

Formation de Nanocristaux de Ge sur SiO₂ par démoillage : application à des mémoires non volatiles.

P. D. Szkutnik^{a,*}, A. Karmous^a, A. Ronda^a, I. Berbezier^a, A. Sgarlata^b, A. Balzarotti^b,
N. Nunzio^c, K. Gacem^d, A. El Hdiy^d et M. Troyon^d

^a L2MP – CNRS UMR 6137, Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme, Avenue Escadrille Normandie Niemen - Case 142, 13397 Marseille Cedex 20, France

^b Università degli studi di Roma 'Tor Vergata', Dipartimento di Fisica, Via delle ricerca scientifica 1, 00133 Roma – Italia

^c Queensland University of Technology – GPO BOX 2434 Brisbane 4001 - Australia

^d Laboratoire de Microscopies et d'Etude de Nanostructures (EA 3799), Bât. 6, case n°30, UFR Sciences, Université de Reims, 51687 Reims cedex 2, France

Résumé – Le phénomène de démoillage entre une couche de Ge déposée par épitaxie par jet moléculaire et un substrat de SiO₂ est utilisé pour obtenir des boîtes quantiques et permettre la réalisation de mémoires à nanocristaux. Nos études, par microscopie électronique, montrent que le diamètre (et la densité) des gouttes dépendent directement de l'épaisseur de la couche de Ge déposée, de façon linéaire, par $\varnothing=7 \times e$. De plus, une structuration préalable de la surface, par un réseau de trous, conduit à une auto-organisation de ces dernières. Enfin, des mesures électriques révèlent un effet tunnel résonnant attribué à l'effet de confinement pour les boîtes les plus petites (4 nm de diamètre).

1. Introduction

La réalisation de nouveaux composants à base de semi-conducteurs tels que les mémoires à un seul électron nécessite un fort confinement quantique à température ambiante. Différentes études montrent que l'hétéroépitaxie de Ge/Si [1] aboutit à la formation de boîtes quantiques qui peuvent être ordonnées par la structuration préalable de la surface [2]. Toutefois, dans la conception de transistors, l'étape précédente d'oxydation génère un oxyde tunnel de plus ou bonne qualité et d'une épaisseur plus ou moins contrôlée. C'est pourquoi, nos études portent sur ce nouvel axe d'investigation, l'étude de la formation de nanocristaux de Ge directement sur une couche de SiO₂ d'épaisseur définie. Dans le cas du système Si/SiO₂ [3, 4] le phénomène de démoillage explique la formation de nanocristaux de Si.

2. Résultats

Sur une couche de 5 nm d'épaisseur de SiO₂ réalisée sur un substrat Si(100), le Ge est déposé par épitaxie par jet moléculaire sous un vide de 10⁻¹¹ mbar à température ambiante formant une couche amorphe d'épaisseur e . Des couches de différentes épaisseurs e ont été réalisées : 0.5 nm < e < 10 nm. Suite au recuit de 30 min à 700°C, le phénomène de démoillage opère complètement donnant lieu à la formation de nanocristaux de Ge.

La microscopie électronique en transmission renseigne sur la morphologie des plus gros nanocristaux obtenus pour $e > 1.5$ nm. A l'aide de vues en coupe transverse, les nanocristaux présentent un angle de mouillage constant : $\theta = 54^\circ$, ainsi qu'un aspect ratio (hauteur /diamètre) constant, 0.8, pour les différentes épaisseurs. Nous concluons que le système a donc adopté une phase stable. Grace aux vues planes, des distributions de tailles ont été établies et montrent que le diamètre des nanocristaux suit une loi linéaire en fonction de l'épaisseur : $\varnothing=7 \times e$. Cette même relation est démontrée en se basant sur une théorie de conservation de la masse de Ge déposée. Considérant alors les nanocristaux comme des sphères tronquées, une densité théorique est calculée qui s'avère être en bon accord avec celle déterminée expérimentalement. A partir de ces lois, le diamètre et la densité des nanocristaux résultant du démoillage de couches d'épaisseur plus fine ($e = 0.5$ nm) ont été déduits et annoncent une densité de 1.7×10^{12} cm⁻² et un diamètre moyen de ~ 4 nm confirmé par des clichés en haute résolution.

Afin d'ordonner les nanocristaux de Ge et par conséquent réduire leur dispersion de tailles, des expériences de démoillage ont été réalisées avec des couches de SiO₂ arborant un réseau de trous réguliers. Pour des épaisseurs identiques de Ge déposée, les images de microscopie à force atomique montrent un arrangement régulier des îlots, en accord avec le réseau de trous pré-établis, sur une surface structurée par rapport à une surface non structurée.

Enfin, pour tester les performances des nanocristaux de Ge dans le cadre de mémoires non volatiles, des nanocristaux de diamètre variant de 4 à 40 nm ont été élaborés puis recouvert d'une couche de Si amorphe de 18 nm d'épaisseur. Des mesures I(V) et C(V) de ces échantillons présentent un effet de tunnel résonnant seulement pour les nanocristaux possédant un diamètre moyen de 4 nm et une densité de 1.7×10^{12} cm⁻². Le nombre effectif d'électrons inclus dans ce procédé a été estimé entre 3 et 15.

* Auteur à contacter : pierre.szcutnik@l2mp.fr – Tel : 04 91 28 91 64

3. Conclusion

La taille et la densité de nanocristaux de Ge formés sur une couche de SiO₂, résultant d'un phénomène de démouillage, est contrôlée par le biais de l'épaisseur de la couche amorphe de Ge déposée. Des nanocristaux de 4 nm de diamètre moyen avec une densité de $1.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ont ainsi été élaborés et présentent un effet de tunnel résonnant lors de mesures électriques.

4. Références

- [1] F. Patella, A. Sgarlata, F. Arciprete, S. Nufri, P. D. Szkutnik, E. Placidi, M. Fanfoni, N. Motta et A. Balzarotti, *Self-assembly of InAs and Si/Ge quantum-dots on structured surfaces*, J. of Phys. : Cond. Mat. **16** (2004) S1503R
- [2] P. D. Szkutnik, A. Sgarlata, S. Nufri, N. Motta et A. Balzarotti, *Real-time scanning tunneling microscopy observation of the evolution of Ge quantum dots on nanopatterned Si(001) surfaces*, Phys. Rev. B **69** (2004) R201309
- [3] B. Legrand, V. Agache, T. Mélin, J. P. Nys, V. Senez et D. Stiévenard, Thermally assisted formation of silicon islands on a silicon-on-insulator substrate, J. of App. Phys. **91** (2002) 106
- [4] David T. Danielson, Daniel K. Sparacin, Jurgen Michel et Lionel C. Kimerling, *Surface-energy-driven dewetting theory of silicon-on-insulator agglomeration*, J. of App. Phys. **100** (2006) 83507