

Mesure de contraintes et déformations sur lignes de silicium contraintes

A Béch \acute{e} ^{a,*}, J L Rouvi \acute{e} re^a, J C Barb \acute{e} ^b, F Andrieu^b, J Eymery^c, M Mermoux^d,
D Rouchon^d

^a SP2M/LEMMA, CEA Grenoble, GEM Minattech, 17 rue des Martyrs, 38052 Grenoble Cedex 9, France

^b LETI, CEA Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38052 Grenoble Cedex 9, France

^c SP2M/NPSC, CEA Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38052 Grenoble Cedex 9, France

^d LEPMI, 1130 rue de la Piscine, BP 75, 38402 S^t Martin d'H \acute{e} res Cedex

Résumé – De part leurs propriétés intéressantes en termes de mobilités de porteurs, les lignes de silicium contraintes peuvent servir de canal dans les transistors. Des méthodes de caractérisations sont nécessaires dans ce type d'applications pour mesurer les contraintes et déformations résiduelles dans les dispositifs. La méthode des Moirés en microscopie électronique en transmission (TEM), la spectroscopie Raman et la diffraction par rayons X sont étudiées ici pour quantifier ces contraintes. Le phénomène de relaxation des contraintes dans les lames minces TEM a été pris en compte à l'aide de simulations par éléments finis. Les résultats très proches entre simulations et expériences ont permis de valider notre approche de mesure de déformations.

1. Introduction

La réduction des composants en micro électronique [1] rend très attractifs les matériaux dont les capacités de transports sont améliorés. Il a été récemment démontré [2, 3] que la mobilité des porteurs était nettement améliorée dans le cas de couches de silicium contraintes.

Nous montrons ici que la mesure de contraintes résiduelles dans les dispositifs silicium contraints sur isolant (sSOI) peut être réalisée à l'aide du TEM. En utilisant la méthode des Moirés, il a été possible de mesurer directement les déformations dans des lignes contraintes de 1 μ m de largeur. Les relaxations supplémentaires induites par la réalisation d'échantillon TEM ont été prises en compte par des simulations éléments finis. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par spectroscopie Raman et diffraction X.

2. Données expérimentales

La réalisation de lignes de silicium de largeur 1 μ m se déroule en plusieurs étapes de collage-gravure. Le processus peut induire des désorientations entre lignes et substrat et amène à décrire deux référentiels (figure 1.a) liés aux axes cristallographiques, dans le substrat d'une part (\mathcal{R}_S) et dans les lignes d'autres part (\mathcal{R}_L).

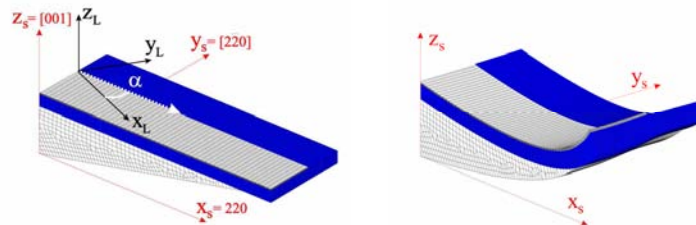


Figure 1 – 1.a : Position des référentiels sur la lame mince avant relaxation. 1.b : Lame mince TEM déformée (facteur d'amplification de 30).

3. Relaxation de lame TEM et éléments finis

La réduction de l'épaisseur de l'échantillon afin de le rendre transparent aux électrons induit un phénomène de relaxation de contraintes qui se traduit par la courbure de l'échantillon. Afin de pouvoir remonter à la contrainte avant relaxation, des simulations par éléments finis (code Castem) ont été nécessaires.

Le champ de distorsion \mathcal{D} fournis par le programme en fin de calcul permet de calculer les vecteurs d'ondes \mathbf{g}_L dans la ligne et \mathbf{g}_S dans le substrat à l'aide des vecteurs du réseau cristallin $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$. \mathbf{g}_L et \mathbf{g}_S permettront de calculer le vecteur d'onde des moirés \mathbf{g}_M .

$$\mathbf{g} = \left[((Id + \mathcal{D})[\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}])^t \right]^{-1} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \quad (1)$$

Comme on peut le voir dans la figure 1.b, la relaxation de la lame TEM est un cas 3D. Cependant, il est possible de se placer dans une hypothèse 2D pour des épaisseurs de substrat suffisantes, typiquement supérieur à 200 nm.

