

Rapport d'expérience: 32 02 677

Impact de la contrainte sur des nanofils verticaux enterrés.

Participants : J. Eymery, V. Favre-Nicolin

Echantillons de: l'université de Lund.

Local contact : J.S. Micha, F. Rieutord

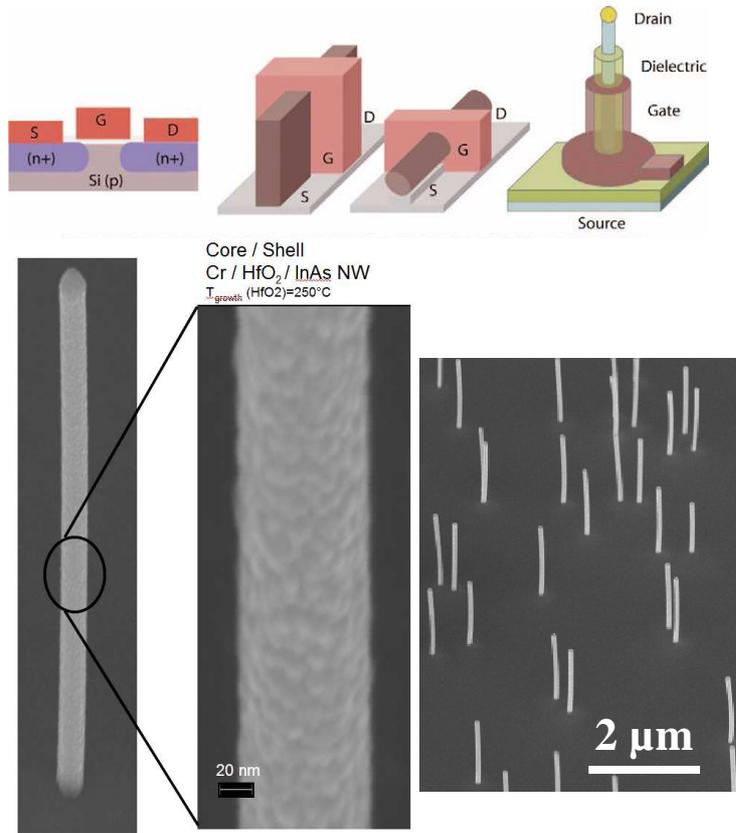


Fig. 1. En haut, exemples de différentes architectures de nanofils, et à droite, géométrie utilisée dans les nanofils verticaux, objets de cette étude. En bas, image MEB d'un nanofil : Cr / HfO₂ / InAs. A droite, image montrant l'épitaxie sur le substrat InAs

procédés technologiques. Ces deux points ont été étudiés par diffraction de rayons X en incidence rasante lors de différentes étapes technologiques de la création d'un transistor: InAs NW nus (i.e. référence), HfO₂ / InAs NWs et Cr / HfO₂ / InAs NWs (Voir Fig. 1).

La diffraction dans le plan a été effectuée en géométrie GIXRD, la qualité de l'épitaxie permettant de définir une matrice d'orientation par rapport au substrat InAs (111) cubique. Les fils d'InAs sont hexagonaux et ont des pics de diffraction dans le plan comme nous l'avons montré dans une publication précédente. Eymery07 (cf Fig. 2). Les expériences ont montrées que pour toutes les variantes étudiées, le déplacement des pics dans le plan était très faible (dans la barre d'erreur des mesures), ce qui indique une déformation faible dans le plan. Un point plus remarquable correspond à l'élargissement de ces pics de diffraction comme le montre la Figure 3 pour des balayages radiaux des réflexions h 0 0. Cet élargissement est notable surtout pour les dépôts de Cr, avec une augmentation linéaire en fonction de h. Comme le montre la figure, cette largeur est d'autant plus importante que l'incidence est rasante. L'analyse de ces données permettra d'obtenir la taille des domaines (i.e. les fils, à

Après avoir étudié les hétérostructures longitudinales de nanofils InAs/InP, Eymery07 nous avons focalisé nos études sur des structures de type coeur/coquille qui sont à la base des architectures de transistors et d'émetteurs optiques.

