

CARACTÉRISATIONS OPTIQUES ET OPTO-ÉLECTRONIQUES DE COUCHES MINCES DE SILICIUM AMORPHE HYDROGÉNÉ

S.Tata^{1*}, L.Laidoudi^{1,2}, R.Cherfi¹, L.Chabane¹, A.Rahal¹

¹ Laboratoire de Physique des Matériaux, Faculté de Physique, USTHB, BP 32, 16111 Alger, Algérie

² Ecole supérieure des sciences de l'aliment et des industries agroalimentaires
Avenue Ahmed Hamidouche, route de Beaulieu, El Harrach 16200-Alger

Resumé

Notre travail rentre dans le cadre des caractérisations optiques et opto-électroniques des couches minces à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). Les couches ont été déposées à une température de porte substrat égale à 300 °C, par pulvérisation DC assistée d'un magnétron, sur plusieurs types de substrats compatibles avec les techniques de caractérisations utilisées. La spectrophotométrie UV-visible-IR a permis de déterminer l'épaisseur des couches, leur gap optique ainsi que leur indice de réfraction statique. Les jonctions Schottky (Au/a-Si :H) ont été caractérisées par la technique surface Photo-Voltage (SPV), qui permet d'estimer la longueur de diffusion des porteurs minoritaires, paramètre clé pour des applications photovoltaïques. Les résultats obtenus ont montré que les films élaborés sont photoconducteurs, et que les paramètres obtenus sont du même ordre que ceux rencontrés dans la littérature.

Mots clés : Couches minces, photoconductivité, technique SPV, longueur de diffusion, pulvérisation cathodique en continu.

Author Correspondence, e-mail: soniatata_pg@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Parmi les raisons et avantages ayant motivé l'intérêt porté au silicium amorphe hydrogène (a-Si:H), la possibilité de le déposer sur de grandes surfaces en couches minces [1] ou sur des surfaces non planes, avec un faible coût de fabrication, essentiellement dû à des températures de dépôt relativement faibles, sont les premières motivations des chercheurs et

industriels [2-7]. Ce matériau et ses alliages font l'objet d'un grand nombre de travaux sur le plan fondamental ainsi que sur le plan technologique [8,9] dans les domaines de l'optoélectronique [10-12] la microélectronique [13-15], la détection [16] ...etc. Ces matériaux peuvent être élaborés par diverses techniques. Toutes les études entreprises montrent que les propriétés du matériau dépendent fortement de la technique d'élaboration elle-même mais aussi des conditions de préparation. L'amélioration de la qualité du matériau passe par la réduction de sa densité de défauts dans le gap et l'augmentation de sa sensibilité à la lumière lorsque l'application visée est le photovoltaïque. En effet, ce matériau, déposé dans certaines conditions, peut être très photoconducteur. Cette propriété peut aussi être utilisée pour la caractérisation du matériau. De nombreux chercheurs ont utilisé les techniques opto-électriques sur les films désordonnés et semi-désordonnés ainsi que sur des dispositifs à base de ces films. Parmi ces techniques nous nous intéresserons dans ce travail à la méthode surface photo voltage (SPV) et à ses conditions de réalisation sur des structures Schottky à base de silicium amorphe hydrogéné a-Si :H.

2. DETAILS EXPERIMENTAUX

Les couches de silicium amorphe hydrogène (a-Si:H) ont été déposées à une température du porte-substrat de 300 °C, par pulvérisation DC assistée d'un magnétron, sur plusieurs types de substrats compatibles avec les techniques de caractérisations utilisées dans ce travail. Une série d'échantillons est préparée à des débits de H₂ variant entre 0,3 et 2,8 sccm. Les autres paramètres de dépôt sont maintenus constants. Le débit d'argon est de 6,4 sccm et la pression totale est maintenue à $1,5 \times 10^{-3}$ mbar.

La technique la plus souvent utilisée pour mesurer l'épaisseur, le gap optique et de l'indice de réfraction statique (n_s) des couches de a-Si :H est la spectrophotométrie UV-visible-IR. Cette technique conduit à la détermination du coefficient d'absorption (α) dans le domaine énergétique 1,8 eV - 2,2 eV.

