

Photodétecteur UV aveugle à la lumière du jour à base de nanofils de GaN

Andres de Luna Bugallo, Lorenzo RIGUTTI,
Maria TCHERNYCHEVA, Gwenole JACOPIN,
François H.JULIEN.
Institut d'Electronique Fondamentale-UMR8622,
CNRS Université Paris Sud XI 91405 Orsay
cedex

S.T. CHOU, Y.T. LIN, P.H. TSENG, L.W. TU
Department of Physics and Center for
Nanoscience and Nanotechnology, National Sun
Yat-Sen University, Kaohsiung 80424, Taiwan,
Republic of China

Email : andres.de-luna-bugallo@u-psud.fr

Résumé

Ce travail expose la réalisation et les caractérisations d'un photodétecteur UV à base de nanofils de GaN contenant une jonction p-n. Les ensembles de nanofils verticalement alignés sur leur substrat sont encapsulés dans un polymère transparent et contactés sous forme des mesas. Les photodétecteurs présentent une réponse dans l'UV pour l'énergie supérieure à 3.3 eV et sont insensibles à la lumière du jour. La réponse maximale de 0.17 A/W a été mesurée à la température ambiante pour les photons d'énergie $E=3.47$ eV.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, les nanofils de nitrures d'éléments III (GaN, AlN et leurs alliages) font l'objet de recherche scientifique intense pour leur grand champ d'applications. Différents composants à base de nanofils uniques ou d'ensemble de nanofils ont été démontrés comme des transistors à effet de champ, des diodes électro-luminescentes, des lasers pompés optiquement, des photodétecteurs, etc... [1]. En ce qui concerne les nitrures, l'énergie de leur bande interdite peut être accordée jusqu'aux très courtes longueurs d'onde UV (290nm) en utilisant les alliages AlGaN. Il est donc possible de fabriquer des photodétecteurs de l'irradiation UV aveugles à la lumière du jour.

Le désaccord de maille important entre les nitrures et les substrats couramment utilisés (saphir, Si, SiC) présente un défi majeur pour le développement des photodiodes à base de couches minces de nitrures. En effet, la relaxation des contraintes entraîne la formation de dislocations qui peuvent avoir une densité de l'ordre de 10^9 cm⁻², ce qui dégrade fortement l'efficacité du dispositif. Les nanofils émergent ainsi comme une solution attractive au problème de dislocations, car grâce à leur faible section transversale ils peuvent relaxer les contraintes par la surface latérale libre et éliminer les dislocations. En plus, l'épitaxie par jets moléculaires (EJM) permet l'intégration des nanofils de GaN sur les substrats bon marché comme le silicium, ce qui réduit le coût d'élaboration. Il est possible de fabriquer des dispositifs à base de nanofils verticalement alignés sur leur substrat et tirer profit de leurs excellentes propriétés optoélectroniques. Ce types de structure sont des candidats pour une nouvelle génération de photodétecteurs à matrice de nanopixels.

Dans cet article, nous présentons la réalisation et la caractérisation d'une photodiode à base d'ensemble de nanofils GaN comportant une jonction p-n verticalement alignés sur le substrat de silicium. Les caractérisations électriques de dispositifs montrent un comportement redresseur typique d'une jonction p-n. Les spectres de photocourant et de photovoltage ont été mesurés dans l'intervalle spectral de l'UV à l'IR. Ils montrent que la réponse spectrale est sélective pour les photons d'énergie $E > 3.3$ eV. L'influence de la température sur le voltage du circuit ouvert V_{oc} a été étudiée.