Cette expérience a été conduite avec des échantillons provenant de l'Université de Lund, leader dans le domaine des composés III-V (croissance CBE de L. Fröberg, groupe de L. Samuelson) et plus particulièrement sur des empilements radiaux de diélectriques et de métaux (HfO₂ et Cr) sur des fils d'InAs (111). Ces structures sont dès à présent utilisées dans des transistors verticaux Bryllert06 et donne de bonnes caractéristiques électriques. Thelander08 Un des points primordial pour ce type de structure est de ne pas rajouter de défauts en reprenant la croissance latérale et de maîtriser la contrainte introduite par les

comparer avec les images MEB) ainsi qu'une « mosaïcité » liée essentiellement au dépôt de Cr qui doit rendre les contraintes plus inhomogènes.

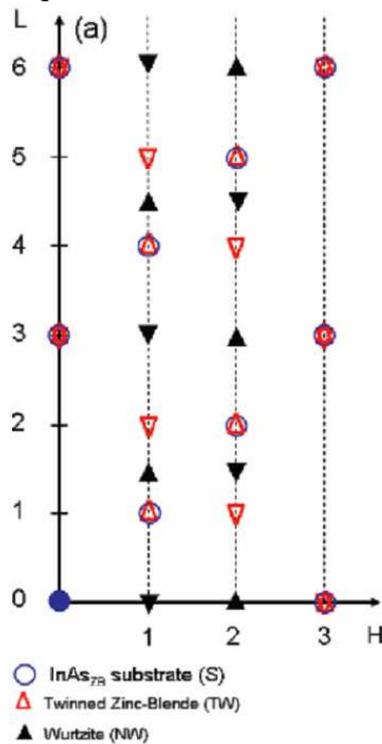


Fig. 2. Schéma du réseau réciproque. ^{Eymery07}

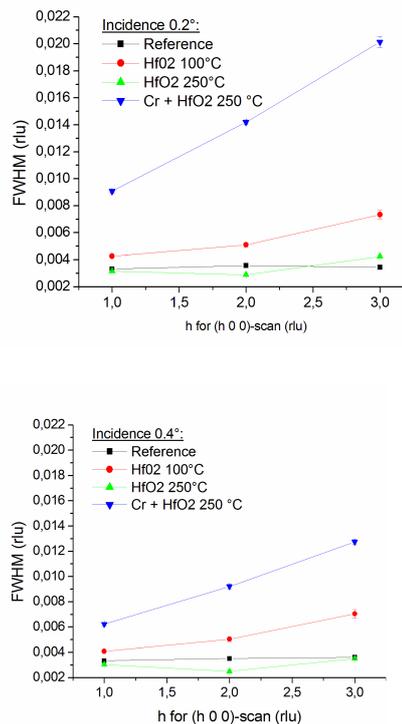


Fig. 3. Mesures des raies dans le plan $h00$ pour deux incidences.

recroissance sur le substrat et S substrat). Pour $\alpha=0.4^\circ$ et $l=4$, on voit que la position du pic du substrat est insensible au dépôt des diélectriques et du métal. Cela fournit une référence interne à l'échantillon et permet de vérifier l'alignement du goniomètre et de baisser la barre d'erreur. Ainsi, la barre d'erreur de la position du pic S est estimée à $\pm 0.065\%$ en considérant trois incidences rasantes (0.05° , 0.2° , 0.4°), deux CTRs ($(0 -1 l)$, $(0 -2 l)$), et quatre valeurs de l (1, 2, 4, 5).