Les mesures SPV (Surface Photo-Voltage) et I-V-T (courant-tension- température) sur diode Schottky nécessitent la réalisation d'un dispositif Schottky formé d'un substrat en silicium monocristallin fortement dopé (c-Si (n^+)) comme contact arrière et d'un contact Schottky par évaporation d'un film mince semi-transparent d'or (25 nm) au-dessus de la structure a-Si: H /c-Si (n^+). Le schéma des échantillons étudiés dans cette configuration

(configuration sandwich) est présenté sur la **Fig.1**. Les contacts électriques et thermiques sont assurés par la laque d'argent.

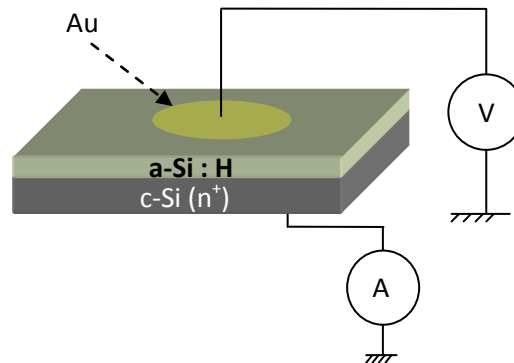


Fig.1. Configuration des jonctions étudiées.

La SPV se base sur la mesure de la réponse spectrale en tension de l'échantillon en circuit ouvert ($V_{OC}(\lambda)$), lorsqu'il est soumis à un flux de lumière monochromatique $\phi(\lambda)$. L'ajustement du flux de lumière incident à différentes longueurs d'onde pour une tension de circuit ouvert constante $V_{oc}(\lambda) = V_{OC\ SPV} = \text{cste}$, permet d'avoir une relation linéaire entre le flux ajusté ($\phi_{SPV}(\lambda)$) et la profondeur de pénétration du faisceau déterminée comme l'inverse du coefficient d'absorption, ce dernier étant déterminé à partir du spectre de transmission. Cette relation entre $\phi_{SPV}(\lambda)$ et $1/\alpha(\lambda)$ peut s'écrire d'après [17, 18] :

$$\phi_{SPV}(\lambda) \propto \left(\frac{1}{\alpha(\lambda)} + L_p \right) \quad (1)$$

L'extrapolation de la partie linéaire de $\phi_{SPV}(1/\alpha)$ permet de déterminer la longueur de diffusion des minoritaires L_p .

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Transmission optique

Dans cette partie, sont présentées les résultats obtenus par les mesures de transmission optique.

Dans la **Fig.2**, nous représentons l'évolution du coefficient d'absorption (α) en fonction de l'énergie ($h\nu$) de l'onde incidente. Le coefficient d'absorption représenté dans cette figure, est déterminé dans la zone de forte absorption du spectre de transmission optique.

Les valeurs des paramètres obtenus par les mesures de transmission optique sont résumées dans le **tableau 1**.

