

Résumé en français.

Depuis plusieurs années, les semiconducteurs à base de nitrure, ainsi que leurs hétérostructures, sont très étudiés pour leurs applications en électronique et en optoélectronique. Leur largeur de bande interdite directe qui varie entre 0.6 eV (InN) et 6.2 (AlN), leur grande stabilité thermique et mécanique, leurs constantes piézo-électriques élevées ou encore leur grande polarisation spontanée sont exploitées pour fabriquer des transistors de puissance, des lasers et des diodes électroluminescentes dans le domaine spectral visible et UV.

Cependant, le choix des matériaux pour la croissance des nitrures III-V est limité par les problèmes de désaccord de maille important entre les nitrures et les substrats couramment utilisés (saphir, Si, SiC), ce qui présente un défi majeur pour le développement des dispositifs 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 10^9cm^{-2} , ce qui dégrade fortement l'efficacité des dispositifs.

Les nanofils sont des structures cristallines dont la longueur est comprise entre quelques centaines de nanomètres et quelques centaines de microns, et dont le diamètre varie entre quelques nanomètres et quelques centaines de nanomètres. Grâce à leur faible section transverse les contraintes liées au désaccord de maille entre le matériau et son substrat peuvent être relaxées en surface sur les bords du nanofil et éliminer les dislocations. Cette propriété ouvre la possibilité de faire croître des nanofils sur des substrats avec un fort désaccord de maille comme le silicium. De plus, les nanofils

préserve les avantages de croissance de couches minces en permettant l'intégration des hétérostructures axiales, des boîtes quantiques, des jonctions p-n, mais aussi des structures plus complexes telles que des hétérostructures radiales et des nanofils avec branches. De plus, les nanofils de semiconducteurs III-V peuvent être des émetteurs de lumière efficaces. En raison de ces avantages, les nanofils ouvrent de nouvelles perspectives pour des designs de composants optoélectroniques innovants.

Les nanofils des nitrures d'éléments III ont été proposés pour une grande variété d'applications. En particulier, ils sont considérés comme les briques de base de la nanoélectronique et des nanodispositifs opto-électroniques tels que les photodétecteurs (Soci, 2007) (Kouwe, 2010), les transistors (Motayed, 2006), les biocapteurs (Patolsky, 2006), des sources lumineuses (Qian et al. , 2008) (Koester, 2011), les cellules solaires (Dong, 2009), etc.

Dans ce contexte, ce travail de thèse a pour but la fabrication et la caractérisation des dispositifs à base de nanofils III-N. Il s'agit de comprendre le comportement du dispositif à base de nanofils uniques par des caractérisations électriques et optiques, mais aussi d'étudier les composants à base d'ensemble de nanofils. Le manuscrit de cette thèse est subdivisée comme suit:

Chapitre 1. Introduction

Dans le premier chapitre, les propriétés principales des nitrures d'éléments III et leur hétéro-épitaxie sont tout d'abord présentées. Puis, je donne une description générale

des techniques de croissance différentes de nanofils semi-conducteurs en soulignant la possibilité de les intégrer sur des substrats en fort désaccord de maille. Le reste du chapitre est consacré à l'état de l'art des nanofils semi-conducteurs et de leurs applications.

Chapter 2. Nanofabrication

Le deuxième chapitre se concentre sur le développement des différents processus technologiques pour fabriquer les dispositifs basés sur des ensembles de nanofils et des nanofils uniques. Les principales techniques sont la lithographie optique et la lithographie par faisceau d'électrons. D'abord, je décris la stratégie développée pour contacter un nanofil unique par lithographie par faisceau d'électrons. Enfin, je discute la fabrication des dispositifs basés sur des ensembles de nanofils verticalement alignés sur un substrat en utilisant la technique de photolithographie. Les caractéristiques de ces dispositifs seront discutées dans les chapitres suivants.

Fabrication de dispositifs à nanofil unique.

Dans cette étude, j'ai développé un processus de nanofabrication pour fabriquer des dispositifs à base de nanofils uniques. La description des étapes technologiques du processus de fabrication consiste en les étapes suivantes :

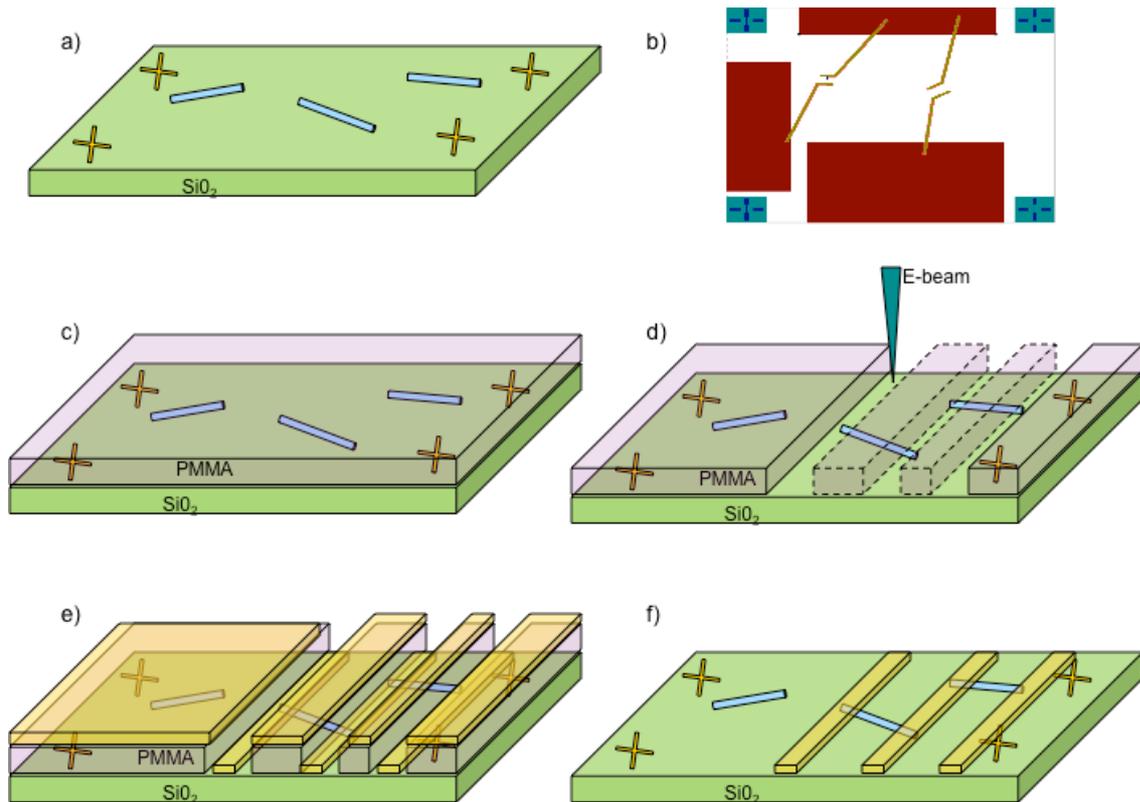


Figure 2.1 étapes de fabrication pour les dispositifs à base de nanofils uniques.

Après la croissance, les échantillons sont immergés dans un b cher contenant de l'éthanol. Les nanofils sont détachés du substrat en soumettant pendant quelques minutes le b cher aux ultrasons. Quelques gouttes de la solution sont ensuite déposées sur un substrat SiO_2/Si . Puis, les nanofils isolés sont localisés et repérés précisément par microscopie électronique (figure 2.1a). Leurs positions sont mesurées par rapport aux croix de repérage préalablement fabriquées et déposées sur le substrat par lithographie électronique.   l'aide d'un logiciel CAD on dessine les contacts de nanofils par apport à leur position (figure 2.1b). On étale ensuite sur le substrat de la résine PMMA (Polym thylm tacyrlate) par rotation (figure 2.1c). L'adhésion des nanofils sur la surface (par des forces de Van der Waals) est suffisamment forte pour empêcher les nanofils d'être emportés avec l'excès de résine pendant l'enduction. La résine est ensuite

insolée en balayant un faisceau d'électrons focalisés suivant un motif prédéfini pour chaque nanofil (figure 2.1d). L'irradiation de la résine par les électrons du faisceau provoque une scission des chaînes de polymère en fragments plus petits et plus solubles dans un solvant donné. L'échantillon est ensuite recouvert entièrement d'une couche métallique. Le métal est déposé sur toute la surface de l'échantillon. Il recouvre à la fois la résine et les parties du substrat révélées (figure 2.1e). La dissolution de la résine est réalisée indifféremment dans un bain d'acétone et ne conserve que le métal déposé aux endroits insolés. Cette technique s'appelle le « lift-off » et permet ainsi de définir des électrodes métalliques suivant le motif désiré (figure 2.1f). La figure 2.2a et 2.2b présente deux exemples de dispositifs réalisés.