* Auteur à contacter : armand.beche@cea.fr – Tel : 04.38.78.19.26

4. Mesure de la période des franges de Moiré

Les franges de moirés apparaissent par double diffraction entre les ondes provenant du substrat et des lignes contraintes et sont simplement décrites par la relation (2) [4]. En prenant en compte la désorientation α introduite par le procédé de réalisation, la norme du vecteur d'onde des moirés \mathbf{g}_M dans la direction $[2\bar{2}0]$ s'écrit:

$$\mathbf{g}_M = \mathbf{g}_L - \mathbf{g}_S, \text{ soit, en prenant la norme: } g_M = \left[g_L^2 + g_S^2 - 2g_L g_S \cos \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Des zones particulières ont été examinées sur les échantillons TEM de façon à pouvoir les simuler par éléments finis (figure 2.a). Les franges de moirés dans la direction $[2\bar{2}0]$ ont été mesurées à l'aide de la méthode des phases géométriques [5, 6] qui permet d'afficher des images dont chaque pixel représente une valeur de la période des franges de moiré (figure 2.b).

La comparaison entre simulations et expériences permet de remonter à une contrainte dans les lignes comprise entre 1,1 et 1,46 GPa, donnant une moyenne de 1,3 GPa avec une précision de $\pm 10\%$ (figure 2.c).

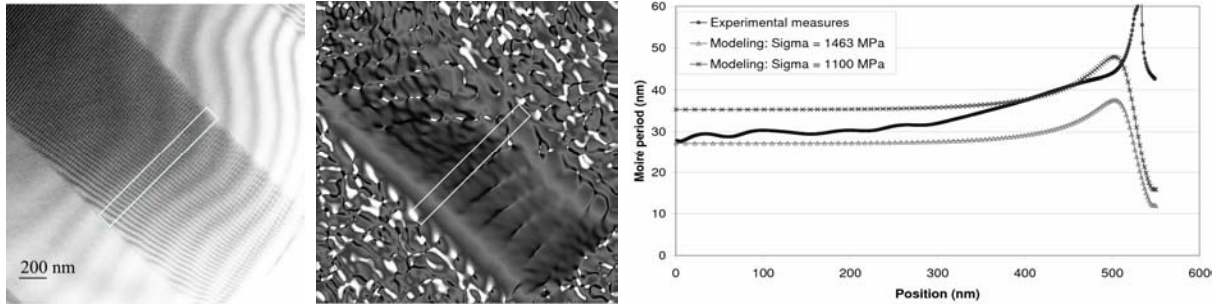


Figure 2 – 2.a : Images des moirés sur une ligne. 2.b : Représentation de la période des moirés d'après l'image 2.a par la méthode GPA. 2.c : Graphe des contraintes dans la ligne.

5. Mesure par spectroscopie Raman

La taille de la sonde Raman mesurant environ 800 nm de diamètre, les résultats obtenus par cette méthode donnent une valeur moyenne de la contrainte et ne permettent pas de mettre en évidence les relaxations en bord de ligne. La profondeur de pénétration du laser dans le silicium est d'environ 15 nm, ce qui correspond exactement à l'épaisseur de la ligne contrainte. La différence de fréquence $\Delta\omega$ entre le substrat et la ligne permet de remonter à la contrainte dans le matériau. En réalisant une série de point perpendiculairement à la ligne, il a été possible de mesurer une contrainte moyenne de 1,3 GPa.

6. Mesure par diffraction X

Les mesures par diffraction X ont été menées sur des échantillons non gravé, ce qui ne fournit des informations comparables qu'avec les zones centrales non relaxées des lignes pour les échantillons Raman et TEM. Ces mesures ont aussi permis de quantifier la désorientation entre lignes et substrat. Les mesures sont assez dispersées en termes de mesure de contrainte, allant de 1.6 GPa à 1.3 GPa selon les zones.

7. Conclusion

Les trois méthodes présentées sont en accord sur la mesure de contraintes mais ne tombent pas juste sur la valeur théorique de la contrainte dans les lignes (1,46 GPa). Deux hypothèses à évaluer dans de futurs travaux peuvent expliquer ce phénomène : (i) La couche d'oxyde de silicium n'est pas totalement relaxée. (ii) Il y a relaxation des contraintes dans la couche de silicium contraint lors des opérations de collage.

Les comparaisons avec les mesures Raman et diffraction X ont montré que la méthode des moiré est relativement puissante et fiable pour la mesure des contraintes et déformations. Pour l'industrie micro-électronique, ces trois méthodes ne sont pourtant pas assez précises pour caractériser des composants uniques. Mais, combinées, elles fournissent des résultats très complets pour la compréhension du fonctionnement de ces structures.

8. Références

- [1] <http://public.itrs.net>
- [2] F. Andrieu, Microelectronics engineering, 2007.
- [3] F. Andrieu, VLSI, 134-135, 2006.
- [4] D. B. Williams, C. B. Carter. Transmission electron microscopy. Plenum Press, 1996.
- [5] E. Sarigiannidou, J. L. Rouvière. Ultramicroscopy, **106**:1-17, 2005.
- [6] M. J. Hÿtch, E. Snoeck and R. Kilaas, Ultramicroscopy, Volume **74**: 131-146, 1998.