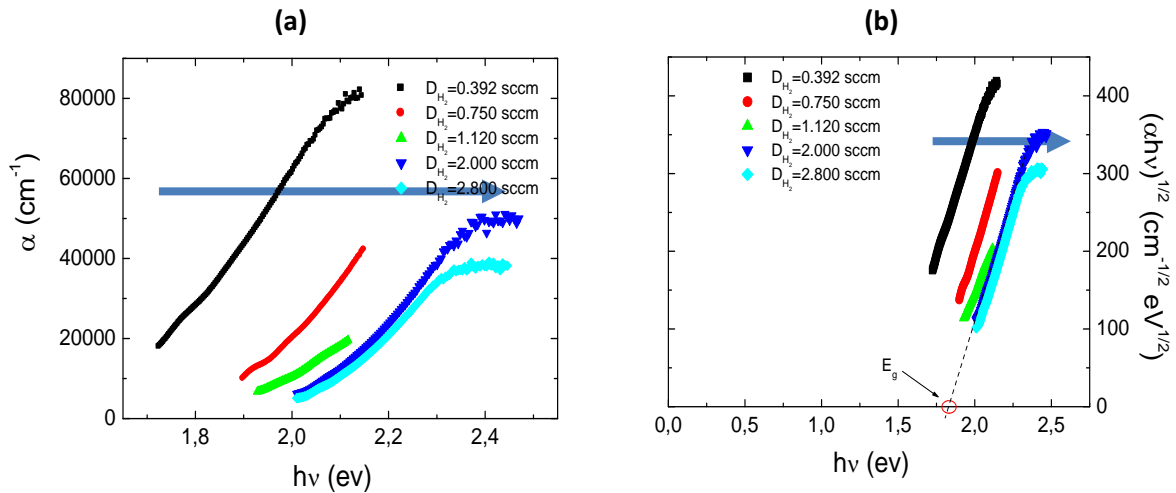


Fig.2. Evolution du coefficient d'absorption déterminé par transmission optique en fonction de $h\nu$ pour les échantillons déposés à différents débits d'hydrogène.

Tableau.1. L'épaisseur d , l'indice de réfraction statique n_s et le gap optique E_g des échantillons déposés à différents débits d'hydrogène.

Echantillons	D_{H_2} (sccm)	d (μm)	n_s	E_g (eV)
aSiH1	0,392	0,980	3,48	1,44
aSiH2	0,750	1,439	3,12	1,70
aSiH3	1,120	1,675	2,87	1,70
aSiH4	2,000	1,797	2,85	1,86
aSiH5	2,800	2,286	2,97	1,87

Nous remarquons que l'augmentation du débit d'hydrogène induit un déplacement du front d'absorption vers les hautes énergies de photons. Ce déplacement traduit l'élargissement du gap optique. Un exemple de la détermination de ce dernier (E_g) suivant la relation de Tauc ($(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g)$ [19]) est présenté dans la **Fig.2(b)**. Il s'agit d'extrapoler la partie linéaire de la caractéristique $(\alpha hv)^{1/2} = f(hv)$ vers l'axe des énergies.

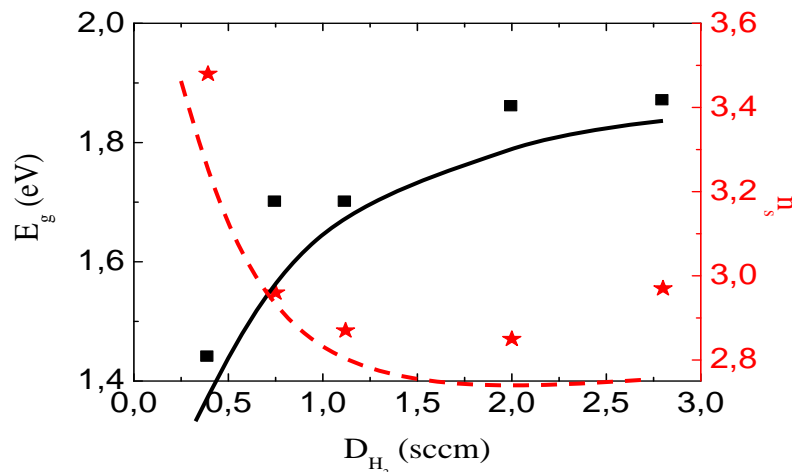


Fig.3. Variation du gap optique E_g et l'indice de réfraction statique n_s en fonction de débit d'hydrogène.

La **Fig.3** montre une augmentation de E_g en fonction du débit de l'hydrogène (D_{H_2}). Cette évolution est due à une modification de la densité d'états dans le matériau en fonction du contenu en hydrogène [20,21]. La figure (**Fig.3**) montre aussi l'évolution de l'indice de réfraction statique n_s en fonction de D_{H_2} . Nous observons une diminution de n_s de **3,48** à **2,8**. Les évolutions de E_g et de n_s sont liées à la compensation des liaisons pendantes par l'hydrogène ainsi qu'à la relaxation du matériau. Cette dernière provoque une réorganisation de la densité d'états aux voisinages des bords de bandes (de conduction et de valence) [22, 23]. La diminution de l'indice de réfraction traduit la diminution de la compacité du matériau [21, 24].

