

CRISTALLISATION DES COUCHES MINCES DE SILICIUM AMORPHE (a-Si) PAR LE LASER EXCIMÈRE KrF

F. BOUFELGHA^{A,B}, A. BOUAINE^A et L. AOMAR^C

^A Laboratoire d'Étude des Matériaux, Université de Jijel, Rue d'Aouled Aissa, 18000 Jijel

^B Unité de Développement des Technologies du Silicium (UDTS), Alger

^C Université de Ouargla

E-mail : boufelghalem@yahoo.fr

RÉSUMÉ : Le recuit par laser excimère KrF des couches minces de silicium amorphe (a-Si) est utilisé pour élaborer du silicium polycristallin en films minces. Les couches (a-Si) ont été déposées par la méthode LPCVD (*Low pressure Chemical Vapor Deposition*) sur du quartz amorphe et recouvertes par un film mince de SiO₂. Les échantillons ainsi préparés ont été irradiés par le laser excimère KrF, de densité d'énergie égale à 0,67 J/cm², pour différentes impulsions.

L'étude de la microstructure et l'état de surface ont été réalisés par le microscope électronique à balayage et par la spectroscopie micro-Raman. Les observations montrent que les impulsions laser successives entraînent des transformations microstructurales.

MOTS-CLÉS : laser excimère, polysilicium, silicium amorphe hydrogéné

I -Introduction

La température élevée des traitements thermiques classiques entraîne généralement des limitations lorsqu'on vise certaines applications comme la fabrication des dispositifs électroniques. Le recuit thermique s'effectue d'une façon collective. La possibilité d'utiliser un faisceau laser a été envisagé comme un moyen de chauffage local, en atmosphère ambiante, des petites surfaces pour réaliser des dopages dans le silicium ou recuire des couches de silicium perturbées. Les études se sont alors focalisées sur les applications des lasers dans le procédé d'épitaxie ou le recuit du silicium amorphe.

Après démonstration par Gat et al. [1] qu'un faisceau laser balayé pouvait augmenter substantiellement la taille des grains des couches minces de silicium polycristallin, on a assisté à un regain considérable pour la technologie Silicium Sur Isolant (SOI : Silicon On Insulator). Cette technologie a remplacé la technologie SOS (Silicon on Sapphire) qui est coûteuse et à faible mobilité de porteurs due à une mauvaise qualité cristalline. Cependant l'utilisation d'un tel substrat, amorphe et isolant, conduit à des mécanismes de cristallisation différents de ceux rencontrés dans le cas d'utilisation d'un substrat monocristallin.

Dans une première phase empirique, pratiquement tous les lasers (Rubis, YAG, CO₂ ...) ont été utilisés avec des densités de puissance de l'ordre du MW/cm² et des durées allant de quelques millisecondes à plusieurs dizaines de nanosecondes. Mais plusieurs études ont montré que la non uniformité de leur intensité spatiale conduit à des phénomènes indésirables, formation de mâcles, ségrégations anormales et autres.

De ce fait et depuis environ une dizaine d'années un intérêt particulier est porté sur l'utilisation du laser excimère (KrF, XeCl), pour cristalliser les couches minces de silicium amorphe (a-Si). Les lasers excimères sont des lasers impulsionsnels de grande puissance qui émettent dans l'ultraviolet, domaine de longueur d'onde où l'absorption du silicium est très forte. Ces lasers permettent de cristalliser très efficacement le

silicium amorphe pour former ainsi du silicium polycristallin qui est considéré comme un matériau très attrayant notamment dans le domaine de la photovoltaïque, cellules solaires [2-3], et les transistors en couches minces (TFT's) [4-9].

Ce travail porte sur l'étude par la diffraction des rayons X, le microscope électronique à balayage et de la spectroscopie micro-Raman de la cristallisation des couches minces de silicium amorphe non hydrogéné déposé sur un substrat quartz amorphe.

II – Expérimental

Les couches minces de silicium amorphe non hydrogéné ($\text{SiO}_2/\text{a-Si}/\text{quartz}$), d'épaisseur 2000Å, ont été déposées par LPCVD (Low pressure Chemical Vapor Deposition) sur un substrat de quartz. Puis, elles ont été recouvertes par un film mince de 900 Å d'oxyde de silicium SiO_2 obtenu par APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition).

Ensuite, ces couches ont été irradiées par le laser excimère KrF de longueur d'onde égale à 248 nm et d'une durée d'irradiation de l'ordre de 20 ns ($\lambda \approx 248$ nm, 20ns) et de densité d'énergie égale à 0.67 J/cm^2 et pour différentes impulsions : 1- 2- 10.

Les propriétés structurales telles que la taille des grains, les contraintes et la fraction (quantité) de matière cristallisée ont été évaluées par la spectroscopie micro-Raman qui fonctionne par un laser He-Ne de longueur d'onde égale à 632,8 nm et de 1 μm de diamètre.