Les nanofils ont des pics distincts (appelés NW) de ceux du substrat et des recroissances (TW) ce qui permet de mesurer la déformation le long de l'axe de croissance. Pour $\alpha=0.4^\circ$ et $l=4.5$, les pics NW sont faiblement déplacés pour les nanofils avec HfO_2 et beaucoup plus lorsqu'on a la coquille supplémentaire de Cr. La contraction le long de la direction de croissance est de $0.95\% \pm 0.07$ pour Cr/HfO_2 ($T=250^\circ\text{C}$)/InAs et de $0.13\% \pm 0.07$ pour HfO_2 ($T=250^\circ\text{C}$)/InAs. Des mesures similaires ont été effectuées avec des températures de dépôt de 100°C pour le HfO_2 et donnent une contraction d'environ 0.26% . Ces valeurs de déformation ne sont pas du tout négligeables et affectent les propriétés de transport. Pour nous en convaincre, le laboratoire (Y.M. Niquet dans le cadre du projet Européen NODE) a étudié des structures cœur coquille dont les conditions aux limites du problème d'élasticité sont mieux définies : *i.e.* des structures cœur/coquilles radiales en épitaxie cohérente InAs/InP. Ces calculs atomistiques et de structure électronique avec des liaisons fortes ont montrés que dans ce cas aussi, la déformation dans le plan était un ordre de grandeur plus faible que celle hors du plan. Cette déformation a pour conséquence d'augmenter la mobilité des trous par un facteur deux si le rayon de la coquille est suffisant grand (voir les rapports publics de NODE). Le problème élastique mesuré dans cette expérience est plus complexe avec la couche intermédiaire d'oxyde et la couche de Cr nanocristallisé, mais il obéit aux mêmes tendances.

D'après les mesures précédentes, la déformation radiale est faible. La déformation longitudinale a été estimée grâce à l'analyse des **tiges de troncature** ($0 -1 l$) pour les quatre échantillons. La Figure 4 présente quelques mesures pour les angles d'incidence $\alpha=0.05^\circ$ et 0.4° respectivement en dessous et au dessus de l'angle critique de réflexion totale. Comme on l'a déjà montré dans ce système, ces mesures permettent de séparer les contributions des différentes phases de l'échantillon (voir indexation sur la Figure 4: N nanofils, TW