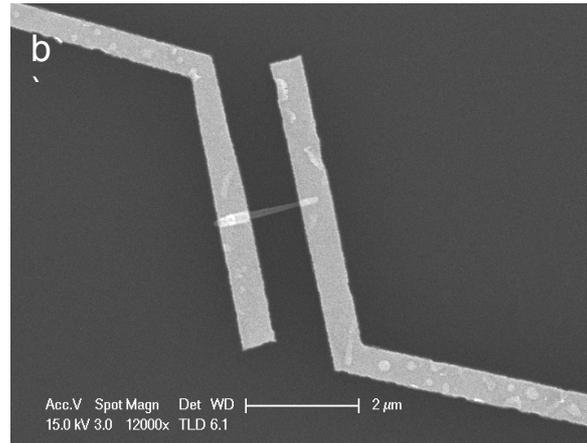
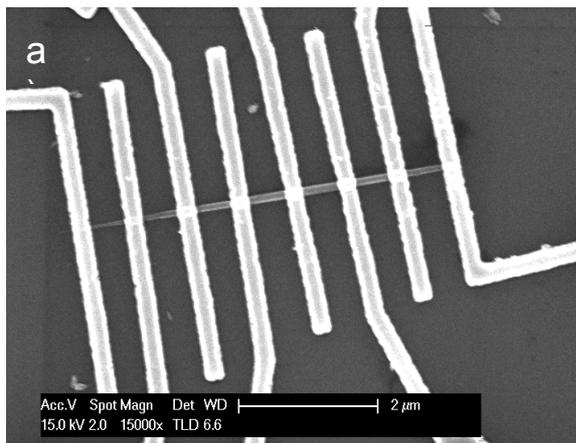


Figure 2.2 Deux exemples de dispositifs après le processus. a) Dépôt de multicontacts sur un nanofil b) Nanofil unique contacté par ses extrémités.

Fabrication de dispositifs à base d'ensembles de nanofils.

Le processus de fabrication du photodétecteur commence par l'encapsulation des ensembles de nanofils dans le polymère hydrogène Silsesquioxane (HSQ) (Fig. 2.3a). Le but de l'utilisation du matériau de remplissage est d'assurer l'isolation entre les nanofils et de fournir un support mécanique pour le contact supérieur. Ensuite, 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 aux 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. 2.3b). Des mésas 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 mésas : la première pour éliminer le polymère restant, la seconde pour graver le substrat et supprimer les nanofils (Fig. 2.3c). Cette deuxième étape de gravure expose le substrat, ce qui est exploité pour la réalisation d'un contact inférieur commun pour les dispositifs.

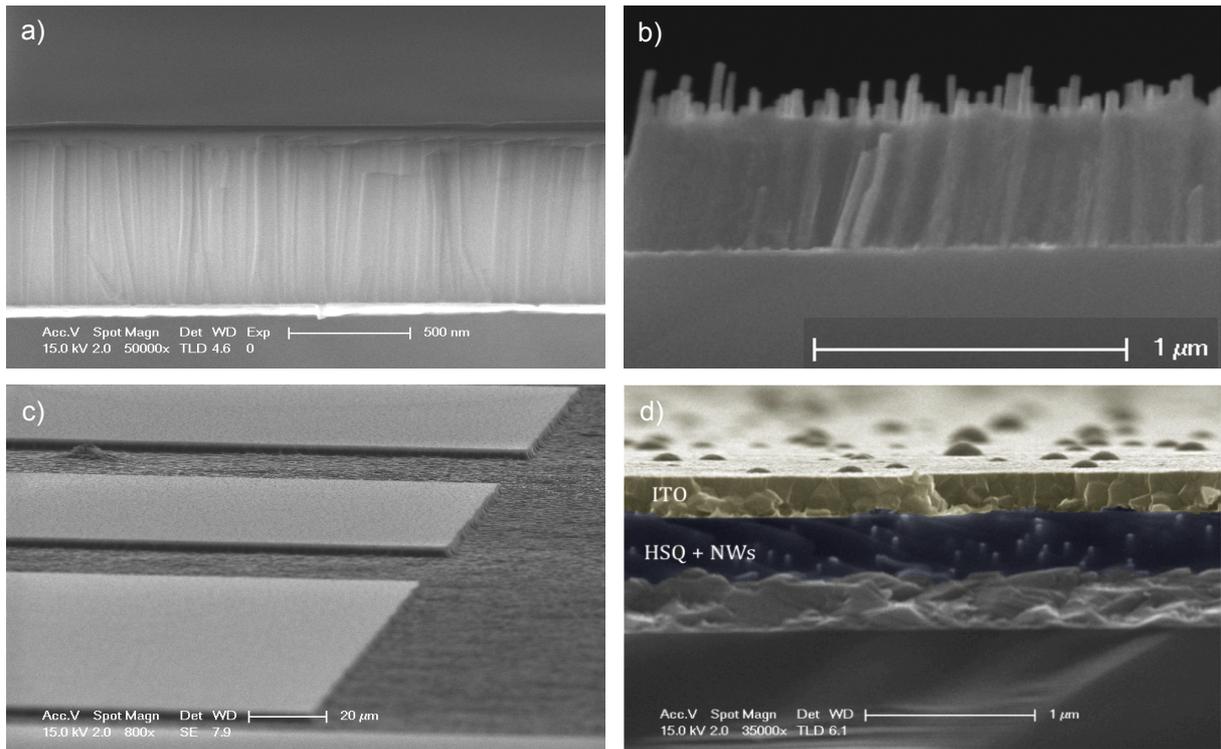


Figure 2.3 Images MEB du processus technologique.

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 (Fig. 2.3d), suivi d'un traitement thermique à 400 ° C pour réduire la résistance de l'ITO ($4 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^{-2}$). 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. 2.3d). La réalisation complète du dispositif est illustrée dans le schéma de la figure 2.4a qui montre tous les éléments du photodétecteur. La Fig. 2.4b montre l'image MEB du photodétecteur et les contacts inférieur et supérieur ainsi comme le micro-soudure qui permettra la caractérisation optique et électrique du dispositif.