2. Processus technologique

La figure 1 présente les principales étapes de fabrication du photo-détecteur. Les nanofils ont été encapsulés dans le polymère hydrogène Silsesquioxane (HSQ) qui est étalé sur une tournette à une vitesse de 2200 tours / min (Fig. 1a). Les forces capillaires agissent de façon telle que l'épaisseur de la couche déposée converge naturellement à la hauteur nominale des nanofils (Fig. 1b). Le but de l'utilisation du matériau de remplissage est d'assurer l'isolation entre les nanofils et de fournir un support mécanique pour un contact supérieur. Un recuit a été effectué pour modifier les propriétés du HSQ afin de le durcir et rendre transparent dans la gamme UV [2]. Pour obtenir un accès électrique au sommets des nanofils et réaliser le contact supérieur, l'excès de polymère recouvrant les bouts des nanofils a été éliminé par gravure ionique réactive (Fig. 1c). Des mesas carrées ont été définies par la lithographie optique. Les dimensions des mesas sont d'environ 300 μm de côté. Deux étapes de gravure sont ensuite réalisées sur la région en dehors des Mesas : la première pour éliminer le polymère restant, la seconde pour graver le substrat et supprimer les nanofils. Cette deuxième étape de gravure expose le substrat, ce qui est exploité pour la réalisation d'un contact inférieur commun pour les dispositifs.

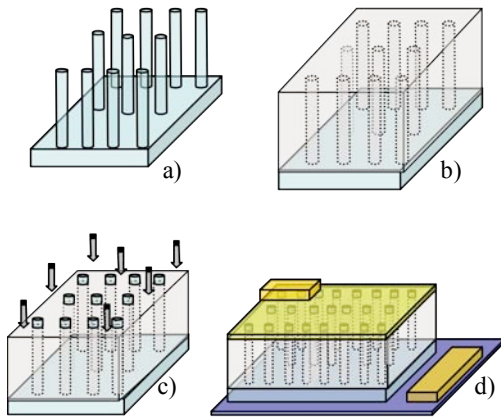


Figure 1. Étapes de fabrication.

Un contact transparent consistant d'une couche de 250 nm d'Oxyde d'indium étain (ITO) a été déposé sur la partie supérieure des nanofils, suivi par un traitement thermique à 400 ° C pour réduire la résistance de l'ITO. Finalement un dépôt Ti/Au a été fait sur la couche de ITO et sur le substrat, laissant la partie centrale des mesas ouverte à la lumière incidente (Fig. 1d). La réalisation complète du dispositif est illustrée dans l'insert de la figure 2 qui montre une image de microscopie électronique à balayage (MEB) d'un photodétecteur. La Fig. 2 montre un zoom sur un coin de la mesa avec le contact au-dessus des nanofils, aussi bien que la gravure du substrat en dehors de la mesa qui permet d'avoir le contact inférieur.

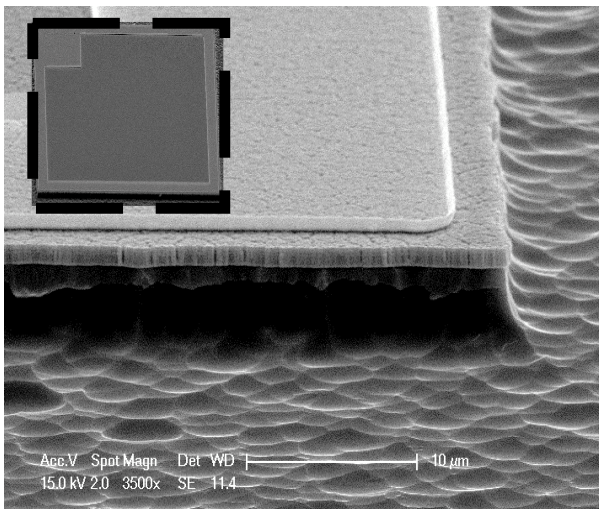


Figure 2. Image MEB du photodétecteur.

3. Caractérisation

3.1 Caractérisation Electrique

Afin d'étudier les propriétés électriques des photodétecteurs, des mesures courant-tension (I-V) ont été effectuées en utilisant une source-meter Keithley K 2636 et une station sous pointes cryogénique. La figure 3 montre les caractéristiques I-V en fonction de la

température sous l'illumination UV ($\lambda=360\text{nm}$) et dans l'obscurité. Pour la puissance incidente sur les mesas ($300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$) de $1.6\mu\text{W}$ le dispositif produit un photovoltage de 250 mV. Pour les mêmes conditions d'éclairage, le photocourant pour la polarisation de -1.5V et à température ambiante est de 270nA, ce qui correspond à la réponse de détecteur de 0.17A/W. Cette valeur est similaire à la réponse obtenue par Wang [3], pour un photodétecteur basé sur une hétérojonction entre les nanofils d'InAs et un substrat Si. Dans les mêmes conditions, le facteur de photosensibilité, définie comme le rapport entre le photocourant et le courant d'obscurité I_{ph}/I_{dark} , est de 2.3×10^2 à la polarisation de -1.5V, indiquant une forte réponse à la lumière ultraviolette. Il faut aussi remarquer que les caractéristiques I-V sont insensibles à la lumière visible.