En plus de la spectroscopie micro-Raman, la microscopie électronique à balayage a été utilisée pour étudier l'état de surface.

III- Résultats expérimentaux et discussion

La figure (1.a) représente le spectre micro-Raman d'un échantillon non hydrogéné et non irradié par le laser excimère KrF. La forme du spectre est une bosse à 473 cm^{-1} sont caractéristiques du silicium amorphe (a-Si) [5], sachant que la valeur théorique du pic du silicium amorphe se situe à 480 cm^{-1} et à 520 cm^{-1} pour le silicium monocristallin [5-14]. En irradiant cet échantillon avec une densité d'énergie de 0.67 J/cm^2 et avec un seul tir nous constatons d'après la figure (1.b) que la couche amorphe est totalement cristallisée. En effet la bosse à 473 cm^{-1} spécifique à l'amorphe a totalement disparu, et il y a apparition d'un pic à 516 cm^{-1} caractéristique du silicium polycristallin. En envoyant une deuxième impulsion laser, le pic se déplace à droite présentant un maximum à 517 cm^{-1} figure (1.c). Ceci traduit le fait que le deuxième tir laser induit une augmentation de la taille des grains du silicium polycristallin. Cependant nous constatons d'après la figure (1.d) qu'après 10 impulsions laser successives ce même pic se positionne à 515 cm^{-1} . Ceci signifie qu'il y a une diminution de la taille des grains. A notre connaissance ces transformations microstructurales n'ont pas été observées dans le cas où on fixe la densité d'énergie laser et on fait varier le nombre d'impulsions.

D'après des mesures de diffraction Raman, nos couches ne contiennent plus de phase amorphe après la cristallisation par recuit laser, puisque le pic à un nombre d'ondes de 480 cm^{-1} , encore visible pour des couches partiellement cristallisées n'apparaît plus. Comme on peut le voir sur la figure 1, le pic cristallin autour de 520 cm^{-1} est le seul observé, bien que toujours décalé d'environ 4,3 et 5 cm^{-1} respectivement vers des longueurs d'onde plus grande par rapport au silicium monocristallin. Ce décalage $\Delta\omega$ révèle un stress (contrainte) σ , qui est proportionnel [13].

$$\sigma (\text{GPa}) = -0.27 * \Delta\omega (\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

Avec l'équation (1) on obtient donc des contraintes positives, provenant de la densité du silicium cristallin.

La caractérisation par microscopie électronique à balayage de l'échantillon (a-Si : H/quartz) irradiés pendant 1 tirs est donné par la figure 2. La photo obtenue pour un seul tir montre l'état de surface qui est dégradé avec la présence de points évaporés (ablation laser).

