



## EFFETS DES CONDITIONS DE DEPÔT SUR LES PROPRIETES ELECTRIQUES DES COUCHES MINCES D'OXYDE DE ZINC ET MECANISMES DE DIFFUSION

A. Djelloul<sup>1</sup>, R. A. Rabadanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Matériaux, Structure des Systèmes Electroniques et leur Fiabilité (CUOEB), Centre universitaire Khenchela -Algérie

<sup>2</sup>Departement of the physical electronics, Daghestan state university, Russia

### Résumé :

Les couches minces d'oxyde de zinc (ZnO) sont élaborées par la technique de transport en phase gazeuse à partir de la poudre de ZnO dans une atmosphère d'hydrogène. Les paramètres des couches ont été étudiés en utilisant les mesures d'effet Hall et de conductibilité électrique. Lorsque la température varie de 115 K à 500 K, quelles que soient les conditions d'obtention des couches de ZnO, la concentration des électrons augmente à cause de la forte solubilité des impuretés donneurs (Zn et H). Différents mécanismes limitent la mobilité des porteurs dans les films, et selon la température, chacun d'eux peut jouer un rôle déterminant. Suivant le domaine de température, le mécanisme de diffusion des électrons dans ZnO est une combinaison de diffusions par des impuretés neutres ou chargées et par les phonons. Pour les couches obtenues à la température  $T_{\text{substrat}}$  situées entre 870 et 910 K et  $T_{\text{creuset}}$  comprise entre 990 et 1000 K, les mesures électriques par effet Hall montrent que la mobilité des électrons atteint son maximum d'environ  $640 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  vers 115 K et vaut 140 à  $160 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  à 300 K.

**Mots Clés :** Couches Minces. Oxyde de zinc. Dépôt Chimique en Phase Vapeur. Mobilité des électrons.

**Abstract :** ZnO thin films have been fabricated using CVD process. The electrical properties have been studied by means of conductivity and Hall-effect measurements and were found to be dependent on growth conditions. Results of temperature dependent Hall mobility measurements indicate that there are different transport mechanisms at high and low temperatures. The Hall mobility equals  $140\text{-}160 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  at room temperature, and  $640 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  at 115 K.

### 1. Introduction

L'oxyde de zinc ZnO est un matériau semiconducteur ayant un grand gap ( $E_g = 3,3 \text{ eV}$ ) [1, 2] et qui présente des propriétés physiques très intéressantes. Sa transparence et sa conductibilité électrique font de lui un candidat de choix dans beaucoup d'applications optoélectroniques commerciales.

Les mesures d'effet Hall en fonction de la température permettent de trouver la densité  $N_d$  et l'énergie d'activation  $E_a$  des donneurs qui sont reliées par la loi:

$$E_a(N_d) = E_a(N_d=0) - \alpha N_d^{1/3},$$

où  $\alpha$  est la constante d'écran [3]. Pour retrouver ces grandeurs, un recuit thermique est effectué sur un monocristal de ZnO dans une atmosphère de vapeur de zinc [4] aux températures  $T_{\text{ZnO}} = 1300 \text{ K}$  et  $T_{\text{Zn}} = 773 \text{ K}$ . Les résultats se mettent sous la forme suivante :

$$E_a = 0,045 - 2,8 \times 10^{-8} N_d^{1/3}, \text{ pour } g^{-1} = 2$$

(donneur de type hydrogénique:  $1s^1$ );

$$E_a = 0,043 - 2,4 \times 10^{-8} N_d^{1/3}, \text{ pour}$$

$g^{-1} = 0,5$  (donneur de type:  $1s^2$ ),  $E_a$  est exprimée en eV et  $g^{-1}$  traduit le degré de dégénérescence. L'énergie d'activation s'annule pour des densités de donneurs  $N_d$  égale à  $4,15 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $g^{-1} = 2$  et également pour