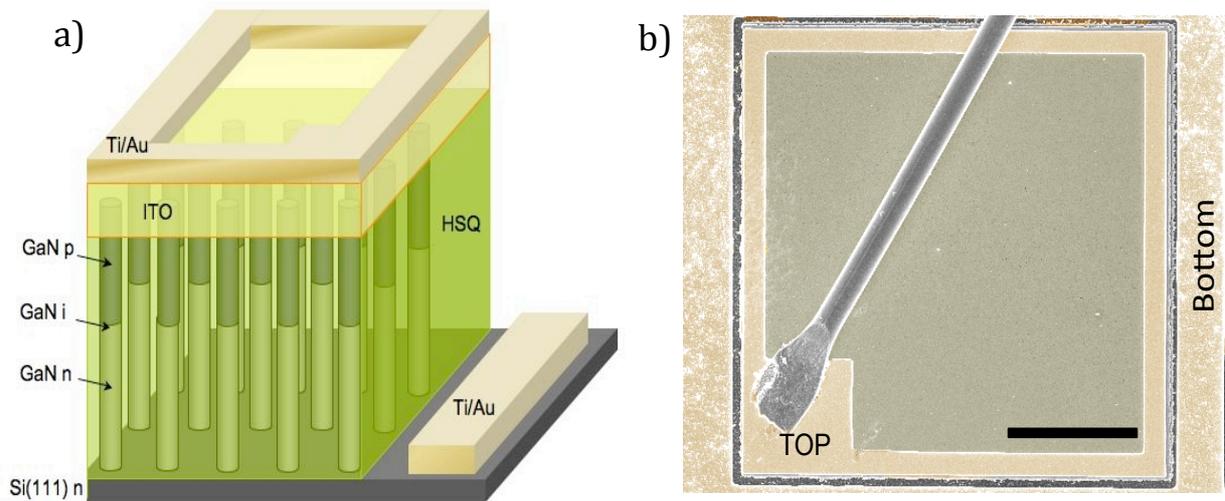


Figure 2.4 a) Schéma du photodétecteur b) Image MEB du photodétecteur

Chapitre 3. Photodétecteur UV insensible à la lumière du jour à base d'un ensemble de nanofils de GaN

Ce chapitre s'intéresse à la réalisation et la caractérisation d'un photodétecteur insensible à la lumière du jour à base d'un ensemble de nanofils de GaN contenant une jonction p-n verticalement alignés sur un substrat. Dans une première partie je présent la structure de nanofils utilisés dans cette étude ainsi que le processus technologique pour la fabrication de ces dispositifs. Je montre que la réponse optoélectronique des photodétecteurs présent une sensibilité maximale supérieure à celle de leurs homologues en couches minces. La réponse spectrale des ces composants apparaît proche du gap de GaN et est liée a l'absorption de la lumière dans les nanofils et pas dans le substrat de silicium.

Description des échantillons

Les nanofils ont été fabriqués à 790°C par épitaxie par jets moléculaires avec un plasma d'azote comme source d'élément V (PAMBE pour Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy). Cette procédure se traduit par un ensemble de nanofils avec une densité de $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Les nanofils possèdent une hauteur moyenne de $0,9 \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, et un diamètre de $50 \pm 20 \text{ nm}$. La morphologie des nanofils est la suivante : La base ($0,4 \text{ }\mu\text{m}$) est dopée-n avec Si, suivi d'un segment nominale non dopée GaN ($0,1 \text{ }\mu\text{m}$), et la partie supérieure du nanofil ($0,4 \text{ }\mu\text{m}$) est dopée p avec Mg.

Caractéristiques courant-tension

Afin d'étudier les propriétés électriques des photodétecteurs, des mesures courant-tension (I-V) ont été effectuées en utilisant une source-mètre et une station sous pointes cryogénique. La figure 3.3 montre les caractéristiques I-V en fonction de la température sous l'illumination UV ($\lambda=360\text{nm}$) et dans l'obscurité. On peut constater une augmentation de courant inverse sous éclairage par presque deux ordres de grandeur attribué à la génération de paires électron-trou dans la jonction p-i-n. De plus, lorsque l'on descend en température, les courbes I-V se déplacent vers une tension positive sous éclairage due à un effet de photovoltage généré dans les nanofils, ce qui est typique pour les dispositifs photovoltaïques (Al Kuhaimi, 1998). Il faut aussi remarquer que les caractéristiques I-V sont insensibles à la lumière visible.

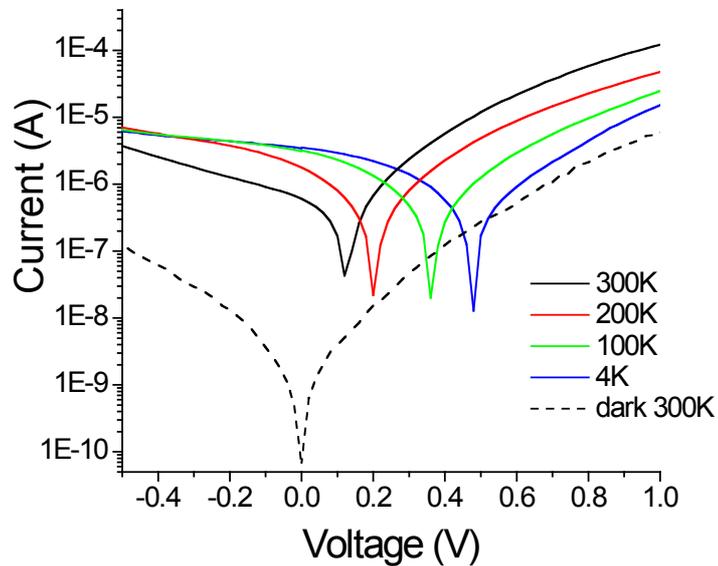


Figure 3.1 Courbes I-V dans l'obscurité et sous illumination pour les températures 300 K, 200 K, 100 K et 4 K.

Pour une puissance incidente sur les mesas ($300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$) de $1.6 \mu\text{W}$, et une polarisation de -1 V le dispositif produit un photocourant de 7.5×10^{-7} , ce qui correspond à la réponse de détecteur de 0.47 A/W . Il convient de souligner que la sensibilité mesurée est supérieure à celle de des photodiodes AlGaIn en couches minces ($0.1\text{-}0.2 \text{ A/W}$) (Monroy et al., 1998).

Afin de caractériser la vitesse de fonctionnement du photodétecteur, nous avons mesuré les transitoires de photocourant lors d'une excitation optique ($\lambda=365$ nm) en forme de courtes pulses carrés (60 ms) comme lustré la figura 3.2. On peut constater que le photocourant entraîne une augmentation et une décroissance bi-exponentielle avec les constantes de temps $t_1 = 2,5$ ms et $t_2 = 22$ ms et $t_1 = 6,2$ ms et $t_2=105$ ms pour le passage de l'état noir vers l'état illuminé et vice versa.

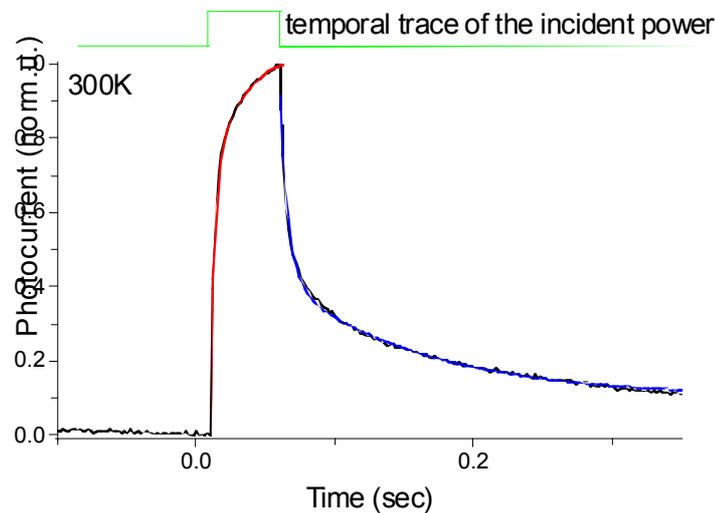


Figure 3.2 Réponse temporelle du photodétecteur

Les phénomènes liés à la surface jouent un rôle important dans les propriétés de nanofils et en particulier ont un grand impact sur la vitesse de fonctionnement du photodétecteur à nanofils. Le mécanisme de piégeage et de-piégeage liés aux états de surface est un phénomène lent, ce qui explique le temps de réponse caractéristique de la milliseconde.

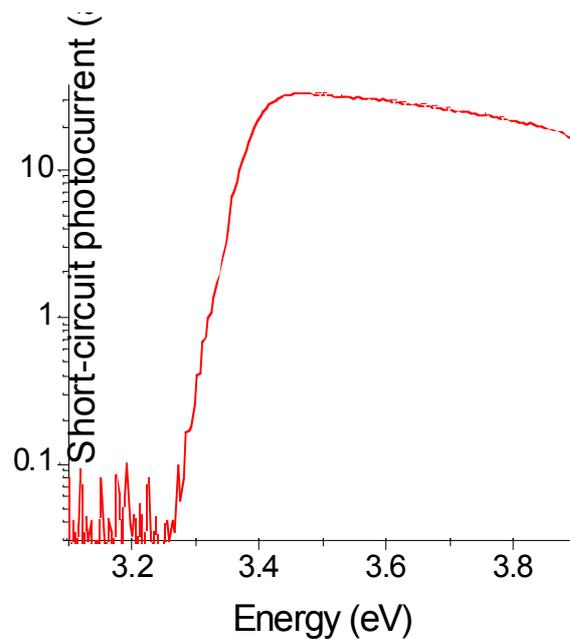


Figure 3.3 Spectre de photocourant à tension nulle.

