

TP d'initiation à la lithographie AFM : application à la fabrication de résistance à partir de nano-ruban de silicium amorphe

Laurent Pichon, Régis Rogel, Hervé Lhermite

Groupe Microélectronique, IETR, UMR CNRS 6164,
campus de beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

Résumé

Cet article présente des travaux pratiques sur la réalisation et la caractérisation électrique de résistance fabriquée à partir de nano-ruban de silicium amorphe obtenu par lithographie AFM. La résistance est fabriquée en salle blanche puis caractérisée électriquement par mesures I-V.

Mots clés : lithographie AFM, oxydation locale, nano-ruban, silicium amorphe, résistance

I. Introduction

Face au besoin croissant en termes de performances des circuits électroniques, la miniaturisation des composants électroniques, liées au rythme d'intégration indiqué par l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors), conduit à d'autres approches architecturales des composants à l'échelle du nanomètre. Aussi, l'élaboration de nano-objets à base de silicium comme éléments de base de ces composants devient incontournable. Dans une approche dite « Top down » ceci implique la mise en place de technologies de fabrication toujours de plus en plus sophistiquées, comme par exemple le microscope à force atomique utilisé comme outil de lithographie dans le TP présenté.

Cette proposition de TP peut être un complément aux formations sur les « Nanotechnologies » dispensées dans les masters ou filières d'écoles d'ingénieurs relevant des nanosciences. Aussi les points forts du programme pédagogique abordé au cours de ce stage pratique concernent les technologies de fabrication (photolithographies UV, gravure plasma,...) et les moyens de caractérisation structurale (microscopies AFM-Atomic Force Microscopy) entrant dans la fabrication de dispositifs nanoélectroniques en technologies silicium intégrée.

L'objectif de cette formation est double, d'une part sensibiliser les étudiants au travail en salle blanche, et d'autre part les initier à la manipulation d'un outil de caractérisation structurale et de lithographie très sophistiqué tel que le microscope à force atomique ainsi qu'à ses applications potentielles dans la réalisation et l'observation d'objets nanométriques.

La proposition de TP est prévue pour se dérouler sur 2,5 jours dans la salle blanche de la centrale de technologies du Groupe Microélectronique de l'Institut d'Electronique et des Télécommunications de Rennes (GM-IETR-UMR 6164). De plus, le travail demandé s'inscrit pleinement dans le cadre des activités de recherche du GM-IETR concernant la réalisation et la caractérisation électrique de microdispositifs électroniques en couches minces de silicium (poly- micro- ou nano-texturé). Ceci constitue un plus dans la formation d'étudiants se destinant à la recherche.

II Contenu du TP

1) Lithographie AFM : principe

La réalisation de motifs d'oxyde nanométriques sur les substrats de silicium de textures différentes utilise une technique mise au point dans les années 90 [1]. Cette technique a pour finalité la réalisation de motifs d'oxyde par oxydation locale du silicium utilisant un procédé d'anodisation de surface à l'aide de la sonde du microscope AFM.

Une tension de polarisation négative de la sonde par rapport à la surface du substrat favorise la réaction du silicium avec l'oxygène de molécules d'eau adsorbées en surface donnant naissance à un oxyde de silicium lors du passage de la pointe (fig. 1). La définition (épaisseur et largeur) du motif de l'oxyde ainsi formé dépend à la fois du taux d'humidité ambiant, de la tension de polarisation de la pointe, et de la vitesse de déplacement de celle-ci. [2]. Cette technologie peut être une alternative à celles utilisées (UV lointains, e-beam) pour l'écriture de motifs nanométriques. Elle a en particulier permis la fabrication de nano objets tels que des nanofils en Si-mono [3] en utilisant l'oxyde ainsi réalisé comme masque de gravure ; de tels nanofils pouvant servir de zone de canal pour des nanotransistors [4].