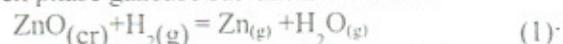
$$N_d = 5,75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ et } g^{-1} = 0,5. \text{ Les études de}$$

l'effet Hall et de la conductibilité électrique du monocristal de ZnO en fonction de la température (de 60 à 300 K) ont été publiées [5]. Les donneurs sont introduits dans le monocristal par la vapeur de zinc ou d'hydrogène à la température 770 K, après quoi le cristal est refroidi rapidement. Les résultats montrent que l'énergie d'ionisation  $E_d$  est égale à 0,051 eV pour des densités de donneurs de  $N_d = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , alors que  $E_d = 0$  pour  $N_d = 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Certains auteurs [6] ont montré, récemment, que la relation  $E_d = 2 E_a$  est

satisfaite. Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des couches épitaxiales, dopées ou non, déposées sur des substrats en saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [7-9], mais les relations entre les structures et les propriétés électriques de ZnO restent ambiguës. La mobilité de Hall de ZnO est au-dessus  $180 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  pour les monocristaux [10,11], par contre elle ne dépasse pas quelques dizaines de  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  pour les couches minces et les couches épitaxiales [7, 8]. Il est bien connu que les défauts riches en zinc tels que le zinc interstitiel ( $\text{Zn}_i$ ) [12, 13] et les lacunes d'oxygène ( $\text{V}_o$ ) [14, 15] sont des donneurs peu profonds responsables de la conduction de type n. Cependant, les résultats des calculs faits par Van de Walle [16] et des mesures de résonance paramagnétique électronique (EPR) [17, 18] suggèrent que les lacunes ne peuvent pas être un réservoir permanent d'électrons libres. Le zinc en excès, solubilisé dans ZnO, se trouve en interstice [19,20]. L'hydrogène solubilisé, à une température inférieure à 850 K, forme avec les ions d'oxygène du réseau le groupe  $(\text{O-H})^{2-}$  [21]. Pour des températures inférieures à 360 K, l'hydrogène forme avec les atomes de zinc interstitiel et du réseau, des groupes de type  $(\text{Zn-H})^{2+}$  et  $(\text{Zn-H})^+$  [22]. A basse température (<360 K), l'existence du groupe de type  $(\text{Zn-H})$  dans ZnO devient peu probable du point de vue thermodynamique, l'énergie de la liaison Zn-H étant égale à 0,21 eV [21]. Les atomes de zinc interstitiel et le groupe  $(\text{O-H})$  se comportent comme des donneurs simples quelle que soit la température. Ils sont totalement ionisés à la température ambiante, par conséquent leur concentration totale est déterminée complètement par la concentration de Hall des porteurs de charges. Nous avons caractérisé les couches minces de ZnO en étudiant les variations de la concentration et de la mobilité des électrons mesurées par la méthode d'effet Hall en fonction de divers paramètres (température de dépôt, recuit thermique, etc.). L'étude détaillée du lien existant entre les conditions d'élaboration et les propriétés finales des couches minces présente un intérêt scientifique et technologique considérable. L'objectif de notre présent travail est de définir l'influence des conditions d'élaboration des couches minces de ZnO sur leurs propriétés électroniques et les différents mécanismes qui limitent la mobilité des électrons en fonction de la température.

## 2. Méthodes expérimentales

Les couches minces de ZnO sont élaborées à partir de la poudre par la technique de transport en phase gazeuse suivant la réaction:



sous des conditions de croissance riches en zinc et en hydrogène solubilisé [29]. La formation de ces défauts est inhérente à la méthode. Il est établi que les conditions d'obtention conditionnent directement la microstructure de la couche élaborée. Au niveau du substrat, la concentration des molécules d'eau est inférieure à celle de la vapeur de zinc, ce qui conduit à l'enrichissement des couches minces en atomes de zinc. Cette cause n'est pas la seule qui favorise la non stœchiométrie, mais elle en est la principale dans les conditions de la réaction (1). L'excès de zinc dans le composé ZnO en phase gazeuse, dans la zone du substrat, peut être diminué en introduisant de l'hydrogène combiné à la vapeur d'eau. Cette combinaison permet d'éviter la diminution de la concentration des molécules d'eau. Les couches de ZnO monocristallin proches de la perfection cristallographique sont obtenues sur des substrats en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lorsque le gradient de température entre la zone du creuset et la zone du substrat est compris entre 100 K et 120 K, ce qui correspond à un rendement ( $\eta = P_{\text{Zn}(\text{T}_{\text{substrat}})} / P_{\text{Zn}(\text{T}_{\text{creuset}})}$ ) de 3,5% du zinc dans la phase gazeuse et une pression totale dans le système égale à 0,166 MPa. Les calculs montrent que les couches minces de ZnO, proches de la stœchiométrie, sont obtenues si la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange (hydrogène -vapeur d'eau) est égale à 13,5% de la pression partielle de la vapeur de zinc attendue à la température du creuset.