Pour déterminer la plage spectrale de fonctionnement du photodétecteur, le photovoltage et le photocourant ont été mesurés dans le domaine du visible à l'ultraviolette. La figure 3.3 montre le spectre de photocourant à tension nulle, on peut observer que la réponse commence à partir de ~ 3.27 eV et augmente de deux ordres de grandeur entre 3,3 et 3,4 eV. Ceci démontre que la réponse du détecteur est liée à l'absorption de la lumière dans les nanofils et pas dans le substrat Si contrairement aux photodétecteurs à base de nanofils de ZnO sur substrat Si (Z. Guo et al., 2008). Le photocourant atteint sa valeur maximale à 3,46 eV, puis diminue légèrement à des énergies plus élevées. Cette diminution est due à l'absorption de la lumière dans la couche d'ITO, qui a une bonne transparence dans la gamme UV proche, mais qui commence à absorber à des énergies plus de 3,5 eV (Leung et al., 2010). 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 (Cavallini et al., 2007).

Chapitre 4. Photodétecteur UV à base d'un nanofil unique hétérostructuré GaN/AlN

Le chapitre quatre présente une étude de photodétecteurs UV à base de nanofils uniques. Le photodétecteur comprend une structure n-i-n contenant des disques quantiques GaN / AlN dans la région intrinsèque des nanofils. Le champ interne présent dans la structure favorise l'extraction des porteurs photogénérés à partir des disques. Après avoir décrit les caractéristiques structurales des échantillons étudiés, je me concentre sur les résultats de la spectroscopie de photoluminescence et la cathodoluminescence où les contributions spectrales au-dessus et en dessous de la bande interdite GaN sont liées à l'émission des disques ayant une épaisseur variable. Ensuite, je présente le transport électronique; je montre que lorsque les électrons sont contraints de passer à travers la région des disques quantiques, le transport des électrons se produit par effet tunnel ce qui est révélé par une résistance différentielle négative dans la courbe I-V. J'ai ensuite étudié la réponse spectrale des photodétecteurs. Les spectres de photocourant montrent un pic sous le gap du GaN lié à l'absorption interbande entre les états confinés dans les disques de grande taille.

Description des échantillons

Les nanofils ont été formés par épitaxie par jets moléculaires sur un substrat Si(111) à 780 °C sous une atmosphère riche en azote. Deux échantillons de nanofils hétérostructurés constitués de 20 disques quantiques GaN/AlN de différentes épaisseurs ont été analysés et comparés avec un échantillon de référence. Les structures des échantillons sont illustrées dans la figure 4.1

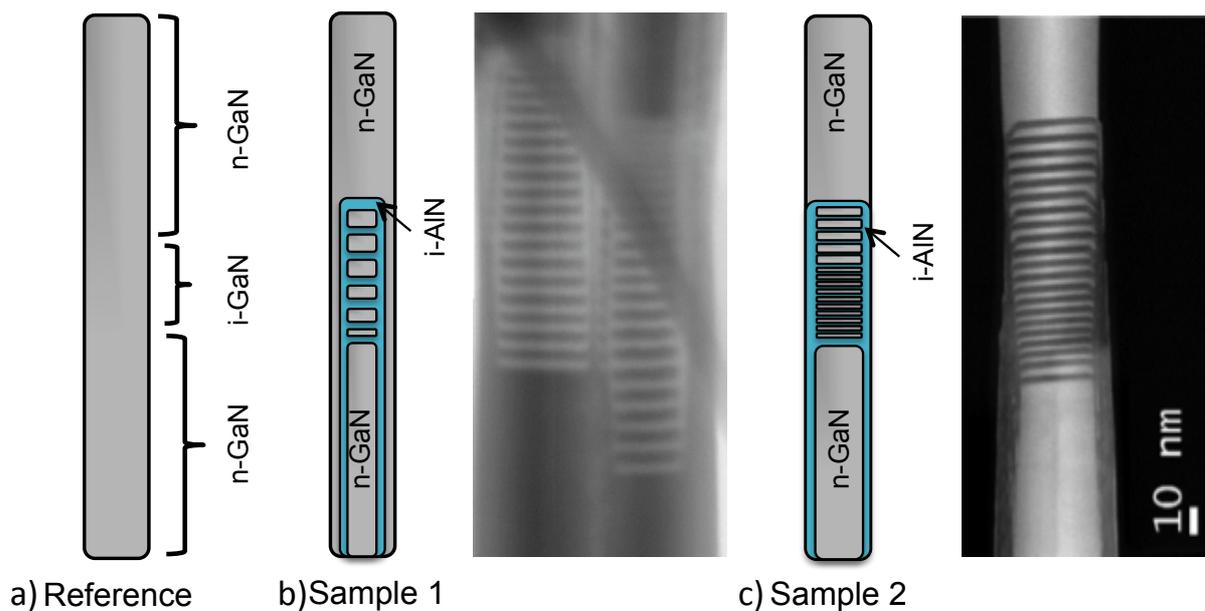


Figure 4.1 Description et images TEM des échantillons.

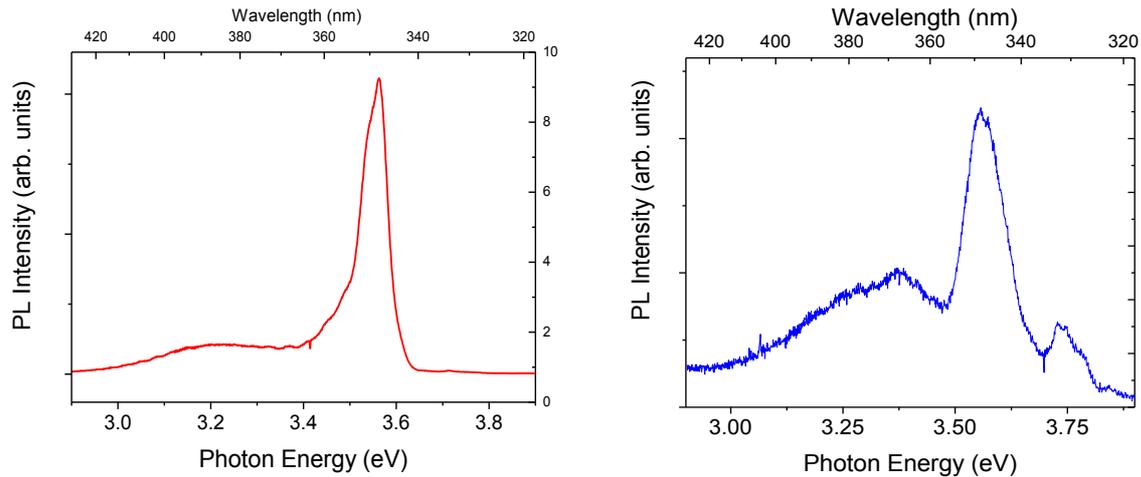
Le diamètre des nanofils est d'environ 40 nm et la longueur est de 1.2 μm . L'hétérostructure est située au milieu du nanofil. L'épaisseur des disques (barrières)

quantiques est de 2-3 nm (3-3.5 nm). L'épaisseur des disques quantiques augmente progressivement vers le haut du nanofil comme le montre les images de microscopie électronique à balayage par transmission (STEM) de la région des disques quantiques. A cause de la croissance latérale de l'AlN, il se forme une coquille d'AlN sur la partie inférieure du nanofil.