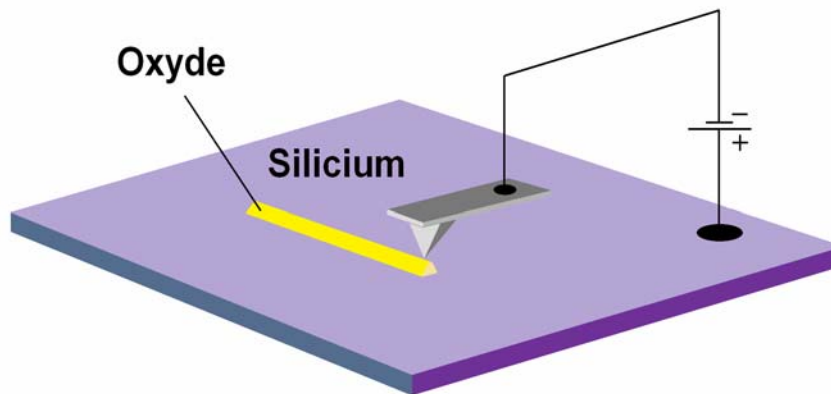


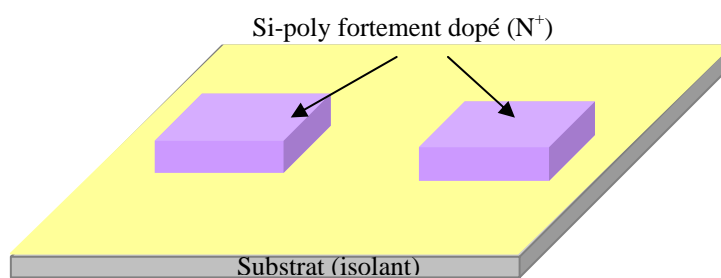
Figure 1 : Oxydation locale du silicium par AFM

Une première partie du TP est consacrée à la prise en mains du microscope AFM, à des essais de lithographie sur des substrats à base de silicium (monocristallin ou amorphe) puis à l'observation (mesures des dimensions) et l'optimisation des motifs d'oxydes réalisés.

2) Procédé de fabrication de la résistance

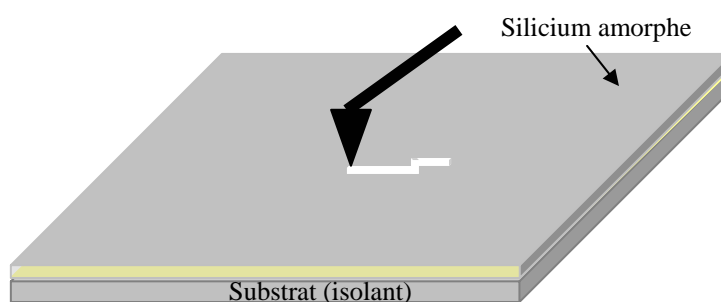
Les résistances sont fabriquées à partir de substrat (verre ou de silicium monocristallin) recouvert d'un oxyde de protection préalablement déposé par procédé de décomposition chimique en phase vapeur à pression atmosphérique, procédé APCVD (Atmospheric Chemical Vapor Deposition). Une couche mince de silicium polycristallin fortement dopé *in-situ* (dopage de type N à partir de la phosphine-PH₃), de 200 nm d'épaisseur, est ensuite déposée par procédé CVD à basse pression (LPCVD – Low Pressure CVD). La concentration en phosphore est $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Cette couche de silicium polycristallin est préalablement déposée au laboratoire avant l'intervention des étudiants. Le silicium est d'abord déposé en phase amorphe à 550°C à la pression de 90 Pa, puis cristallisé par recuit thermique à 600°C sous vide.

Une première étape de photolithographie UV classique suivie d'une gravure plasma (RIE – Reactive Ion Etching) permettent de définir des plots qui serviront d'électrodes de



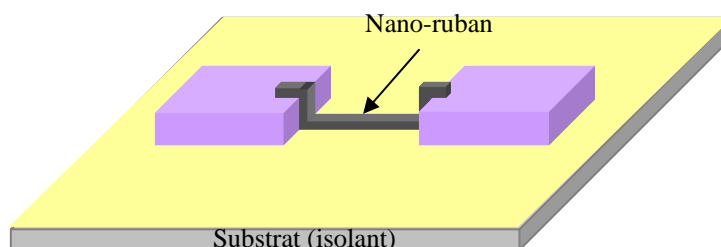
(a)

Photolithographie UV classique suivie d'une gravure plasma (sous SF₆) du silicium polycristallin fortement dopé : formation des électrodes



(b)

Dépôt de silicium amorphe non dopé, puis oxydation locale par AFM : formation de l'oxyde de masquage



(c)

Gravure plasma (sous SF₆) du silicium amorphe : formation du nano-ruban de silicium amorphe