Dans une configuration photovoltaïque, la tension du circuit ouvert V_{oc} et le courant de court-circuit I_{sc} sont les valeurs qui limitent la performance d'un dispositif photovoltaïque. La valeur de V_{oc} diminue en augmentant la température comme le montre l'insert de la figure 3, ce qui est un comportement typique d'une jonction p-n.[4]

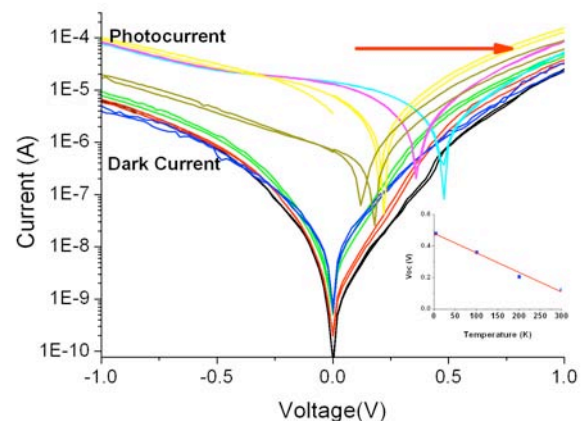


Figure 3. I-V's dans l'obscurité et sous illumination, la flèche indique la descente en température 300K, 200K, 100K et 4K .L'insert montre la dépendance du V_{oc} avec la température.

3.2 Spectroscopie de photovoltage et photocourant

Pour déterminer la plage spectrale de fonctionnement du photodétecteur, le photovoltage et le photocourant ont été mesurés dans le domaine du visible à l'ultraviolet. Une lampe Xénon et un monochromateur constituent la source monochromatique accordable, qui est focalisée sur l'échantillon. Le faisceau lumineux est modulé en amplitude par un chopper mécanique à une fréquence de 200 Hz, et les signaux de photocourant ou de photovoltage sont collectés à l'aide d'une détection synchrone à température ambiante.

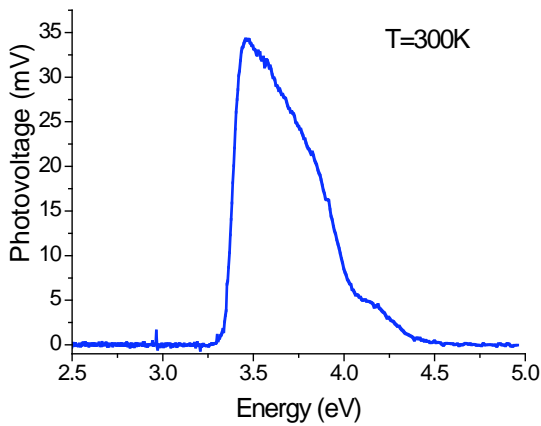


Figure 4. Spectre de photovoltage à température ambiante.

La fig 4 montre le spectre de photovoltage à circuit ouvert. Le signal de photovoltage démarre à partir de 3.3eV et atteint la valeur maximale à 3.46 eV, proche de l'énergie de la bande interdite du GaN. La réponse maximale du détecteur en mode photovoltaïque à circuit ouvert est de 28×10^3 V/W.

Le spectre montre que la réponse est sélective en longueur d'onde, le détecteur ne réagit qu'à la lumière dont l'énergie est supérieure ou légèrement inférieure à la bande interdite du GaN. Ceci démontre que la réponse du détecteur est liée à l'absorption de la lumière dans les nanofils et pas dans le substrat Si. Un léger décalage du signal en dessous du gap du GaN peut être lié à l'existence d'états de queue de bande, mais on ne peut pas exclure un rôle de l'effet Franz-Keldysh lié au champ associé à la courbure des bandes aux surfaces latérales des nanofils [5].