Les propriétés optiques ont tout d'abord été caractérisées par la spectroscopie de micro-photoluminescence (μ -PL). Les nanofils uniques ont été préalablement détachés de leur substrat par un bain ultrasonique et dispersés sur un substrat Si/SiO₂. Ils sont ensuite placés dans un cryostat à flux continu d'Hélium et sont excités par un laser Ar⁺⁺ continu doublé en fréquence ($\lambda = 244$ nm) focalisé dans un spot de 3 μ m de diamètre.

Microphotoluminescence

Les propriétés d'émission des nanofils uniques ont été étudiées par μ -PL à 5 K. Les spectres typiques des deux échantillons sont présentés sur la Fig. 4.2. Les nanofils de l'échantillon 1 montrent principalement deux pics centrés à 3.2 eV et 3.55 eV alors que dans l'échantillon 2 une troisième pic apparaît à plus haute énergie vers 3.70-3.75 eV. La position des pics à haute énergie (>3.6 eV) varie de fil à fil et les pics ont un élargissement typique de 35-50 meV. Ces pics sont liés aux disques quantiques de petites épaisseurs (<2 nm). En effet, le confinement quantique augmente l'énergie de photo-luminescence lorsque l'on diminue l'épaisseur du disque.

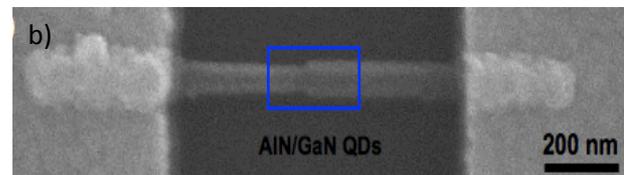
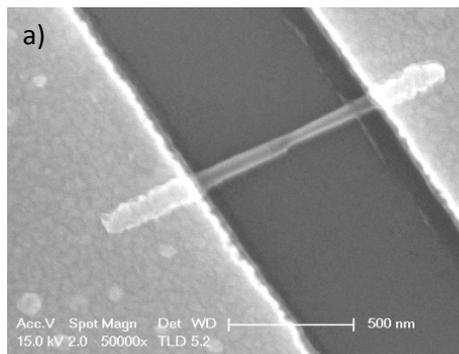


4.2 Spectres de microphotoluminescence des échantillons 1 (gauche) et 2 (droite).

Le pic à 3.55 eV est attribué à la base du GaN entourée par une coquille AlN. On voit ici que la coquille a un double effet. D'une part, elle contraint le cœur de GaN, ce qui se traduit par un décalage vers les hautes énergies de la luminescence. D'autre part, elle empêche les porteurs créés dans la partie GaN de diffuser vers la surface latérale et de se recombiner avec des pièges surfaciques. Les contributions en dessous de 3.4 eV sont liées aux disques quantiques plus larges (> 2.5 nm). Ces disques quantiques sont soumis à un champ électrique interne intense, ce qui induit un effet Stark quantique confiné qui décale la luminescence vers le rouge.

Caractéristiques courant tension

Les photodétecteurs sont réalisés par lithographie électronique à partir des nanofils dispersés. Les contacts Ti/Al/Ti/Au sont déposés sur les extrémités dopées du fil pour obtenir des contacts ohmiques. Les figures 4.3a et 4.3b montrent les images de microscopie électronique à balayage (MEB) d'un nanofil unique contacté.



4.3 Images MEB du photodétecteur.

Les caractéristiques courant-tension ont été réalisées dans une station sous pointes. La figure 4.4 montre des caractéristiques I-V de l'échantillon 2. Pour la polarisation directe, le niveau de courant est de quelques nanoampères. Des mesures similaires sur l'échantillon de référence montraient un comportement ohmique. Cela démontre que le caractère asymétrique est lié à la présence des barrières quantiques et non aux contacts. On observe sur les courbes I-V de la figure 4.4 une résistance différentielle négative (RDN) vers 4 V et ceci jusqu'à des températures de 250 K. Il faut souligner que ce phénomène n'a pas été présent sur l'échantillon numéro 1 dû à la présence de la coquille de GaN qui forme un canal de fuite pour les électrons et donc ils travers pas la région des disques quantiques. La RDN provient du passage tunnel à travers une structure à multi-disques quantiques. L'observation de ce phénomène est rendue possible par la structure cristalline parfaite sans dislocation du nanofil. L'effet tunnel résonant est en compétition avec d'autres mécanismes activés thermiquement, ce qui explique la disparition progressive de la RDN lorsque la température augmente. L'observation d'une RDN reproductible est une démonstration directe du transport tunnel à travers la région des disques quantiques.

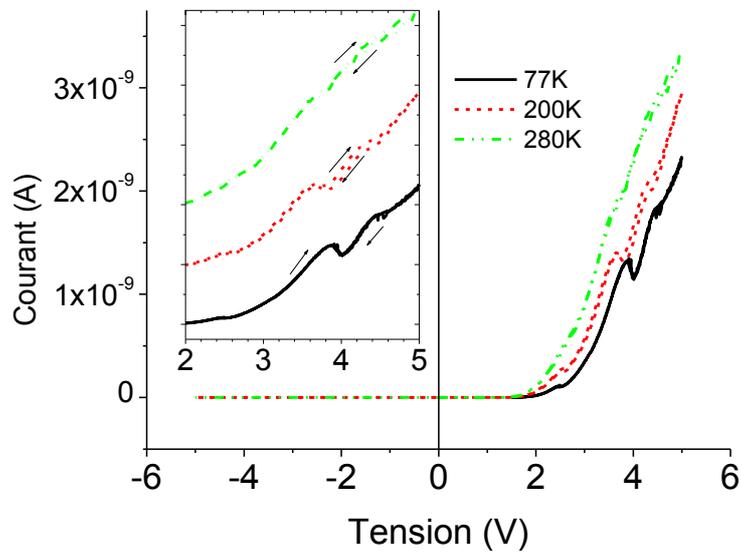


Figure 4.4. Caractéristiques courant-tension de l'échantillon 2 à $T=77$ K (trait noir continu), $T=200$ K (pointillé rouge), $T=280$ K (trait pointillé vert).

Spectroscopie de photocourant

Afin de déterminer la plage spectrale de fonctionnement du détecteur, des spectres de photocourant ont été mesurés couvrant le domaine du visible à l'ultraviolet. Les mesures ont été réalisées à température ambiante. Les spectres de photocourant ont été réalisés en éclairant le nanofil avec une lampe Xenon mono-chromatée par un spectromètre.

