avec la pression pour devenir sensiblement constante à des pressions élevées. Nous observons aussi qu'elle augmente d'une façon importante en fonction du pourcentage d'oxygène et la puissance de décharge.

## REFERENCES

- [1] Evcimen Duygulu N., Kodolbas A.O., Ekerim A., "influence of r.f. power on structural properties of ZnO thin films", Journal of Crystal Growth, Volume 381, 15 October 2013, Pages 51-56.
- [2] Yinzheng Wang, Benli Chu; "Structural and optical properties of ZnO thin films on (111)

CaF<sub>2</sub> substrates grown by magnetron sputtering”, *Superlattices and Microstructures*, Volume 44, Issue 1, July 2008, Pages 54-61.

[3] Tsoutsouva M.G., Panagopoulos C.N., Papadimitriou D., Fasaki I., Kompitsas M.; “ZnO thin films prepared by pulsed laser deposition”, *Materials Science and Engineering: B*, Volume 176, Issue 6, 15 April 2011, Pages 480-483.

[4] Che-Wei Hsu, Tsung-Chieh Cheng, Chun-Hui Yang, Yi-Ling Shen, Jong-Shinn Wu, Sheng-Yao Wu; “Effects of oxygen addition on physical properties of ZnO thin film grown by radio frequency reactive magnetron sputtering”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 509, Issue 5, 3 February 2011, Pages 1774-1776.

[5] L. Kahal, "Etude expérimentale des semiconducteurs en couches minces de type II-VI", Mémoire de magister, Université d'Oran U.S.T.O.M.B.,(2001).

[6] L. Ding, M. Boccard, G. Bugnon, M. Benkhaira, S. Nicolay, M. Despeisse, F. Meillaud, C. Ballif ; “Highly transparent ZnO bilayers by LP-MOCVD as front electrodes for thin-film micromorph silicon solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 98, March 2012, Pages 331-336.

[7] H. Zhu, J. Hüpkes, E. Bunte, S.M. Huang ; “Study of ZnO:Al films for silicon thin film solar cells”, *Applied Surface Science*, Volume 261, 15 November 2012, Pages 268-275.

[8] R. Mariappan, V. Ponnuswamy, P. Suresh, N. Ashok, P. Jayamurugan, A. Chandra Bose ; “influence of film thickness on the properties of sprayed ZnO thin films for gas sensor applications”, *Superlattices and Microstructures*, Volume 71, July 2014, Pages 238-249.

[9] Jean Pierre Atanas, Roy Al Asmar, Antonio Khoury, Alain Foucaran ; “Optical and structural characterization of ZnO thin films and fabrication of bulk acoustic wave resonator (BAW) for the realization of gas sensors by stacking ZnO thin layers fabricated by e-beam evaporation and r.f. magnetron sputtering techniques”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 127, Issue 1, 28 February 2006, Pages 49-55.

[10] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Gonçalves, A. Marques, L. Pereira, R. Martins ; “Recent advances in ZnO transparent

thin film transistors”, *Thin Solid Films*, Volume 487, Issues 1–2, 1 September 2005, Pages 205-211.

[11] Tadatsugu Minami, Jun-ichi Oda, Jun-ichi Nomoto, Toshihiro Miyata; “Effect of target properties on transparent conducting impurity-doped ZnO thin films deposited by DC magnetron sputtering”, *Thin Solid Films*, Volume 519, Issue 1, 29 October 2010, Pages 385-390.

[12] Rafik Serhane, Samira Abdelli-Messaci, Slimane Lafane, Hammouche Khales, Walid Aouimeur, Abdelkadder Hassein-Bey, Tarek Boutkedjirt; “pulsed laser deposition of piezoelectric ZnO thin films for bulk acoustic wave devices”, *Applied Surface Science*, Volume 288, 1 January 2014, Pages 572-578.

[13] Hafdallah A. ; Étude du dopage des couches minces de ZnO élaborées par spray ultrasonique, mémoire de magister en Physique, laboratoire des couches minces et interfaces, Faculté des sciences exactes, département des sciences exactes, Université Mentouri, Constantine, (2007), 115 pages.

[14] Sang Yeol Lee, Eun Sub Shim, Hong Seong Kang, Seong Sik Pang, Jeong Seok Kang; “Fabrication of ZnO thin film diode using laser annealing”, *Thin Solid Films*, Volume 473, Issue 1, 1 February 2005, Pages 31-34.

[15] R. Jayakrishnan, K. Mohanachandran, R. Sreekumar, C. Sudha Kartha, K.P. Vijayakumar; “ZnO thin films with blue emission grown using chemical spray pyrolysis”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Volume 16, Issue 2, April 2013, Pages 326-331.

[16] Patcharee Jongnavakit, Pongsaton Amornpitoksuk, Sumetha Suwanboon, Tanakorn Ratana; “Surface and photocatalytic properties of ZnO thin film prepared by sol-gel method”, *Thin Solid Films*, Volume 520, Issue 17, 30 June 2012, Pages 5561-5567.

[17] Siti Nuurul Fatimah Hasim, Muhammad Azmi Abdul Hamid, Roslinda Shamsudin, Azman Jalar; “Synthesis and characterization of ZnO thin films by thermal evaporation”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 70, Issue 12, December 2009, Pages 1501-1504.

[18] E. Fazio, A.M. Mezzasalma, G. Mondio, T. Serafino, F. Barreca, F. Caridi ; “Optical and structural properties of pulsed laser ablation



deposited ZnO thin film”, Applied Surface Science, Volume 257, Issue 6, 1 January 2011, Pages 2298-2302.

[19] V. Tvarozek, I. Novotny, P. Sutta, S. Flickyngerova, K. Schtereva, E. Vavrinsky; “Influence of sputtering parameters on crystalline structure of ZnO thin films”, Thin Solid Films, Volume 515, Issue 24, 15 October 2007, Pages 8756-8760.

[20] V. Tvarozek, I. Novotny, P. Sutta, M. Netrvalova, I. Vavra, J. Bruncko, P. Gaspierik, S. Flickyngerova; “Oblique angle sputtering of ZnO:Ga thin films”, Physics Procedia, Volume 32, 2012, Pages 456-463.

[21] C. Besleaga, G.E. Stan, A.C. Galca, L. Ion, S. Antohe, “Double layer structure of ZnO thin films deposited by Rf-magnetron sputtering on glass substrate”, Applied Surface Science, Volume 258, Issue 22, 1 September 2012, Pages 8819-8824.

[22] Kazuo Satoh et al.; “Influence of Oxygen Flow Ratio on Properties of Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, Issue L34, part 2, Numbers 1-7, (2005), pp.

[23] Dengyuan S., W. Per, C. Winston, G. Armin; “Investigation of lateral parameter variation of Al-doped zinc oxide films prepared on glass substrates by Rf magnetron sputtering”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 73, Issue 1, May 2002, Pages 1–20.

[24] Dong Kang et al.; "Highly transparent and high haze bilayer Al-doped ZnO thin film employing oxygen-controlled seed layer", Jap. Jour. Appl. Phys., Vol. 49, Issue L34, 2010, pp. 134-143.

[25] Susumu T., Yasuhisa O. and Sumio N.; “Effect of Silicon Addition on Electrical Properties of SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> Thin Films”, Japanese Journal of App. Physics”, vol. 43, Issue 11B, (2004), pp.7871-7875.