Figure 2 : procédé de fabrication de la résistance

contacts de la résistance (fig. 2 (a)). Ensuite, un deuxième dépôt de silicium amorphe (épaisseur 40 nm) est réalisé par procédé LPCVD. Après un nettoyage dans une solution d'acide fluorhydrique très diluée (2 %), une étape de lithographie à l'aide du microscope AFM est réalisée sur l'échantillon. Un masque d'oxyde de forme filaire est ainsi élaboré entre les deux plots de silicium polycristallin fortement dopés (fig. 2 (b)). La tension de polarisation de la sonde du microscope est fixée à -10 V avec une vitesse de déplacement de $1 \mu\text{m s}^{-1}$, et le taux d'humidité est celui fixé dans la salle blanche soit 45 %. Dans ces conditions le

masque d'oxyde réalisé présente une hauteur voisine de 2 nm pour une largeur à la base de 0,4 μm [5]. L'utilisation du silicium amorphe comme élément de résistance se justifie par le fait que l'oxydation locale par AFM sur du silicium polycristallin n'est pas aussi aisée. Ceci peut trouver une explication liée aux défauts (de type liaisons pendantes) plus importants dans le silicium amorphe, qui auraient pour effet de favoriser la formation de liaisons Si-O contribuant ainsi à la formation de l'oxyde [6].

Une deuxième étape de gravure plasma (gaz réactif SF_6) du silicium amorphe permet alors la formation du nano-ruban de silicium amorphe entre les deux électrodes (fig. 2 (c)). Les conditions de gravure plasma sont telles que la sélectivité entre l'oxyde obtenu par lithographie AFM et le silicium amorphe soit suffisamment élevée pour assurer la fonction de masquage de l'oxyde. Ainsi un nano-ruban continu de silicium amorphe d'une épaisseur d'environ 20 nm est lithographié par ce procédé sur une longueur de plus de 10 μm entre les deux plots de silicium polycristallin fortement dopés servant d'électrodes.

La largeur du nano-ruban (environ 0,8 μm) est plus élevée que celle du masque d'oxyde [5]. Ceci est le résultat de plusieurs phénomènes. Le premier est la diffusion latérale des ions oxygène [7] contribuant à un étalement de l'oxyde ainsi formé. Un moyen de limiter ce phénomène serait de travailler avec une tension de polarisation de la sonde en mode pulsé, ce qui aurait pour effet de réduire la diffusion latérale, et aussi d'augmenter la vitesse de croissance verticale de l'oxyde, conduisant à la formation d'un oxyde de masquage avec un haut facteur de forme (hauteur/largeur) [8]. Ceci devrait rendre possible alors la réalisation de nanofils de silicium amorphe. Les autres raisons associées à cet effet d'élargissement du motif en silicium amorphe gravé sont un taux d'humidité trop élevé [2] et la forme géométrique de la pointe de la sonde du microscope pas assez profilée.

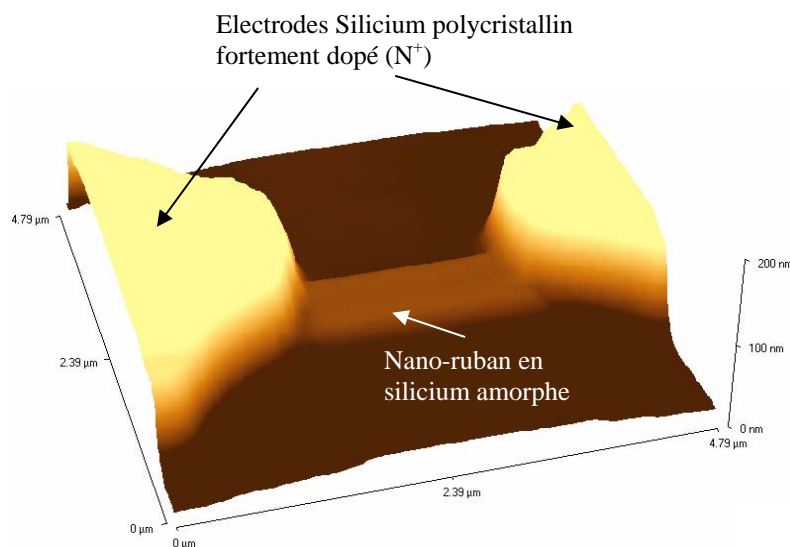


Figure 3 : Cliché AFM de la résistance électrique (vue de dessus). D'après [5].

3) Caractérisation électrique

La résistance ainsi réalisée peut alors être testée électriquement par les étudiants grâce à des mesures I-V. Le dispositif de mesures à disposition est un HP 4155 A. La figure 4 représente la courbe $I(V)$ de ce type de résistance. Une estimation de la résistance électrique du dispositif fabriqué est extraite de la pente de la caractéristique électrique au voisinage de l'origine. La valeur de la mesure donne 40 $\text{M}\Omega$.