La structure cristalline des couches minces a été déterminée par diffraction d'électrons rapides sous incidence rasante (RHEED), tandis que la morphologie de la surface a été caractérisée à l'aide des microscopes MIM-10 et MII-4, ce dernier a été aussi utilisé pour la mesure des épaisseurs des films inférieures à 10  $\mu\text{m}$  avec une précision de 0,015 à 0,030  $\mu\text{m}$ . Pour des épaisseurs plus grandes que 10  $\mu\text{m}$ , nous avons utilisé les butées micrométriques du microscope. La méthode de compensation, utilisant un potentiomètre de type P363-2 et une unité d'auto compensation AK6PV.367.294, a servi pour les mesures électriques d'effet Hall. Les échantillons ont été dotés de contacts en Indium déposés par

## Effet des conditions de dépôt sur les propriétés électriques des .....

évaporation thermique à travers un masque en saphir.

### 3. Résultats et discussions

Les paramètres des couches de ZnO ont été étudiés en utilisant les mesures d'effet Hall et de conductibilité électrique. Les conditions d'élaboration des couches de ZnO sont le temps de croissance ou le rendement relatif de la réaction, la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange gazeux de base, la pression totale des gaz dans le système et la concentration des impuretés. On observe, à température ambiante, des atomes neutres de zinc dans les couches de ZnO, orientées ou non, élaborées à haute température de substrat avec un manque de vapeur d'eau dans l'hydrogène de base. Comme on peut le voir sur les microphotographies des figures 1 et 2, les atomes neutres de zinc sont distribués de manière non uniforme dans les échantillons et ont tendance à se placer le long des défauts linéaires tels que les frontières de petits cristaux, les dislocations, etc.

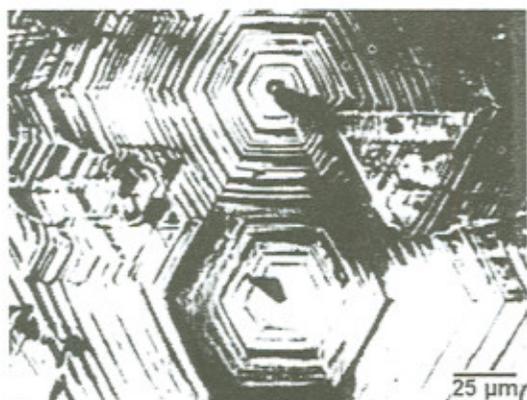


Figure 1: Microphotographie optique, après attaque chimique de la surface par un acide faible, d'une couche mince de ZnO, d'épaisseur 10 µm, déposée sur un substrat en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> d'orientation (0001).

La présence de ces atomes donne une couleur grise aux couches tandis que leur concentration élevée augmente la conductibilité des échantillons jusqu'à  $10^3 \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  bien que la concentration des porteurs ne dépasse pas  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure 3 montre la variation de la mobilité des électrons des couches minces de ZnO en fonction de la température du substrat pour différentes pressions partielles d'hydrogène, lorsque la température du creuset est fixée à 990

K. Pour une vitesse de dépôt située entre 5,5 et 6 µm, on observe, à température ambiante, un maximum de mobilité des électrons qui atteint  $\mu = 150 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , pour une température de substrat de 880 K et une pression d'hydrogène de 0,166 MPa.



Figure 2: Microphotographie optique montrant des veinules de Zn métallique dans des couches minces de ZnO, d'épaisseur 2 µm, déposées sur un substrat en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> d'orientation (0001).