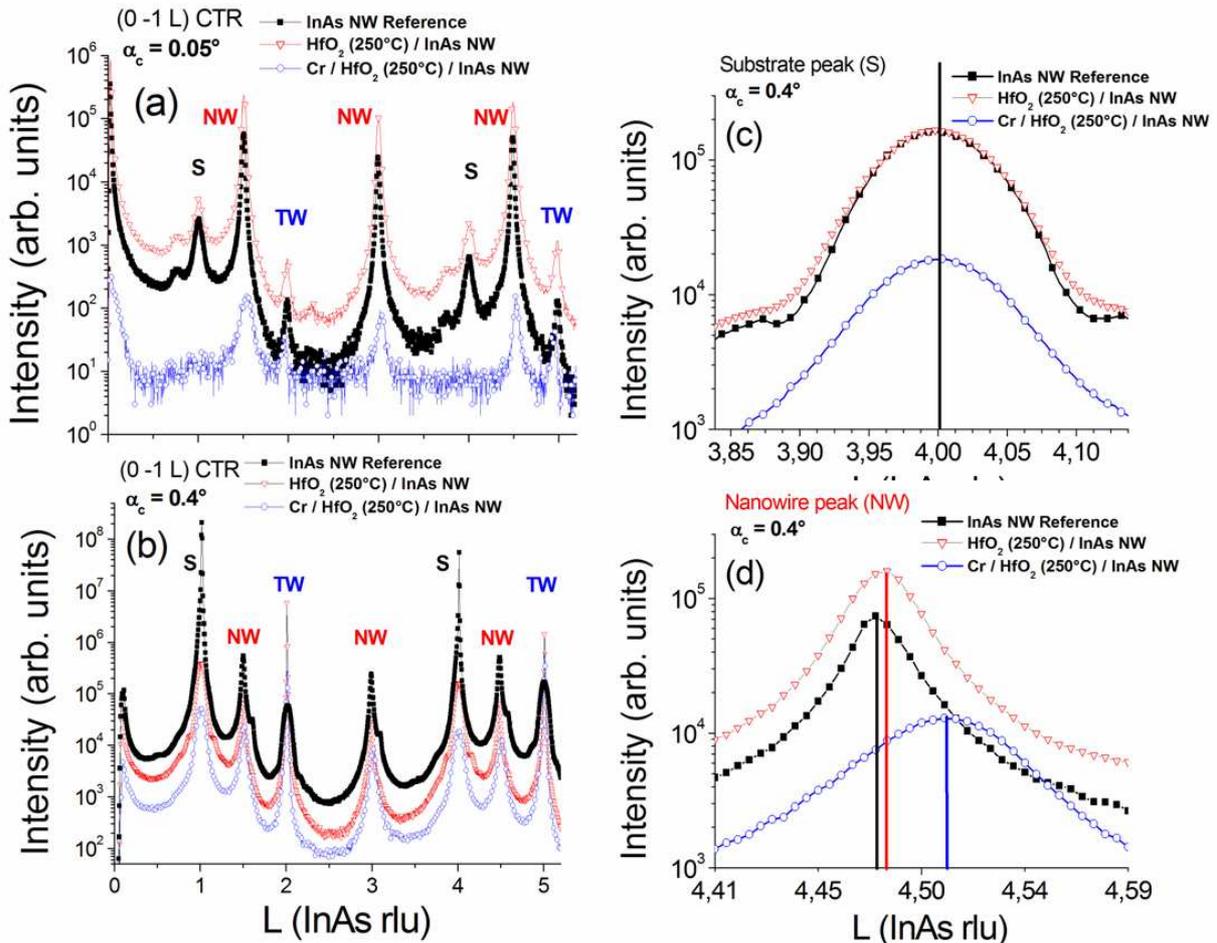


Fig. 4. Mesure des tiges de tronçatures (0 -1 l) (CTR) de la référence et des structures core/shell montrées dans la Fig. 1 pour deux incidences rasantes (a) $\alpha_c = 0.05^\circ$ and (b) 0.4° . l est l'unité du réseau réciproque (rlu) du substrat cubique InAs(111) (noté S). Zoom du pic du substrat à $l = 4$ (c) et du pic NW à $l = 4.5$ (d). Figure de la publication en cours d'écriture.

Cette expérience a aussi fait l'objet de **mesures aux petits angles** (version dégradée du GISXS de SUV) comme le montre la **Figure 5**. Ces mesures nous permettent de confirmer la forme générale des nanofils, à savoir hexagonale au départ (voir [Ref. Eymery07](#)), puis de voir une modification avec les dépôts de coquilles successives. L'analyse sera conduite avec le programme IsGISAXS pour extraire les différentes épaisseurs de dépôt. La structure avec le Cr sera la plus complexe à analyser.

Enfin, des **mesures de réflectivité** ont également été effectuées sur tous ces échantillons. La densité des fils étant faible, on a encore suffisamment de réflectivité spéculaire pour extraire l'épaisseur des dépôts bidimensionnels réalisés sur le substrat. La comparaison entre les épaisseurs radiales sur les fils et les épaisseurs 2D sera très intéressante pour estimer la sélectivité de la croissance sur le fil.

