

Caractérisation de jonctions ultra-minces réalisées par dopage laser

G. Kerrien, T. Sarnet, D. Débarre, M. Hernandez¹, D. Zahorski¹, J. Venturini¹,
C. Laviron², M.N. Semeria² et J. Boulmer

Institut d'Électronique Fondamentale, UMR 8622 du CNRS, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

¹ *SOPRA, 26 rue Pierre Joigneaux, 92270 Bois-Colombes, France*

² *CEA-DRT, LETI/DTS, 17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble cedex 9, France*

Résumé. Cette étude concerne les techniques de recuit laser (LTP) et de dopage laser direct (GILD) de jonctions ultra-minces, nécessaires à la fabrication des composants microélectroniques du futur (générations CMOS sub 0,1 µm). Des jonctions de 20 à 80 nm sont réalisées à l'aide d'un laser à excimères. Le procédé est suivi en temps réel grâce à l'analyse de la réflectivité transitoire à 675 nm. L'évolution de l'activation des dopants est ensuite caractérisée par spectroscopie IR (FTIR). Les résultats obtenus permettent de caractériser les jonctions en termes d'épaisseur dopées, concentration et résistivité. Une comparaison avec des caractérisations classiques (mesures électriques de résistivité, profils SIMS) permet de valider ces mesures et de mettre en évidence l'intérêt des techniques optiques pour la caractérisation in-situ et ex-situ des couches minces dopées réalisées par laser.

1. INTRODUCTION

Les techniques actuelles de dopage atteignent leurs limites pour la réalisation de jonctions ultra-minces (de l'ordre de 10 nm), fortement dopées (jusqu'à 10^{21} atomes/cm³) et à profil abrupt [1,2]. Les techniques de dopage laser offrent des solutions potentielles intéressantes [3-6]. On distingue deux types de dopage laser: le recuit laser (LTP pour Laser Thermal Processing) et le dopage laser direct (GILD pour Gas Immersion Laser Doping) [7-12]. En LTP, les dopants sont tout d'abord incorporés par implantation ionique avant le traitement laser. Le procédé GILD permet de se passer de la phase d'implantation ionique: les dopants sont chimisorbés sur la surface du silicium puis incorporés dans la couche fondue pendant le tir laser. Le traitement laser entraîne un cycle de fusion/solidification superficielle: pendant la période de solidification, le silicium fondu est épitaxié à partir du Si cristallin et les dopants sont placés en sites substitutionnels, avec des concentrations pouvant dépasser la solubilité limite, grâce à la vitesse élevée de solidification. De récentes publications ont démontré que les techniques LTP et GILD peuvent servir à réaliser des couches fortement dopées (jusqu'à 3×10^{21} cm⁻³), avec des épaisseurs de l'ordre de 10 nm et des résistivités superficielles de l'ordre de 20 à 200 Ω/□ [13].

Notre attention s'est portée plus particulièrement sur deux techniques optiques de caractérisation nous permettant d'évaluer, sans aucun contact avec la surface, l'activation électrique, l'épaisseur dopée ainsi que la concentration en dopants des couches réalisées par dopage laser.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le traitement laser (LTP et GILD) est réalisé dans une enceinte à vide ($\approx 10^{-7}$ mbar) avec un laser à excimères de type XeCl (308 nm, 25ns, 200 mJ / tir), dont l'uniformité et la densité d'énergie sont contrôlés tir à tir. Dans le cas du GILD, le gaz précurseur, contenant les dopants (BCl₃), est apporté directement sur la surface de l'échantillon. Les caractéristiques des substrats de silicium utilisés pour ces expériences sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1: Echantillons utilisés dans les expériences GILD et LTP

échantillon	GILD	LTP - B5	LTP- B3	LTP - BF2	LTP - GeB
substrat Si(100)	type n 1-20 Ω .cm	type p 7-10 Ω .cm	type p 7-10 Ω .cm	type n 3-6 Ω .cm	type p 7-10 Ω .cm
pré-amorphisation	-	-	-	-	Ge+ à 5keV 2×10^{15} /cm ²
ion, énergie d'implantation	-	B ⁺ , 5 keV	B ⁺ , 3 keV	BF ₂ ⁺ , 5 keV	B ⁺ , 3 keV
dose implantée	-	5×10^{15} / cm ²	2×10^{15} / cm ²	2×10^{15} / cm ²	2×10^{15} / cm ²
nombre de tirs laser	1 à 200	1 à 5	1	1	1

La mesure de réflectivité transitoire en incidence normale à $\lambda = 675$ nm permet d'obtenir les données principales du cycle de fusion/solidification induit par le laser. Le seuil de fusion/solidification est obtenu directement, grâce au changement d'indice de réfraction lors de la transition solide-liquide. De plus, l'épaisseur de la jonction peut être évaluée grâce à une modélisation de la réflectivité prenant en compte la modification d'indice due à l'activation du Bore dans la couche dopée, au-dessus du substrat de Si. Avant et après le traitement laser, des mesures de transmission et réflexion en incidence normale dans la gamme spectrale de 2 à 20 μ m sont obtenues par spectroscopie FTIR, la résistivité superficielle est mesurée par la méthode des 4 pointes et les profils de concentration en dopants analysés par SIMS au CEA/LETI.

3. DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DOPEE A PARTIR DE LA REFLECTIVITE TRANSITOIRE

La couche activée électriquement est égale à l'épaisseur fondue car, dans le dopage laser, la diffusion des dopants se fait exclusivement en phase liquide et la profondeur fondue peut être assimilée à la profondeur dopée. La durée de fusion, mesurée par réflectivité transitoire, peut être corrélée à la profondeur fondue pour chaque impulsion laser.

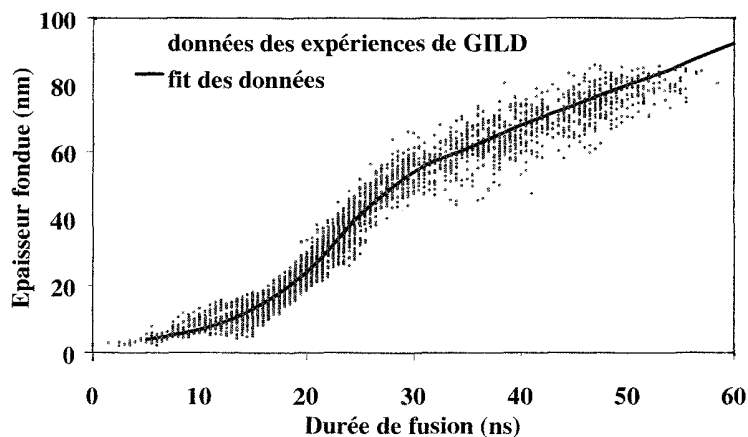


Figure 1: Profondeur fondue obtenue par GILD en fonction de la durée de fusion, déduite des mesures de réflectivité transitoire à 675 nm, pour des séries de tirs entre 1 et 200 tirs, pour des densités d'énergie comprises entre 0,6 J/cm² (seuil de fusion) à 0,9 J/cm² (valeurs maximales de durée de fusion), des couches dopées de 5 à 90 nm d'épaisseurs et des concentrations en B jusqu'à 3×10^{21} cm⁻³.

Cette corrélation est plus facilement démontrée dans le cas du GILD car la concentration en bore augmente de façon continue avec le nombre de tirs laser [13]. Cette évaluation est basée sur la modification de l'indice de réfraction de la couche dopée, due à l'incorporation et à l'activation du bore, selon la théorie de Drude [14]. Cette modification de l'indice entraîne un changement de la réflectivité à 675 nm, qui est mesurée in-situ pour chaque tir laser. Pour les calculs, nous pouvons assimiler la couche dopée à une couche de concentration constante et d'épaisseur égale à la profondeur fondue, sur un substrat de silicium pur. La figure 1 montre l'évolution de la profondeur fondue en fonction de la durée de fusion. Le "fit" des valeurs expérimentales a été utilisé pour estimer la profondeur fondue dans les autres expériences de LTP et GILD. La figure 2 montre que la profondeur fondue, obtenue à partir des mesures de réflectivité, est en accord avec les profondeurs mesurées par SIMS.

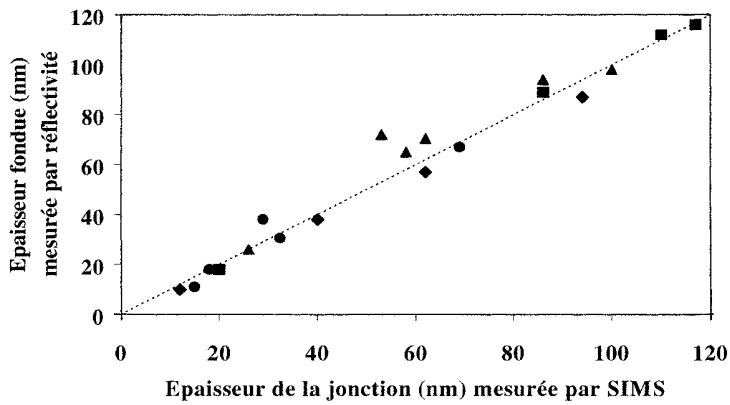


Figure 2: Comparaison entre la profondeur fondue obtenue à partir des mesures in-situ de réflectivité transitoire à 675 nm et la profondeur mesurée par SIMS (à 10^{19} cm⁻³), pour 4 types d'échantillons (cf. table 1): GILD (•), LTP-B5 (▲), LTP-BF2 (●), LTP-GeB (◊).

4. DETERMINATION DE LA DOSE ACTIVEE ET DE LA RESISTIVITE A PARTIR DES MESURES IR

Nous avons mesuré la transmission et la réflectivité en IR dans la bande spectrale de 2 à 20 μ m, à l'aide d'un spectromètre FTIR. Selon la théorie de Drude, ces spectres dépendent de l'épaisseur de la couche dopée, du rapport entre dose activée N et masse effective des porteurs libres m_{eff} , de la fréquence de collision ν , et de la mobilité des porteurs μ . Les simulations numériques ont été ajustées aux spectres expérimentaux, en prenant une masse effective de 0,26 [15], et un profil de concentration en dopants activés carré. Nous avons extrait, pour chaque condition expérimentale, la dose N de dopants activés, la fréquence ν et la mobilité μ .