3.2 Caractérisations opto-électriques des jonctions Au/a-Si:H/c-Si (n^+)

Dans cette partie, sont présentées les caractéristiques courant-tension (I-V), sous obscurité et sous lumière à $T=40^\circ\text{C}$, des jonctions Au/a-Si:H/c-Si (n^+) qui présentent un

redressement et une tension de circuit ouvert (V_{OC}) mesurables, sous lumière blanche. Ces mêmes jonctions sont ensuite caractérisées par la technique SPV, ce qui nous permettra d'étudier la qualité photoconductrice des jonctions préparées.

Les mesures de conductivité sous obscurité (σ_d) et la photoconductivité (σ_{ph}) ont montré que la sensibilité ($S (T=40^\circ C) = (\sigma_{ph}-\sigma_d) / \sigma_d$) augmente de 2.5 à 6000 avec l'augmentation du débit de H_2 .

Les paramètres caractéristiques déterminés des I-V pour ces échantillons sont présentés dans le **Tableau 2**, ils présentent de faibles facteurs de redressement ($RR=I_{(1V)}/I_{(-1V)}$) mais des tensions (V_{OC}) mesurables comme le montre la **Fig.4**.

Tableau.2. Les paramètres caractéristiques issus des I-V sous obscurité sous lumière à $T=40^\circ C$.

ECH	D_{H_2} (mbar)	RR	V_{OC} (V)	I_{cc} (A)
aSiH1	0,392	2,63	0,02	$3,8 \times 10^{-8}$
aSiH3	1,120	4,47	0,15	$6,7 \times 10^{-7}$
aSiH5	2,800	4,94	0,35	$5,3 \times 10^{-7}$

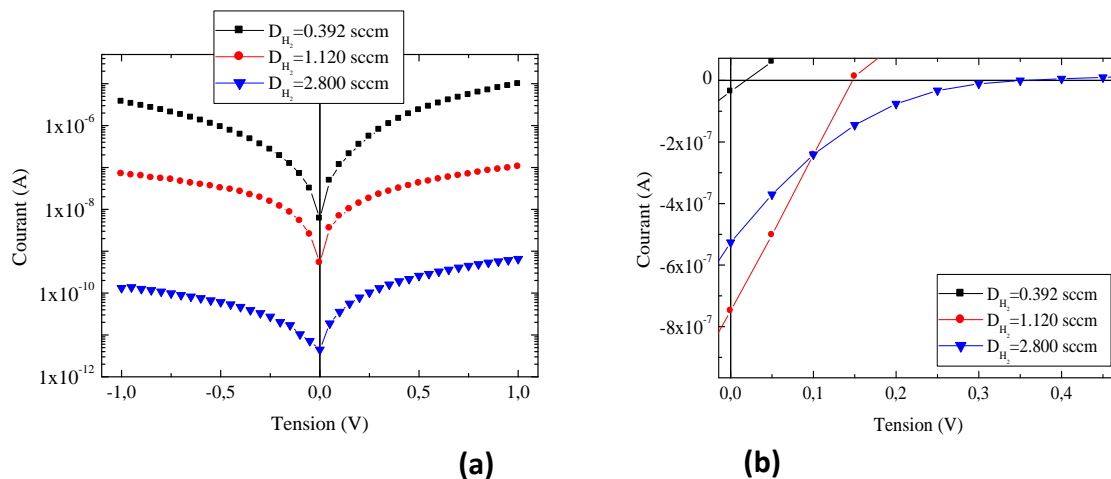


Fig.4 Les caractéristiques I-V sous obscurité **(a)** et sous lumière **(b)** à $T=40^\circ C$.

Les caractéristiques I-V de la **Fig. 4a)** montrent qu'une augmentation de D_{H_2} induit une diminution des courants direct et inverse.