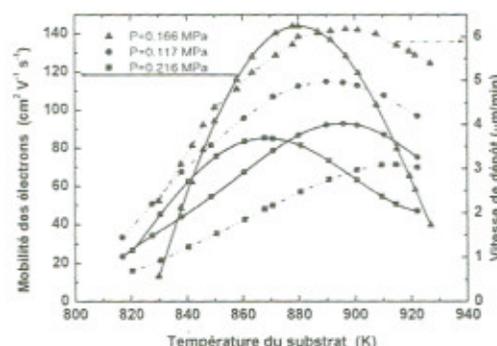


Figure 3: Variation de la mobilité des électrons et évolution de la vitesse de dépôt des couches minces de ZnO en fonction de la température du substrat pour différentes pressions partielles d'hydrogène dans le système, la température du creuset étant fixée à 990 K.

Le comportement de la mobilité peut s'expliquer par la nature des centres de diffusion et de leurs concentrations. En effet, dans les couches de ZnO obtenues à basse température de substrat, et à basse pression d'hydrogène, la plupart des centres de diffusion sont des groupes (O-H) liés avec une énergie de 0,44 eV [21], alors qu'à haute température et à haute pression d'hydrogène, la majorité des centres de diffusion dans le réseau sont des lacunes d'oxygène et des atomes de zinc interstitiel.

## Effet des conditions de dépôt sur les propriétés électriques des .....

En fixant la pression d'hydrogène à 0,157 MPa et pour différentes orientations du substrat en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la mobilité des électrons des couches minces de ZnO croît de façon monotone en fonction de la température du creuset, comme le montre la figure 4, dans le domaine situé entre 850 et 1050 K. Ceci peut s'expliquer par l'entrée du zinc, en excès par rapport à la stœchiométrie, dans la composition du dépôt.

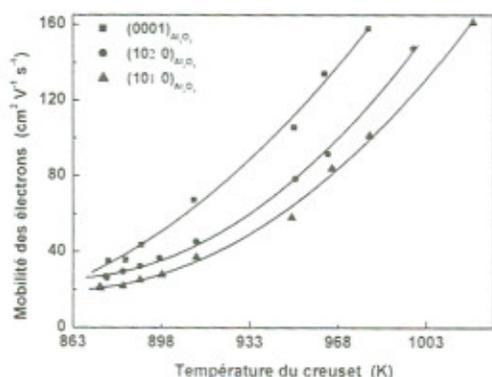


Figure 4: Variation de la mobilité des électrons des couches minces de ZnO, d'épaisseur 20  $\mu\text{m}$ , en fonction de la température du creuset pour différentes orientations du substrat en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la pression étant fixée à 0,157 MPa.

L'inhomogénéité de la distribution des défauts de structure dans le sens de l'épaisseur a forcément des répercussions sur les propriétés électriques des couches de ZnO. Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur des couches, déposées dans des conditions identiques, sur la conductivité, la mobilité et la concentration électronique. Les résultats de ces expériences sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Influence de l'épaisseur des couches de ZnO sur la mobilité  $\mu$ , la conductivité  $\sigma$  et la concentration  $n$  des électrons à 300 K.

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	$\mu$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$\sigma$ ( $\text{O}^{-1}\text{cm}^{-1}$ )	$n$ ( $10^{16}\text{cm}^{-3}$ )
20	140	1,5	7
10	120	3,6	20
5	115	11	60
1,3	100	43	200
0,8	92	83	900
0,14	45	90	1200
0,04	37	208	3400

donneurs (zinc interstitiel et hydrogène) et par l'augmentation de la concentration des défauts linéaires lorsque l'épaisseur des couches diminue.

Pour évaluer la limite dans laquelle les porteurs de charge peuvent être excités thermiquement à

partir des niveaux d'impuretés, il faut calculer l'énergie d'ionisation des impuretés donneurs ( $E_d$ ) en considérant que l'électron, qui ne peut entrer dans les liaisons, reste capturé par l'un des centres  $\text{Zn}_i^+$ ,  $\text{H}^-$  ou  $\text{V}_O^+$ , qui sont les défauts prédominants dans les couches de ZnO [12,23,24], et il se forme un atome hydrogénéoïde. On peut écrire:

$$E_d = \frac{1}{\epsilon^2} \left( \frac{m^*}{m_e} \right) E_0$$

$E_0 = 13,6$  eV est l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène,  $\epsilon = 8,5$  [25] est la constante diélectrique et  $m^* = 0,27 m_e$  est la masse effective de l'électron [26]. Le calcul nous donne  $E_d = 0,051$  eV, ce qui entraîne que l'impureté peut lier l'électron en un état donneur situé à 51 meV en dessous du bas de la bande de conduction. L'énergie d'activation est, donc, environ 25 meV, ce qui correspond à la valeur de  $kT$  à la température ambiante.