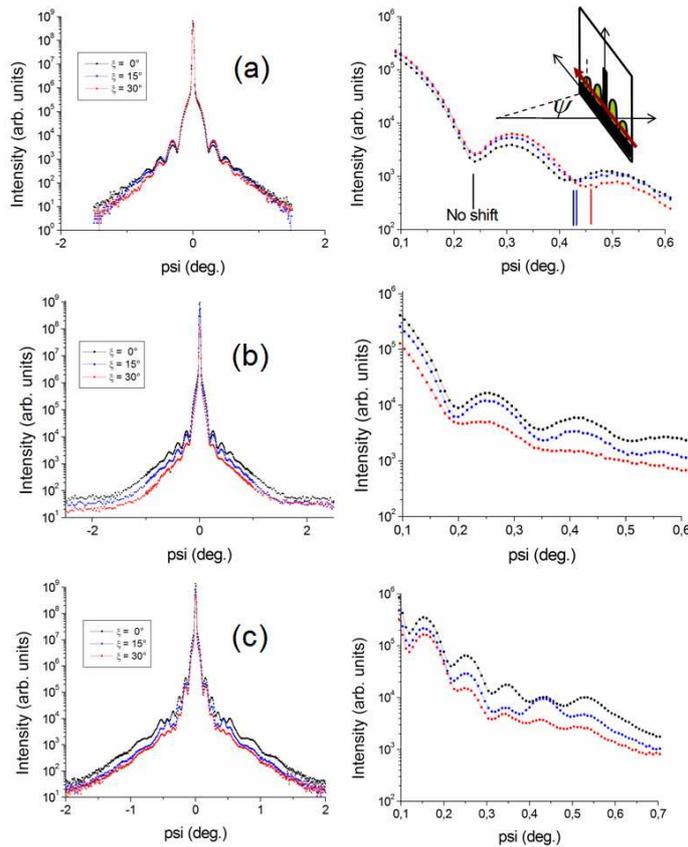


Fig. 5. Mesures aux petits angles (pour des incidences et émergences de 0.27°) pour les échantillons présentés sur la figure 1 et pour plusieurs orientations ($\xi = 0$ est perpendiculaire aux facettes de la forme hexagonale de l'échantillon).. (a) fil nu, (b) coquille HfO_2 sur référence (a) croissance à 250°C et (c) dépôt de Cr sur (b). Les courbes de droite donnent des agrandissements..

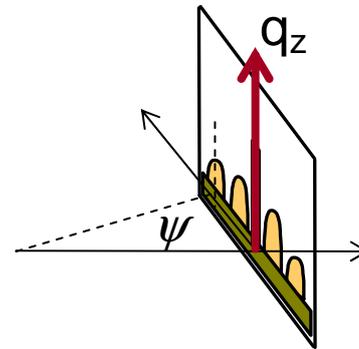
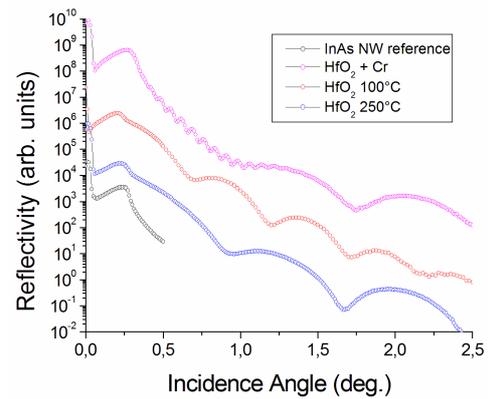


Fig. 6. Mesure de réflectivité spéculaire des différents échantillons. La courbe non terminée a entre temps été complétée. En dessous, schéma réflectivité spéculaire.

Conclusions générales:

- L'expérience s'est très bien déroulée et a donnée de nombreux résultats qui sont en cours de rédaction pour publication. Une suite sera demandée.
- Le dépôt de Cr contracte d'une façon significative le fil le long de son axe de croissance. Ce niveau de déformation doit être étudié en détail pour comprendre son impact sur les propriétés de transport.
- Les déformations dans le plan (radiales) sont beaucoup plus faibles, comme on peut l'expliquer par des calculs de déformation continues. Nous observons un élargissement des pics probablement du à l'hétérogénéité de contrainte du Cr.
- La diffusion aux petits angles et la réflectivité spéculaire ont été utilise pour accéder à la géométrie des fils et des dépôts planaires.

References

- J. Eymery, F. Rieutord, V. Favre-Nicolin, O. Robach, Y.M. Niquet, L. Fröberg, T. Mårtensson, L. Samuelson, NanoLetters **7**, 2596 (2007).
- T. Bryllert, L.-E. Wernersson, T. Löwgren, and L. Samuelson, Nanotechnology **17**, s277 (2006).
- C. Thelander, L. Fröberg, C. Rehnstedt, L. Samuelson, and L.-E. Wernersson, IEEE Electron Device Letters **29**, 206 (2008).