La résistance superficielle est alors donnée par:

$$R_s = 1/(N.e. \mu), \text{ avec } e \text{ charge de l'électron.}$$

La résistance superficielle obtenue d'après les mesures IR, est très proche des valeurs mesurées électriquement (figure 3). Il serait toutefois possible d'améliorer la dispersion des mesures en tenant compte, dans la simulation, de l'amorphisation partielle de la couche superficielle avant le recuit laser, ainsi que des profils réels de concentration.

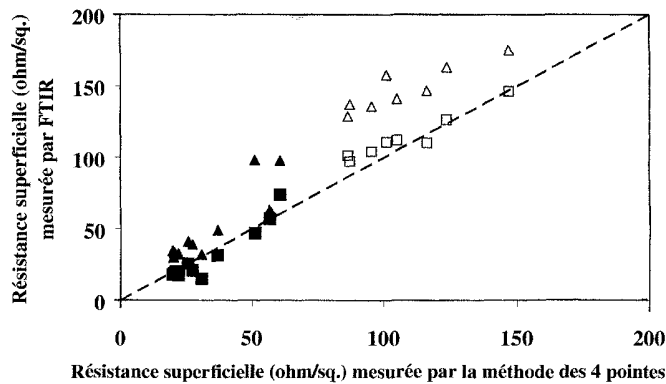


Figure 3: Mesure par réflexion IR (■) et transmission IR (△) de la résistance superficielle en fonction des valeurs de résistance 4 points, échantillon LRP-B3 (■, un tir laser) et GILD (△, 200 tirs).

5. CONCLUSION

Cette étude confirme l'efficacité du procédé laser pour la réalisation de jonctions ultra-minces et fortement dopées (jusqu'à 10 nm, $R < 50 \Omega/\square$). Les principales propriétés de ces jonctions (épaisseur, dose activée, résistance superficielle) peuvent être évaluées optiquement. Ces techniques optiques ont été comparées avec succès à des analyses SIMS et à des mesures électriques de résistance superficielle, démontrant ainsi leur efficacité pour le contrôle de procédé de dopage laser. Ce travail est soutenu par un programme RMNT, dans le cadre du projet DOLAMI.

Références

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://public.itrs.net>
- [2] E. C. Jones, E. Ishida, Mat. Sci. Eng. R24 (1998) 1.
- [3] T. Noguchi, M. Kubota, H. Yamamoto, K. Matsumoto, M. Yamagishi, Tech. Report of IEICE. ED2000-45, SDM2000-45 (2000) 7.
- [4] B. Yu, Y. Wang, Q. Xiang, C. Riccobene, S. Talwar, M. R. Lin, IEDM'99 proceedings (1999) 510.
- [5] K.I. Goto, T. Yamamoto, M. Kose, Y. Wang, T. Lin, S. Talwar, T. Sugii, IEDM'99 proceedings (1999) 931.
- [6] G. Fortunato, L. Mariucci, M. Stanizzi, V. Privitera, S. Whelan, C. Spinella, G. Mannino, M. Italia, C. Bongiorno, A. Mittiga. Nuc. Inst. and Meth. In Phys. Res. B 186 (2002) p.401-408.
- [7] F. Foulon in : I. W. Boyd, R. B. Jackman (Eds.), Photochemical Processing of Electronic Materials, Academic Press, 1992, pp. 257-294.
- [8] I. W. Boyd in : D. J. Ehrlich, J. Y. Tsao (Eds), Laser Microfabrication, Academic Press, 1989, p. 539
- [9] P. G. Carey, K. Bezjian, T. W. Sigmon, P. Gildea, T. J. Magee, IEEE EDL7 (1986) 440.
- [10] F. Foulon, A. Slaoui, P. Siffert, Appl. Surf. Science 43 (1989) 333.
- [11] M. Hernandez, D. Zahorski, J. Boulmer, D. Débarre, G. Kerrien, T. Sarnet, C. Laviron, M.N. Semeria, D. Camel, J. L. Santailier, EMRS 2002 Spring Meeting, Symposium D, ref D/PI.05.
- [12] C. Laviron, M.N. Semeria, D. Zahorski, M. Stehlé, M. Hernandez, J. Boulmer, D. Débarre, G. Kerrien, International Workshop on Junction Technologies, Tokyo, Japan, p. 6-1-1, (2001).
- [13] G. Kerrien, J. Boulmer, D. Débarre, D. Bouchier, A. Grouillet., D. Lenoble, Appl. Surf. Sci. 186 (2002) 45.
- [14] F. Abeles, Optical properties of Solids, p. 84, North Holland, 1972.
- [15] P. Boher, M. Bucchia, J.-P. Piel, C. Defranoux, J.-L. Stehlé, C. Pickering, Proceedings of SPIE, 4449 (2001) 69.