La figure 5 montre la variation de la concentration électronique et de la conductivité des couches minces de ZnO, d'épaisseur 15  $\mu\text{m}$  et d'orientation  $(10\bar{1}1)$ , déposées sur la face  $(11\bar{2}0)$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec une pression d'hydrogène dans le système de 0,18 MPa, une vitesse moyenne de croissance de 5,5 à 6  $\mu\text{m}/\text{min}$  en fonction de la température pour différentes températures de creuset et de substrat.

La surface de ces couches est montrée sur le cliché de diffraction RHEED de la figure 6.

La concentration des électrons atteint la valeur de saturation au-delà de 500 K, alors que, selon Hutson [5], à 300 K, les donneurs sont tous ionisés. Dans nos échantillons, l'accroissement de la concentration des électrons de conduction avec l'augmentation de la température au-delà de 300 K est lié à l'augmentation de la concentration des donneurs par le biais du passage d'une partie des atomes neutres de zinc dans les interstices, pendant le refroidissement de l'échantillon à la fin de son élaboration. Ces atomes neutres sont concentrés le long des défauts linéaires du réseau de ZnO (fig. 2). Les paramètres électriques ont été mesurés par effet Hall en fonction de la température dans l'intervalle situé entre 77 et 500 K, et leurs

## Effet des conditions de dépôt sur les propriétés électriques des .....

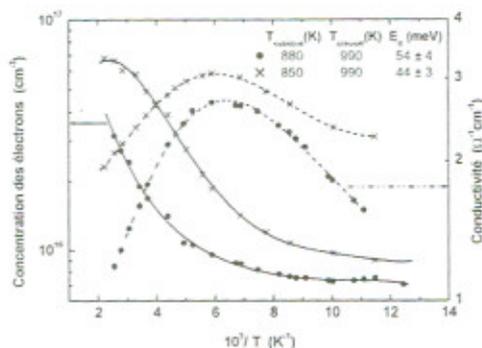


Figure 5: Variation de la concentration électronique et de la conductivité des couches minces de ZnO, d'épaisseur 15  $\mu\text{m}$ , déposées sur un substrat en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  d'orientation  $(11\bar{2}0)$  en fonction de la température pour différentes températures du substrat et du creuset.



Figure 6: Cliché de diffraction RHEED de la surface des couches minces de ZnO déposées sur la face  $(11\bar{2}0)$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

valeurs ont été relevées avec des pas de 10 à 15 degrés au régime de chauffage et de refroidissement. Pour des températures inférieures à 300 K, et loin du régime d'épuisement, la relation

$$E_d = -2 \times 10^3 k \frac{d \left[ \ln \left( n T^{-3/4} \right) \right]}{d \left( \frac{10^3}{T} \right)}$$

où  $k = 8,6173 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$  est la constante de Boltzmann et  $E_d$  est exprimé en eV, conduit à une énergie d'ionisation des centres donneurs,  $E_d$ , variant entre  $41 \pm 3 \text{ meV}$  et  $54 \pm 4 \text{ meV}$ , en accord avec le résultat obtenu par Hutson [5] et la valeur calculée ci-dessus à partir du modèle de l'atome hydrogénéoïde. Cette énergie diminue

avec l'augmentation de la concentration en accord avec le résultat obtenu par Hagemark et al [4]. Ainsi, lorsque la température varie de 115 K à 500 K, quelles que soient les conditions d'obtention des couches de ZnO, la concentration des électrons augmente à cause de la forte solubilité des impuretés donneurs (Zn et H). Quand la température augmente de 150 K à 500 K, les impuretés sont en partie ionisées et la conductivité décroît à cause de la diminution de la mobilité des électrons.

La figure 7 montre les variations de la mobilité des électrons en fonction de la température pour différentes températures de creuset et de substrat. A 300 K, la mobilité est comprise entre 140 et 160  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  et elle est d'environ 640  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  à 115 K.