Malgré leur faible redressement, les échantillons **aSiH1**, **aSiH3** et **aSiH5** se distinguent par une tension V_{OC} (**Fig.4b**), qui permet leur caractérisation par SPV. La technique SPV permet la détermination de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires (L_p), qui représente un paramètre important dans la conversion photovoltaïque. Dans le cas des films de a-Si:H non-dopés, ces couches sont des semiconducteurs légèrement de type N, il s'agit donc de mesurer la longueur de diffusion des trous.

Les mesures SPV ont été effectuées à des tensions V_{OCSPV} choisies telles que le domaine de longueur d'onde correspondant à ces valeurs de tensions soit le plus large possible tout en ayant des valeurs V_{oc} aussi mesurables et stables que possible. Les valeurs de ces dernières sont reportées dans le **Tableau 3**. Il est important de signaler que nous avons réussi à appliquer la SPV malgré des faibles tensions de V_{OCSPV} (de l'ordre de 10^{-5} V) et malgré la perturbation des mesures observée (**Fig.5**).

Tableau 3: Les tensions V_{OCSPV} choisis pour chaque échantillon.

Echantillons	D_{H_2} (sccm)	V_{OCSPV} (mV)
aSiH1	0,392	0,05
aSiH3	1,120	2
aSiH5	2,800	25

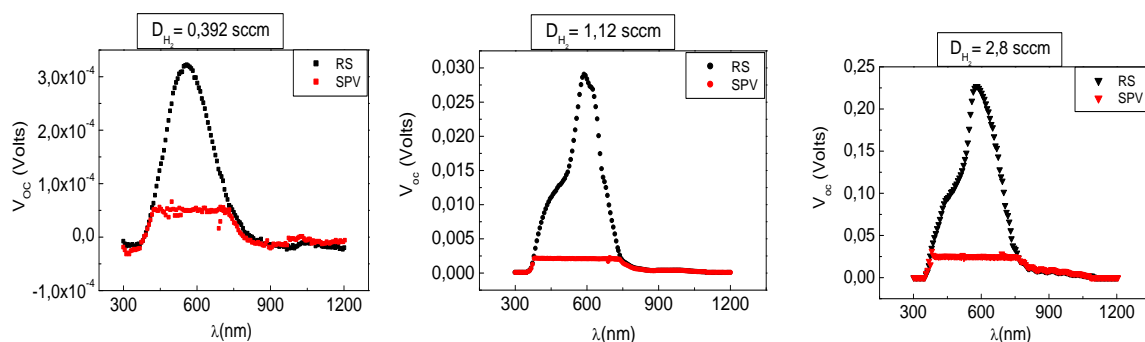


Fig.5: Les Réponses Spectrales en tension et la tension V_{OCSPV} choisis des jonctions présentent une tension de circuit ouvert.

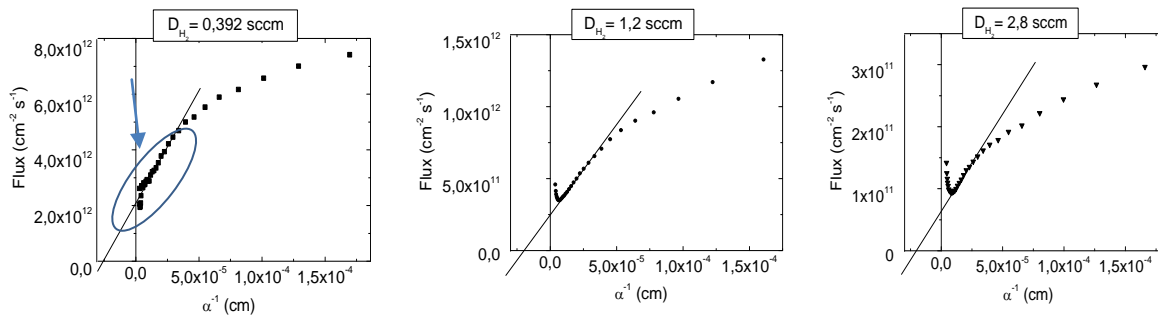


Fig.6 : Les courbes $\phi_{SPV}(1/\alpha)$ pour les échantillons déposés à différent débits d'hydrogène.