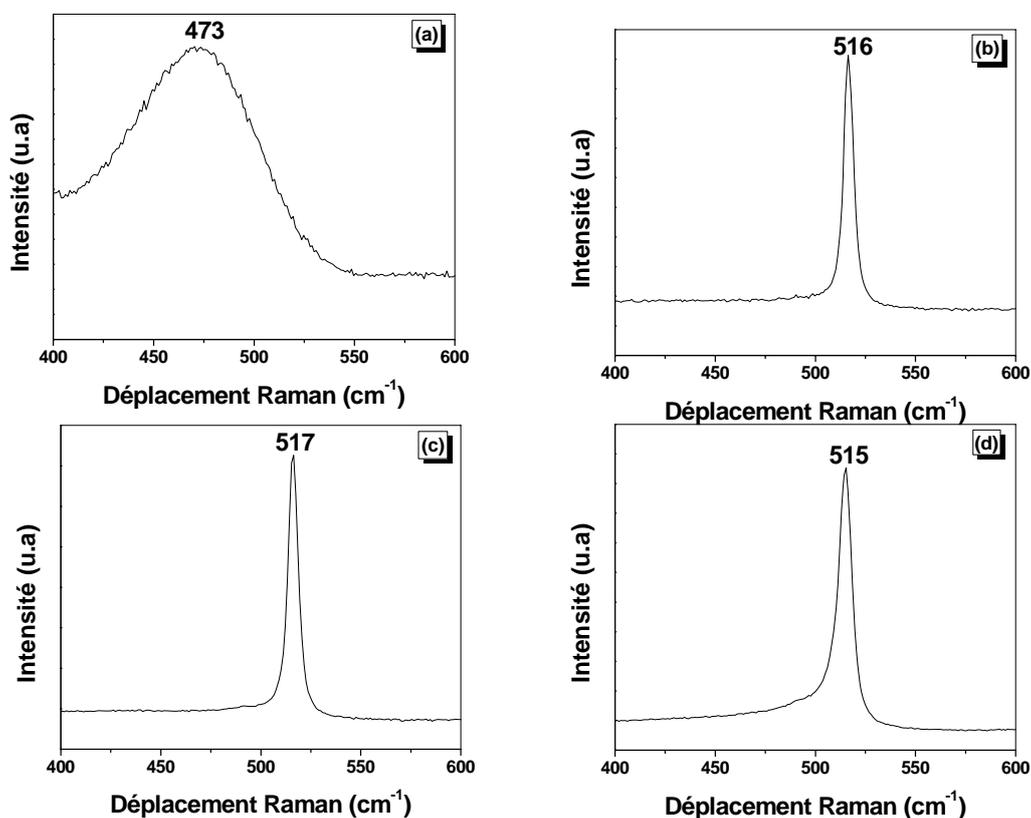


Fig.1- Spectres d'intensité micro-Raman du silicium amorphe non hydrogéné (SiO₂/a-Si/quartz) irradié avec une densité d'énergie laser $E_L=0.67 \text{ J/cm}^2$.

- a) a-Si sans irradiation laser. b) une impulsion.
 c) deux impulsions. d) dix impulsions.

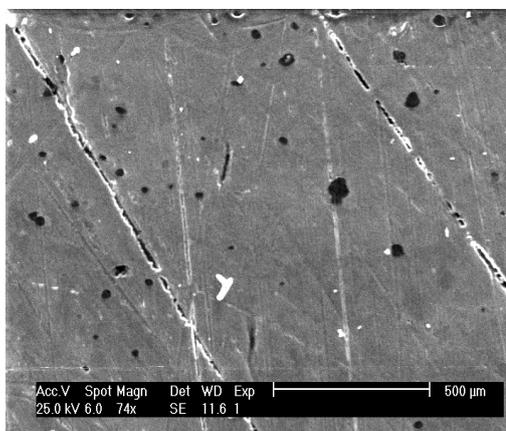


Fig.2- Images MEB avec $E_L=2.8 \text{ J/cm}^2$ de (a-Si : H/quartz) irradiées pendant un tir.

IV- Conclusion

Nous avons montré dans cette étude l'effet du nombre d'impulsions laser excimère KrF sur la cristallisation des couches minces de silicium amorphe non hydrogéné. Les phénomènes de cristallisation ont été étudiés par la spectroscopie micro-raman. L'analyse micro-raman a montré :

- Un tir : cristallisation totale de la couche avec diminution des contraintes.
- Deux tirs : cristallisation totale de la couche, diminution des contraintes et aussi de la largeur à mi-hauteur cela signifie que la taille des grains va augmenté.
- Dix tirs : augmentation de la largeur à mi-hauteur et la contrainte cela signifie une transformation microstructurales, passage d'un état cristallin de silicium à grains gros à un autre à grains très fin.

Références

- [1] A. Gat, L. Gerzberg, J. F. Gibbons, T. G. Magee and J. D. Hond, *Appl. Phys. Lett.*, 33 (1978) 775.
- [2] R.B. Bergman, *Appl. phys. A* 69, pp 187-194, (1999)
- [3] J. K. Rath, H. Meiling and R. E. I. Schropp, *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36*, pp 5436-5443, (1997)
- [4] M. Wu, K. Pangal, J. C. Sturm and S. Wagner, *Vol 75, No 15, Appl. phys. letters*, pp 2244-2246, (1999)
- [5] K. Shimizu, O. Sugiura and M. Matsumura, *Vol 40, No 1, IEEE*, pp 112-117,(1993)
- [6] A. Kohno, T. Sameshima, N. Sano, M. Sekiya and M. Hara, *Vol 42, No 2, IEEE*, pp 251-257, (1995)
- [7] A. Hara, and N. Sasaki, *IEEE*, pp 12.4.1-12.4.4, (1999)
- [8] R. Ishihara, P. C. van der Wilt, B. D. van Dijk, A. Burtsev, J. W. Metselaar and C. I. M. Beenakker, *Thin Solid Films* 427, ELSEVIER, pp77-85, (2003)
- [9] M. Lee, S. Moon and C. P. Grigoropoulos, *Vol 226*, pp 8-12, (2001)
- [10] A. Kailer, K. G. Nickel and Y. G. Gogotsi, *J. Raman Spectroscopy*, 30, pp 939-946, (1999)
- [11] A. Kailer, Y. G. Gogotsi and K. G. Nickel, *J. Appl. Phys*, Vol 81, No 7, pp 3057-3063, (1996)
- [12] V. Domnich and Y. Gogotsi, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 3, pp 1-36, (2002)
- [13] T. Inushima, N. Kusumoto, N. Kubo, H. Y. Zhang and S. Yamazaki, *J. Appl. Phys. Vol 79, No 12*, pp 9064-9073, (1996)
- [14] E. Fogarassy, S. de Unamuno, B. Prévot, T. Harrer and S. Maresch, *Thin Solid Films* 383, p. 48, (2001)
- [15] T. Pier, K. Kandoussi, C. Simon, N. Coulon, H. Lhermite, T. Mohammed-Brahim and J.F. Bergamini. *Thin Solid Films* 515, p 7585-7589 (2007)