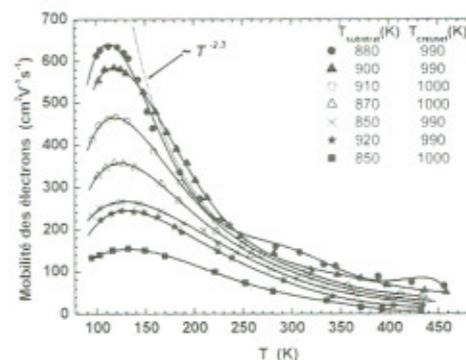


Figure 7: Variation de la mobilité des électrons des couches minces de ZnO, d'épaisseur 15  $\mu\text{m}$ , déposées sur la face  $(11\bar{2}0)$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , en fonction de la température. La pression d'hydrogène est de 0,18 MPa, la vitesse moyenne de croissance est d'environ 5,5 à 6  $\mu\text{m}/\text{min}$ . La courbe en trait plein représente la fonction

$$\mu_H(T) = \mu_H(T_0) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-2,3}$$

Une information importante sur les mécanismes de diffusion des porteurs peut être obtenue à partir de ces mesures si l'on exprime la mobilité par la relation:

$$\mu_H(T) = \mu_H(T_0) \left( \frac{T}{T_0} \right)^\alpha$$

dont on déduit l'exposant  $\alpha$ :  $\alpha = \frac{\Delta \log \mu_H}{\Delta \log T}$ .

Les valeurs de  $\alpha$  nous renseignent sur les mécanismes de diffusion des porteurs de charge. Théoriquement, lorsque la diffusion se fait par

les phonons si  $\alpha = -1,5$ , par les impuretés ionisées si  $\alpha = +1,5$ , par les impuretés neutres si  $\alpha = 0$  et par les dislocations si  $\alpha = 1$  [3, 27]. Le comportement de la mobilité en fonction de la température, pour l'oxyde de zinc, est semblable à celui de la mobilité des semiconducteurs à liaison purement covalente (Si, Ge...) bien que le pourcentage de liaison ionique dans ZnO soit égal à 62 [28]. En effet, dans la gamme des basses températures ( $T < 115$  K) les seuls électrons de la bande de conduction proviennent de l'ionisation d'impuretés donneurs (Zn et H) et la mobilité dépend de leur concentration et augmente proportionnellement à  $\frac{T^\alpha}{N_d}$ , passe par un maximum puis décroît proportionnellement à  $T^{-\alpha}$  dans la gamme des températures élevées. Dans le domaine des températures comprises entre 150 K et 500 K, la mobilité des électrons est décrite par la diffusion par les phonons sur les impuretés neutres. Comme pour la plupart des semiconducteurs, la valeur absolue de l'exposant  $\alpha$  n'est pas égale à la valeur théorique 1,5, elle varie de 0,5 à 2,3 pour les basses températures et ceci dépend des conditions d'élaboration des couches de ZnO. Les résultats montrent que dans le réseau de ZnO, les champs des ions sont fortement masqués par l'effet d'écran en raison du caractère fortement ionique des liaisons. La périodicité est perturbée, à des degrés différents suivant les conditions d'élaboration, par des défauts tels que des atomes de zinc interstitiels chargés et neutres, des dislocations et des frontières de blocs. Pour cette raison le mécanisme de diffusion des électrons dans ZnO est une combinaison de diffusions par des impuretés neutres ou chargées et par les phonons.

### Conclusion

Nous avons étudié l'influence des conditions de dépôt sur les propriétés électriques des couches minces de ZnO. Pour les couches obtenues aux températures  $T_{substrat}$  situées entre 870 et 910 K et  $T_{creuset}$  comprise entre 990 et 1000 K, les mesures électriques par effet Hall montrent que la mobilité des électrons atteint son maximum d'environ  $640 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  vers 115 K et vaut  $140$  à  $160 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  à 300 K. Dans nos échantillons, l'accroissement de la concentration des électrons de conduction avec l'augmentation de la température, au-delà de 300 K, est lié à l'augmentation de la concentration des donneurs par le biais du passage d'une partie des atomes

neutres de zinc dans les interstices, pendant le refroidissement de l'échantillon à la fin de son élaboration. Différents mécanismes limitent la mobilité des électrons dans ZnO et ceci dépend du domaine des températures. Aux basses températures, la mobilité des électrons est décrite par la diffusion par les atomes d'impuretés ionisés et neutres, tandis qu'aux températures supérieures à 115 K, le mécanisme de diffusion des électrons dans ZnO est une combinaison de diffusions par des impuretés neutres ou chargées et par les phonons. En vertu de ces résultats expérimentaux, on peut conclure que la méthode des réactions chimiques de transport permet d'élaborer des couches épitaxiales de ZnO correspondant à leur meilleur monocristal.