Rap

transmission optique. La variation du flux de photons (ϕ_{SPV}) en fonction de la profondeur de pénétration ($1/\alpha$), est présentée dans la **Fig.6** Nous pouvons observer que les deux échantillons déposés à des débits d'hydrogène de **1,2 et 2,8 sccm** présentent un domaine de linéarité qui permet par l'extrapolation de la courbe $\phi_{SPV}(\lambda)$ et $1/\alpha(\lambda)$ une estimation de L_p . Les longueurs de diffusions obtenues sont données dans le **tableau 4**, elles sont de même ordre que les longueurs de diffusion rencontrées dans la littérature, pour des films minces de a-Si:H élaborés par d'autres chercheurs [18, 25]. D'autre part ces mesures montrent que si la valeur de V_{oc} est trop faible (0,02V pour l'échantillon **aSiH1** ($D_{H_2}=0,392$ sccm)) la zone de linéarité est perturbée rendant la valeur de L_p moins précise (impossible). Nous pouvons néanmoins avoir une estimation de L_p de $0.25\mu m$.

Tableau 4: Les longueurs de diffusion apparentes (L_p) des échantillons déposés à différent débits d'hydrogène

Echantillons	D_{H_2} (sccm)	L_p (μm)
aSiH1	0,392	0.25
aSiH3	1,120	0,20
aSiH5	2,800	0,20

4. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons pu voir l'effet de l'augmentation du débit d'hydrogène sur les échantillons de a-Si :H préparés par pulvérisation cathodique de assistée d'un magnétron. Nous avons retrouvé les résultats déjà reportés dans la littérature concernant même d'autres techniques d'élaboration à savoir que l'augmentation du contenu en hydrogène conduit à une diminution de l'indice de réfraction et un élargissement du gap résultant de la compensation des liaisons pendantes, dans le matériau par l'hydrogène et sa relaxation provoquée par la réorganisation de la densité d'états aux voisinages des bords de bandes.

Les échantillons réalisés avec ces conditions de dépôt ont présenté des propriétés de photoconduction intéressantes qui s'améliore lorsque le contenu en hydrogène augmente.

Sur trois de ces échantillons des jonctions Schottky ont été réalisées, puis caractérisées.

Les mesures électriques I-V sous obscurité et sous éclairage ont indiqué qu'elles présentent un faible redressement et une tension de circuit ouvert V_{OC} mesurable. L'application de la technique SPV est conditionnée la sensibilité à la lumière des couches, par l'apparition de V_{OC} , de sa stabilité et de sa valeur, qui ne doit pas être inférieure à $\sim 0,3$ mV.

La validité de la SPV dépend de l'apparition de la zone de linéarité entre le flux de lumière incidente (ϕ_{SPV}) et la longueur de pénétration ($1/\alpha$) du faisceau incident. Ceci nous a permis d'obtenir des longueurs de diffusion de l'ordre de apparente (L_p) de $0.2\mu m$ du même ordre que ceux obtenus dans la littérature pour d'assez bons échantillons [18, 25].

5. REFERENCES

- [1] K. S. Karim, K. Sakariya, A. Nathan. Mat. Res. Soc, (2003), 762, A20. 4.
- [2] C.Hengst ,S.B.Menzel ,G.K.Rane ,V.Smirnov ,K.Wilken, B.Leszczynska, D.Fischer and N.Prager . Materials, (2017), 10(3), 245.
- [3] Z.Q.Li, X. D.Li, Q.Q.Liu, X.H.Chen, Z.Sun, C.Liu, X.J.Ye and S.M.Huang. IOP PUBLISHING, Nanotechnology, (2012), 23, 025402.
- [4] G.Yoo, H.Lee, D.Radtke, M.Stumpf, U. Zeitner, J.Kanicki. Microelectronic Engineering, (2010), 87, 83–87.