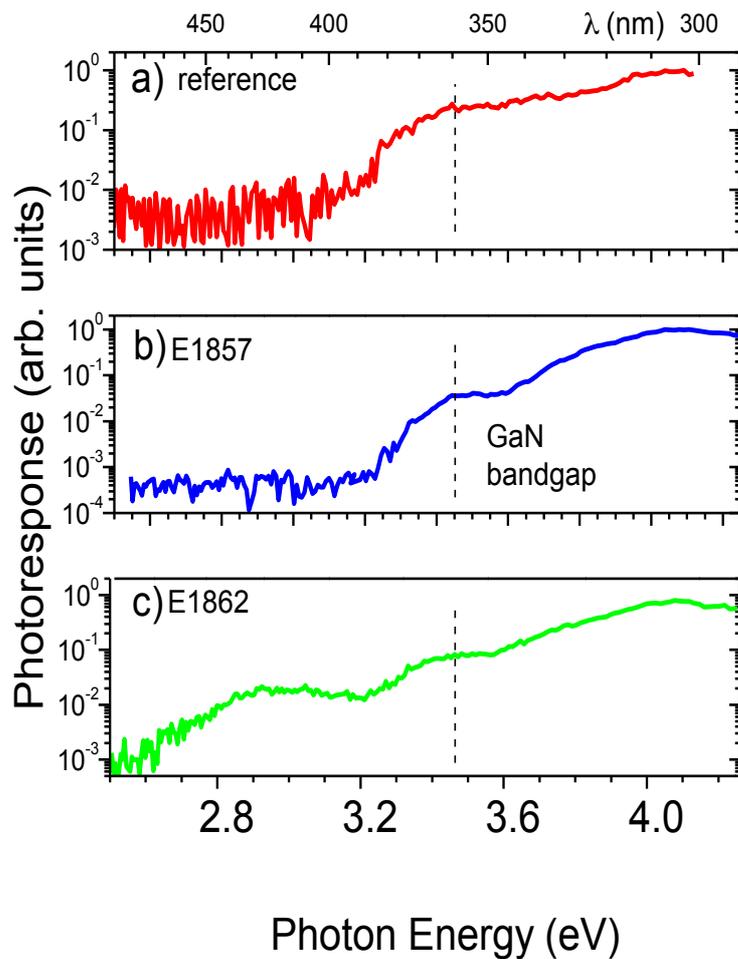


Figure 4.5 Spectres de photocourant des trois échantillons

La figure 4.5 présente les spectres de photocourant des trois échantillons étudiés. La photoréponse de l'échantillon de référence montre une apparition de photocourant à $\sim 3,25$ eV qui est légèrement inférieur à l'absorption du GaN massif. Un comportement similaire a été observé dans le spectre de l'échantillon 1. Contrairement aux deux spectres précédents, le spectre de l'échantillon 2 montre une contribution significative en dessous de la bande interdite du GaN. Le signal commence à $\sim 2,6-2,8$ eV et peut être attribuée à l'absorption fondamentale $hh1-e1$ dans les disques quantiques plus grandes. L'apparition du photocourant est en accord avec les données de PL et donne une preuve

supplémentaire que le mécanisme de responsable du photocourant en dessous du gap est lié à l'absorption interbande dans les disques quantiques.

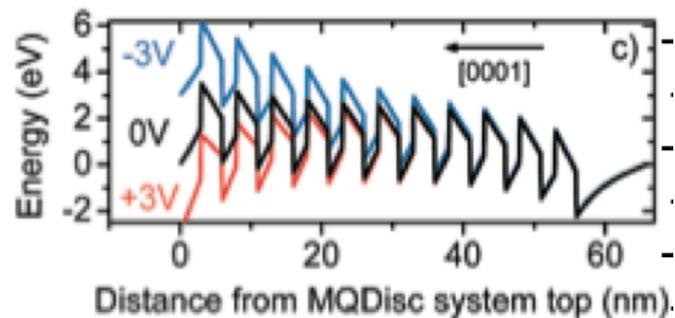


Figure 4.6. Simulation de la bande de conduction pour trois polarisations différentes (-3 V, 0 V et 3 V).

La figure 4.6 montre la simulation de la bande de conduction pour trois polarisations différentes et permet d'expliquer ce comportement. Pour une polarisation positive, on baisse la hauteur de la barrière située sur le haut du nanofil, le courant est important. Inversement, pour une polarisation négative, la hauteur de la barrière de potentiel augmente et donc le niveau de courant diminue. Cependant, la différence de potentiel aux bornes de la région des disques quantiques augmente en polarisation négative : cela facilite l'extraction et le transport des porteurs photogénérés dans la région des disques quantiques. Ainsi le photocourant est plus important en polarisation inverse.

Chapitre 5. Nanoemetteurs de lumière a base de nanofils InGaN/GaN

Dans ce chapitre, je présente une étude consacrée aux nanofils de GaN réalisés par épitaxie en phase vapeur d'organométalliques (MOCVD) ayant une structure cœur coquille InGaN/GaN comme des candidats prometteurs pour les applications d'émission de lumière. Les spectres de microphotoluminescence montrent une forte dépendance de l'émission de l'endroit d'excitation due à la géométrie des nanofils. Le signal d'électroluminescence se compose de deux contributions majeures en fonction des niveaux de courant d'injection, en raison de la présence de deux systèmes de puits radiales et axiales. Finalement je démontre la possibilité d'accorder la longueur d'onde d'électroluminescence à 420-500 nm en changeant le taux d'indium dans les puits InGaN qui est en bon accord avec les résultats de photoluminescence.

Description des échantillons

Les nanofils étudiés ont été fabriqués par croissance MOCVD sans catalyseur sur un substrat de saphir. Les nanofils GaN possèdent une hétérostructure cœur-coquille InGaN/GaN présente que sur la partie supérieure du fil. Les nanofils ont une longueur d'environ 20 μm et leur tête a un diamètre d'environ 800 nm (figure 5.1). Le pied du nanofil est constitué de GaN fortement dopé n (estimé entre 10^{19} cm^{-3} et 10^{20} cm^{-3}) avec du silicium. Dans la tête en revanche, le cœur est fait de GaN non-intentionnellement dopé (le niveau de dopage est de l'ordre de 10^{17} cm^{-3}) suivi d'une série de cinq puits d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ et une coquille de GaN dopé p (dopage Mg est compris entre 10^{17} et 10^{18} cm^{-3}) de quelques dizaines de nanomètres.

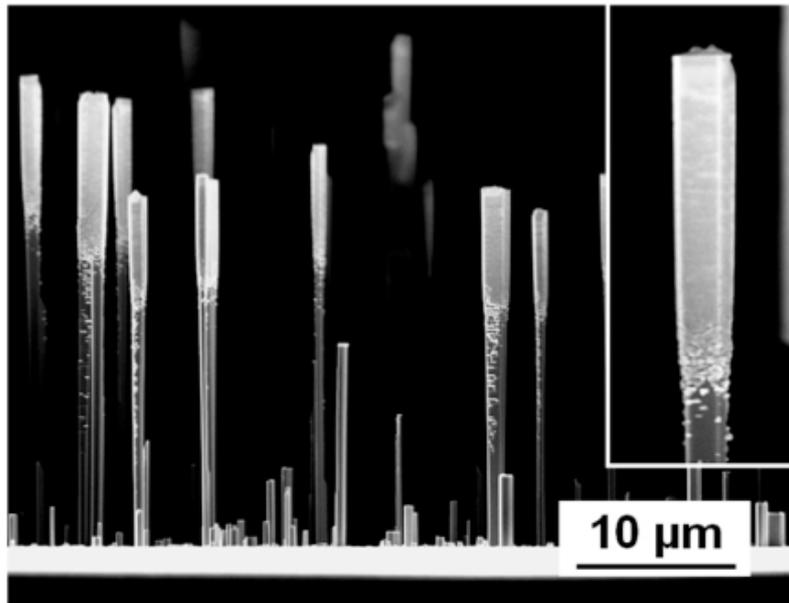
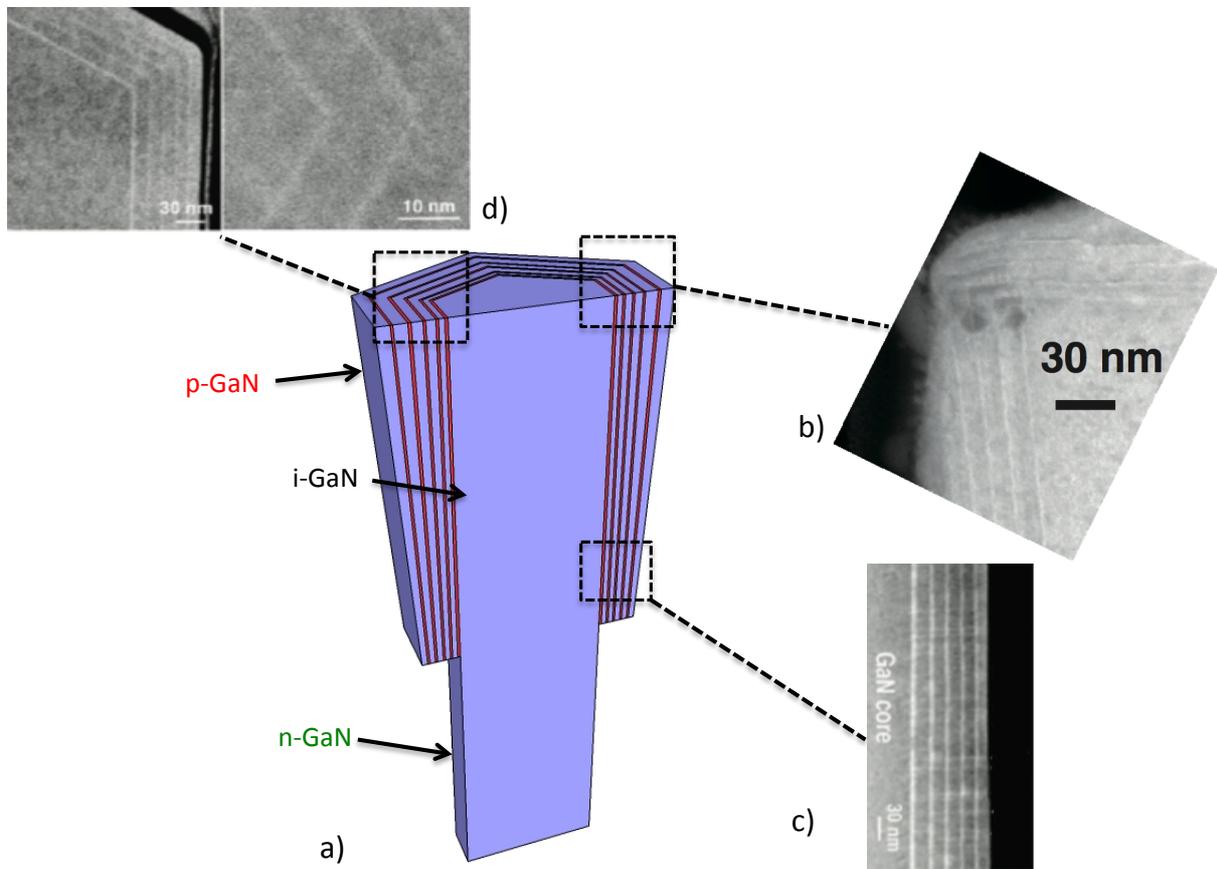