### Références

- [1] V. Srikant and D. R. Clarke, *J. Appl. Phys.* **83**, 5447 (1998)
- [2] D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, M. Y. Shen and Goto, *J. Appl. Lett.* **73**, 1038 (1998)
- [3] J. S. Blakemore, *Solid State Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985)
- [4] K. J. Hagemark and L. C. Chaacka, *J. Solid state chem.* **15**, 261 (1975)
- [5] A. R. Hutson, *Phys. Rev.* **108**, 222 (1957)
- [6] J. M. Gil, H. V. Alberto, R. C. Vilão, J. Pirote Duarte, P. J. Mendes, L. P. Foreira, N. Ayres de Campos, A. Weidinger, J. Krause, Ch. Niedermayer and S. F. J. Cox, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 5294 (1999)
- [7] V. Sarikant, V. Sergo and D. R. Clarke, *J. Am. Ceram. Soc.* **78**, 193 (1995)
- [8] Y. Igasaki and H. Saito, *J. Appl. Phys.* **70**, 3613 (1991)
- [9] M. Shimizu, T. Katayama, Y. Tanaka, T. Shiosaki and A. Kawabata, *J. Cryst. Growth.* **101**, 171 (1990)
- [10] D. C. Look, D. C. Reynolds, J. R. Sizelove, R. L. Jones, C. W. Litton, G. Cantwell and W. C. Harsch, *Solid State Commun.* **105**, 399 (1998)
- [11] B. M. Ataev, A. M. Bagamedova, A. M. Djabrailov, V. V. Mamedov and R. A. Rabadanov, *Thin solid films* **260**, 19 (1995)
- [12] D. C. Look, J. W. Hemsky and J. R. Sizelove, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2552 (1999)
- [13] D. C. Look, *Mater. Sci. Eng. B* **80**, 383 (2001)
- [14] B. J. Jin, S. H. Bae, S. Y. Lee, and S. Im, *Mater. Sci. Eng. B* **71**, 301 (2000)
- [15] A. Pöpl and G. Völkel, *phys. stat. sol. (a)* **125**, 571 (1991)

## Effet des conditions de dépôt sur les propriétés électriques des .....

- [16] C. G. Van de Walle, *Physica B* 308310, 899 (2001)
- [17] C. Gonzalez, D. Galland, and A. Herve, *phys. stat. sol. (b)* **72**, 309 (1975)
- [18] V. Soriano and D. Galland, *phys. stat. sol. (b)* **77**, 739 (1976)
- [19] S. B. Zhang, S. -H Wei and Alex Zunger, *Phys. Rev. B* **63**, 75205 (2001)
- [20] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant and J. A. Voigt, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 403 (1996)
- [21] G. Ghiotti, A. Chiorino, F. Bocuzzi, *Surf. Sci.* **287**, 228 (1993)
- [22] C. M. Mo, Y. H. Li, Y. S. Liu, Y. Zhang and L. D. Zhang, *J. Appl. Phys.* **83**, 4389 (1998)
- [23] For a review, G. Heiland, E. Mollwo and F. Stöckmann, in *Solid State Physics* (Academic, New York, 1959) Vol 8.
- [24] C. G. Van de Walle, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1012 (2000)
- [25] R. F. Dietz, J. J. Hopfield, D. G. Thomas, *J. Appl. Phys.* **32**, 2282 (1961)
- [26] K. Hummer, *Phys. Status Solidi (b)* **56**, 249 (1973)
- [27] D. L. Dexter, F. Seitz, *Phys. Rev.* **86**, 964 (1952)
- [28] J. C. Phillips, *Bonds and bands in semiconductors* ( Academic Press, New York, 1973)
- [29] A. Djelloul, R. A. Rabadanov, *Turk. J. Phys.* **28** (2004) 309.