Les spectres de photocourant ont été mesurés pour de différentes valeurs de tension appliquée (Fig. 5). Ils montrent la même forme spectrale que le spectre de photovoltage. Comme le présente l'insert de la figure 5, le signal de photocourant est négatif dans l'intervalle de polarisation $V_b < -250$ mV, et positif lorsque $V_b > +250$ mV. La valeur de V_b pour laquelle le signal de photocourant change de signe est donc très proche de la valeur du photovoltage à circuit ouvert $V_{oc} = 245$ mV trouvée en analysant les caractéristiques I-V (Fig. 3).

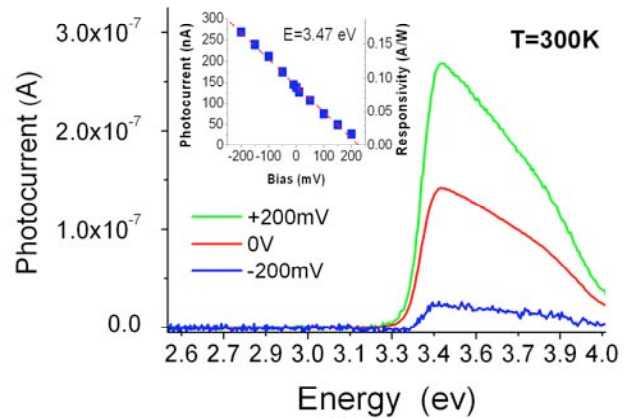


Figure 5. Spectres du photocourant à température ambiante pour des différentes polarisations appliquées. Dans l'insert, le niveau de photocourant et de réponse pour une énergie $E=3.47$ eV en fonction de la polarisation appliquée.

Pour une jonction p-n dans le GaN la valeur de photovoltage à circuit ouvert V_{oc} attendu est supérieure à la valeur trouvée de 245 mV. Cette différence peut être liée au faible niveau du dopage p, ce qui entraîne une diminution considérable de la valeur de la tension de diffusion de la jonction p-n. Ce paramètre va être amélioré dans les futures réalisations des photodétecteurs.

4. Conclusion

Un photodétecteur à base d'un ensemble de nanofils GaN encapsulés dans une résine transparente a été démontré. Une méthode simple de fabrication consistant dans la planarisation de nanofils verticalement alignés a été développée. Les mesures électriques démontrent que le voltage de circuit ouvert diminue en augmentant la température. Le signal du photocourant montre une réponse spectrale dans l'UV et le dispositif est aveugle aux longueurs d'onde visibles. La performance du détecteur est limitée par l'activation du dopage p dans les nanofils.

Références

- [1] Z. Fan, J. C. Ho, Z. A. Jacobson, H. Razavi, and A. Javey *Large-scale, heterogeneous integration of nanowire arrays for image sensor circuitry*. PNAS 105, (2008) 11066-11070.
- [2] Minjie Zhou, Haojun Zhu, Yang Jiao, Yangyan Rao, Lianmao Peng and Quan Li, *Optical and Electrical Properties of Ga-Doped ZnO Nanowire Arrays on Conducting Substrates* J. Phys. Chem. C, 2009, 113 (20), pp 8945-8947
- [3] Wei Wei, Xin-Yu Bao, Cesare Soci, Yong Ding, Zhong-Lin Wang and Deli Wang. *Direct Heteroepitaxy of Vertical InAs Nanowires on Si Substrates for BroadBand Photovoltaics and Photodetection*. Nano Lett., 2009, 9 (8), pp 2926-2934.
- [4] AL Kuhaimi, S. A. Jpn. J. Electron Affinity Difference in CdS/Si Solar Cells. Appl. Phys. 1998, 37, 4850-4853.
- [5] Anna Cavallini, Laura Polenta, Marco Rossi, Thomas Richter, Michel Marso, Ralph Meijers, Raffaella Calarco, and Hans Lüth Defect Distribution along Single GaN Nanowhiskers Nano Lett., 2006, 6 (7), pp 1548-1551