Figure 5.1 Image MEB des nanofils après la croissance.

La structure des nanofils a été étudiée par microscopie électronique à transmission (TEM). Comme illustre dans l'image 5.2d et 5.2c, on peut observer clairement la géométrie cœur coquille de l'hétérostructures GaN/InGaN épitaxies sur le plan non polaire (plan m). La largeur de puits est comprise entre 1 et 8 nm suivant les puits et séparés par environ 8 nm de GaN. Cependant l'image 5.2b montre la présence d'un deuxième système de puits quantiques axiaux dans le sommet de fils.

Afin de démontrer l'accordabilité de la longueur d'onde d'émission des LEDs, trois échantillons avec des températures de croissance de 710°C (échantillon T1165, taux d'indium le plus élevé), 735°C (échantillon T1164, taux d'indium intermédiaire) et 750°C (échantillon T1163, taux d'indium le plus bas) ont été étudiés.



5.2 Schéma et images TEM des différents parties des nanofils.

Microphotoluminescence

Une première étude de microphotoluminescence a été réalisée à 4K sur des nanofils uniques dispersés sur un substrat de silicium passivé. On constate tout d'abord que les spectres dépendent très fortement du nanofil considéré et de la position de la tache laser sur le nanofil. Cependant, on peut distinguer trois zones le long des nanofils, dont des spectres représentatifs sont présentés sur la Figure 5.3a. Ces spectres ont été mesurés sur un nanofil de l'échantillon T1163.

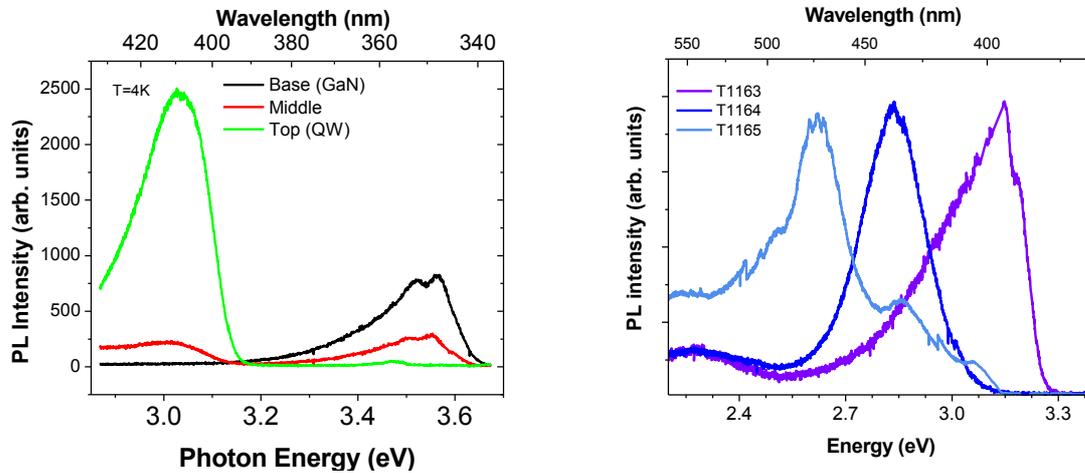
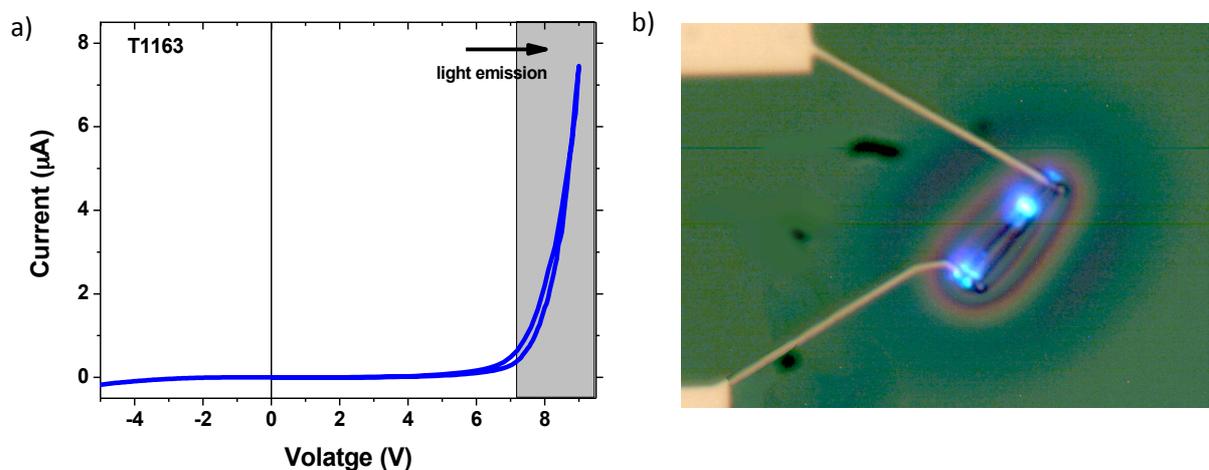


Figure 5.3 a) Spectres de photoluminescence pris à des endroits différents du nanofil. b) Spectres de PL des trois échantillons en provenant de la partie supérieure de nanofils.

Au niveau de l'extrémité du pied (courbe noire), on observe un pic à 3,55 eV qui correspond à luminescence de bord de bande du GaN décalée vers le bleu à cause du fort dopage Si. En remontant le long du nanofil (courbe rouge), il apparaît des pics souvent intenses entre 2,8 et 3,2 eV. Ces pics pourraient être dus aux clusters observés sur les images MEB, et possiblement constitués d'InGaN. En ce qui concerne le spectre de photoluminescence sur la tête du nanofil (courbe verte), on constate que le pic associé au GaN a disparu. Un pic centré autour d'environ 2,8 eV et large de plusieurs centaines de meV apparaît. Ce pic est attribué à la luminescence des puits quantiques InGaN. La figure 5.3b montre les spectres d'échantillons T1163, T1164 et T1165 à 4 K. Comme prévu l'émission liée aux puits quantiques varie clairement d'un échantillon à l'autre, de plus, on peut constater un décalage de l'énergie d'émission vers le rouge lorsque le contenu d'In présent dans les puits augmente.