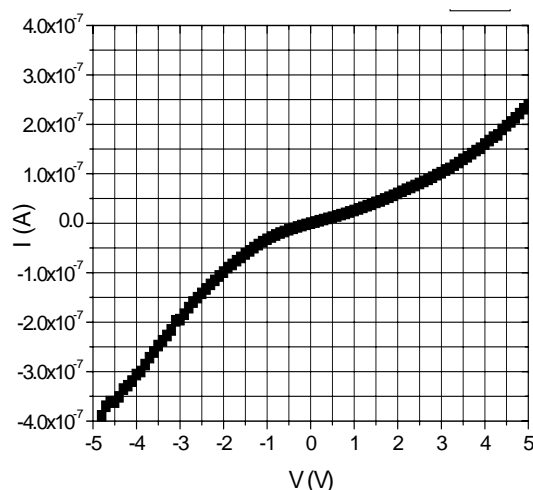


Figure 4 : Caractéristique électrique I(V) de la résistance.

III- Conclusion

Cette formation est en adéquation avec les activités de recherche relevant du domaine des nanosciences et plus particulièrement en nanotechnologies silicium. Elle sensibilise les étudiants à la complexité des moyens mis en œuvre dans la réalisation d'objets et le développement de dispositifs électroniques nanométriques. De plus, elle permet aux étudiants de découvrir l'environnement d'une salle blanche et de les initier à l'utilisation de certaines technologies de fabrication (aligneur UV, gravure plasma...) et de moyens de caractérisations structurales (dont la microscopie AFM) entrant dans la fabrication de dispositifs nanoélectroniques.

La spécificité rennaise de ce TP est de travailler avec des matériaux en couches minces à base de silicium synthétisés au GM-IETR, et donc en rapport avec des thématiques de recherche actuelles.

Le contenu de cette formation est en pleine adéquation avec les évolutions actuelles de la microélectronique vers la nanoélectronique. Une telle formation est une bonne approche pour sensibiliser les étudiants aux défis technologiques majeurs auxquels doivent faire face à l'heure actuelle les technologues pour le développement de l'électronique intégrée de la prochaine décennie.

Notons que ce type de formation couvre un large champ disciplinaire (chimie, matériaux, physique, micro- et nano-électronique) et qu'elle peut convenir à un public d'étudiants issus des filières correspondantes en rapport avec les nanotechnologies. Aussi ce TP peut être proposé aux étudiants de 2^e année de Master ou de formations équivalentes dépendant des universités ou des écoles d'ingénieurs. Cette offre de formation vient étoffer la palette des formations proposées, dans le cadre de la formation initiale ou continue, aux établissements d'enseignement supérieur du grand ouest (Caen, Rennes, Brest, Nantes...) par le pôle rennais du CNFM.

Références

- [1] J. A. Dagata, J. Schneir, H. H. Harary, C. J. Evans, M. T. Postek, J. Bennett “Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunnelling microscope operating in air” *Appl. Phys. Lett.*, 56, 2001 (1990).
- [2] P. Avouris, T. Hertel, R. Martel, « Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon : kinetics, mechanism, and nanofabrication » *Appl. Phys. Lett.*, 71 (2), 285 (1997).
- [3] B. Legrand, H. Happy, « TP de nanotechnologie. Réalisation et observation de nanofils de silicium à l’aide de l’AFM », *Huitièmes journées pédagogiques du CNFM, Saint Malo (France), 1-3 décembre 2004*, pp 73-78.
- [4] I. Ionica, L. Montes, S. Ferraton, J. Zimmermann, L. Saminadayar, V. Bouchiat, “Field effect and coulomb blockage in silicon on insulator fabricated by atomic force microscope” *Sol. St. Elect.*, 49, 1497 (2005).
- [5] L. Pichon, R. Rogel, F. Demami “Fabrication of amorphous silicon nanoribbons by atomic force microscope tip-induced local oxidation for thin film device applications” *Semicond. Sci. Technol.* 25 065001 (2010).
- [6] G. Sarabayrousse, P. Taurines, E. Scheid, D. Bielle Daspet, A. Martinez *Thin Soild Films* 197 21 (1991)
- [7] A. E. Gordon, R. T. Fayfield, D. D. Litfin, T. K. Higman, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13**, 2805 (1995)
- [8] M. Calleja, R. Garcia, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3427 (2000)