- [5] M.N. van den Donker, A. Gordijna , H. Stiebig, F. Finge , B. Rech , B. Stannowski, R. Bartlb , E.A.G. Hamers , R. Schlatmann , G.J. Jongerden. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, (2007), 91, 572–580.
- [6] N. Jensen, U. Rau, R.M. Hausner, S. Uppal, L.Oberbeck, R.B. Bergmann, J.H. Werner, *Journal of Applied Physics*,(2000), 87 (5), 2639–2645.
- [7] A. Kanevce, W.K. Metzger *Journal of Applied Physics*, (2009), 105 (9), 094507.
- [8] D. E. Carlson and C. R. Wronski. *Applied Physics Letters*, (1976), (vol. 28, no. 11), 671–673.
- [9] U. Kroll, C. Bucher, S. Benagli ,I.Schonbachler , J.Meier , A.Shah , J.Ballutaud ,A.Howling , Ch.Hollenstein , A.Buchel , M.Poppeller. High-efficiency p-i-n a-Si:H solar. (2004).
- [10] M. Fortes, A. Belfar, A.J. Garcia-Loureiro. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, (2016), Volume 127, Issue 20, 9464 – 9473.
- [11] Kwang Hoon Jung, Sun Jin Yun, Seong Hyun Lee, Yoo Jeong Lee, Kyu-Sung Lee, Jung Wook Lim, Kyoung-Bo Kim, Moojin Kim, R.E.I. Schropp. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2016), Volume 145, Part 3, 368 - 374.
- [12] Yoo Jeong Lee, Seung Hyun Lee, Ruud E.I. Schropp, Kyu-Sung Lee, Jung Wook Lim, Sun Jin Yun. *International Journal of Hydrogen Energy*, (2016), Volume 41, Issue 15, 6240-6246.
- [13] Jae-Seong Jeong, Yong-Huyn Kim, Chang-Kyun Park, Heon-Do Kim, Joongho Choi. *Microelectronics Reliability*, (2016), Volume 64, 640 – 645.
- [14] Jae-Seong Jeong, Yong-Hyun Kim, Chang-Kyun Park, Heon-Do Kim, Joongho Choi. *Microelectronics Reliability*, (2015), Volume 55, Issues 9–10, 1804-1810.
- [15] E. Herth, B. Legrand, L. Buchailot, N. Rolland, T. Lasri. *Microelectronics Reliability*, (2010), Volume 50, Issue 8, 1103–1106.
- [16] R. Gharbi , M. Abdelkrim, M. Fathallah, E. Tresso, S. Ferrero, C.F. Pirri, T. Mohamed Brahim. *Solid-State Electronics*, (2006), Volume 50, Issue 3, 367–371.
- [17] A. M. Goodman. *J. Appl. Phys*, (1961), 32, 2550-2552.
- [18] J. Dresner, D. J. Szostak, B. Goldstein. *Appl. Phys. Lett.* (1981), 38, 998-999.
- [19] J. Tauc. (1972). Ed. F. Abelès, North-Holland, Amsterdam.
- [20] M. H Brodsky, M. Cardona and J. J. Cuomo. *Phys. Rev. B*, (1977), Volume 16, Issue 8, 3556-3570.

- [21] E. Bertran, J.L. Andújar, A. Canillas, C. Roch, J. Serra, G. Sardin. (1991), Volume 205, Issue 2, 140-145
- [22] H. Chen, M. H. Gullanar, W. Z. Shen. (2004). Journal of Crystal Growth, Volume 260, Issues 1–2, 91–101
- [23] M. Yamaguchi, K. Morigaki. (1999). Philosophical Magazine Part B, Volume 79, Issue 3. 387-405
- [24] J. Ristein, G. Weiser. (1985). Solar Energy Mat, Volume 12, Issue 3, 221-232
- [25] N. Beldi, J. Sib, L. Chahed, T. Smaï'l, T. Mohammed-Brahim, Z. Djebbour, J.P. Kleider ,C. Longeaud, D. Mencaraglia. Journal of Non-Crystalline Solids, (1993), Volumes 164–166, Part 1. 309-312