Caractéristiques courant tension

La Figure 5.4 montre une courbe courant-tension typique des échantillons mesurés à 300K. L'allure des courbes correspond à celle attendue pour une jonction p-n. En polarisation directe, le courant augmente rapidement à partir d'un seuil qui, ici, vaut environ 7 V alors qu'en polarisation inverse, il reste faible devant le courant en polarisation directe. Il faut noter que d'un fil à l'autre le niveau de courant pour une même tension n'est pas identique. Ce phénomène résulte probablement de la dispersion en taille des nanofils, le courant devrait être proportionnel à la surface de la jonction p-n et donc proportionnel au produit du diamètre par la longueur de la tête.



Electroluminescence

Les spectres d'électroluminescence à 300K des nanofils correspondant aux échantillons T1163, T1164 et T1165 pour différents niveaux de courant d'injection sont présentés sur la Figure 5.5. A faible niveau d'injection, le spectre est constitué d'un pic centré à basses énergies 2.25 eV pour le T1163, 2.45 eV pour T1164 et 2.70 eV pour T1165. Lorsque la tension augmente, on constate l'apparition d'un pic prédominant vers les hautes énergies 3.61 eV pour T1163, 2.89 eV pour T1164 et 3.12 eV pour T1165. Dans tous les cas, le pic d'électroluminescence à basse énergie apparaissant à un faible courant d'injection ($I < 1$ mA). Comme le courant est augmenté, le pic visible sature et est progressivement masqué par un second pic qui croît à plus haute énergie.

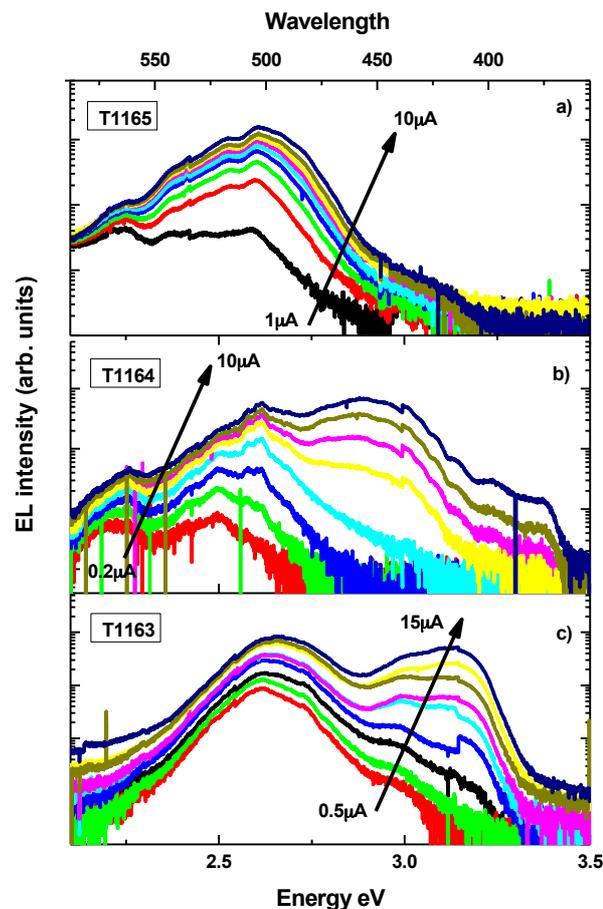


Figure 5.5 Spectres d'électroluminescence des trois échantillons.

L'étude structurale et les résultats de microphotoluminescence suggèrent que le pic à basse énergie (qui domine dans les spectres d'EL mesurés à haute température et faible niveau d'injection) correspond aux puits axiaux alors que le pic à haute énergie correspond à la luminescence des puits radiaux. Par ailleurs, les émissions de PL en provenant de puits radiaux sont en bon accord avec les contributions électroluminescence à haute énergie.

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse est focalisé sur la conception, la fabrication et la caractérisation des dispositifs optoélectroniques à base de nanofils d'éléments III-V. En particulier, j'ai étudié deux différentes architectures de dispositifs, y compris des nanofils uniques et ensembles pour des applications comme la photodétection et l'émission de lumière.

En ce qui concerne le photodétecteur à basé d'un ensemble de nanofils, j'ai démontré que la réponse est supérieure à celle de leurs homologues en couches minces. Ceci est principalement dû à la géométrie du dispositif qui favorise l'absorption de la lumière.

Cependant, des améliorations futures et les efforts peuvent être dirigés vers plusieurs directions:

- Il est nécessaire d'améliorer l'utilisation de l'ITO en tant que contact en haut, puisque l'ITO a une manque de transparence dans la gamme UV, un autre type de conducteur transparent doit être étudié pour le contact, une possibilité est l'utilisation des réseaux de nanotubes de carbone ou couches de graphène.
- Le matériau de remplissage doit être remplacé afin de réduire le piégeage surfacique pour pouvoir tirer pleinement profit de la qualité cristalline de nanofils.
- Du côté épitaxie, la conception d'une structure p-n coeur-coquille permettra une meilleure collection de porteurs photogénérés et donc améliorer considérablement l'absorption optique, d'ailleurs, une deuxième amélioration peut être atteinte lorsque la densité, la taille et l'espacement de nanofils est contrôlée, cela nécessiterait un effort dirigé vers la croissance de nanofils organisés.

J'ai mis en évidence un photodétecteur UV à base de nanofils contenant un réseaux de disques quantiques GaN / AlN. Pendant cette étude, deux échantillons contenant des disques quantiques ont été analysés et comparés avec un échantillon de référence (sans disques). Les analyses structurales ont révélé une variation significative d'un échantillon a l'autre, tandis que l'épaisseur des disques quantiques varie dans les deux cas,

seulement l'échantillon E1857 contient une coquille de GaN entourant complètement les nanofils.

Ce fait contribue à expliquer et à comprendre les caractérisations optiques et électriques.

- Tout d'abord, les expériences de photoluminescence réalisées sur des nanofils uniques ont montré une contribution spectrale en dessous de la bande interdite pour les deux échantillons, par contre les émissions au-dessus de la bande interdite liées à la présence de disques de taille plus petite, ne se trouvaient que sur l'échantillon sans la coquille environnante.
- Deuxièmement, la coquille a également un impact fort sur le transport électronique le long du nanofil fournissant un canal de fuite des électrons, mais si la coquille de GaN est absente, les électrons sont forcés à passer à travers la région multi-disques quantiques. Par conséquent, pour la première fois dans ce système, une résistance différentielle négative reproductible a été observée jusqu'à 250K.
- Troisièmement, la photoréponse provenant des nanofils libre-coquille présente une contribution sous-bande interdite liée à l'absorption interbande entre les états confinés dans les disques larges, tandis que la présence de la coquille GaN masque la contribution des disques dans l'échantillon E1857.

En ce qui concerne l'électroluminescence, deux principales contributions attribuées aux systèmes de puits axiaux et radiaux ont été observées, à faibles niveaux de courant l'injection est favorisée dans les puits axiaux, mais lorsque le courant augmente les porteurs sont plus efficacement injectés dans le système de puits radiaux. L'accordabilité de ces nanoémetteurs de lumière a été démontrée à température ambiante: les nanofils avec un taux d'indium élevé luminescent dans le vert à environ 500nm alors que la longueur d'onde d'émission des nanofils avec le plus faible taux d'indium est située autour de 400nm. Par ailleurs, les émissions d'électroluminescence correspondant au systèmes de puits radiaux sont en bon accord avec les mesures de PL, ce qui montre que l'émission de lumière provient de la recombinaison sur les couches actives, excluant ainsi la possibilité des recombinaison dans des centres non-radiatives.

Une de perspectives au delà de cette thèse est l'intégration des ensembles de nanofils verticalement alignés sur des substrats conducteurs comme le silicium afin d'améliorer l'extraction de la lumière. Les perspectives de croissance de réseaux organisés sur des substrats structurés permettront de contrôler plus efficacement les caractéristiques des LEDs à nanofils.