



Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies

Soutenance de thèse

Mercredi 31 janvier 2018

14 h – C2N, Site Orsay, Salle 44

Mariam Fakhfakh

« Développement de méthodes ex-situ de dopage de nanofils Semiconducteurs IV »

Composition du jury proposé

Rapporteur	M. Stéphane GRAUBY	LOMA
Rapporteur	M. Michel GENDRY	INL
Examineur	M. Georges BREMOND	INL
Examineur	M. Vincent SALLET	GEMaC
Examineur	M. Denis MENCARAGLIA	GeePS
Examineur	M. Laurent PICHON	IETR
Directeur de thèse	Mme. Laetitia VINCENT	C2N
Co-encadrant	M. Daniel BOUCHIER	C2N

Résumé

L'objet de cette thèse est d'étudier le dopage ex-situ de nanofils semiconducteurs IV pour des applications en électronique, spintronique ou encore thermoélectricité. Deux techniques de dopage ont été explorées : l'implantation par faisceaux d'ions et le Spin-On-Doping (SOD).

L'implantation d'ions Mn a été testée dans les nanofils de Ge avec l'objectif de synthétiser un matériau semiconducteur ferromagnétique dilué. Une concentration en Mn de quelques pourcents peut être atteinte sans amorphisation du fil ni formation de précipités, ce qui est très encourageant. Lors d'expériences d'implantation réalisées in situ dans un microscope électronique en transmission, une forte exaltation de la pulvérisation sous irradiation électronique a été constatée.

La technique SOD consiste à faire diffuser thermiquement les impuretés de type p ou n contenues une résine de type HSQ (Hydrogen silsesquioxane) qui enrobe les nanofils. Le recuit de la HSQ (dopée ou non) engendre une modification structurale des nanofils (bien que cette technique soit considérée comme non destructive). Lors du recuit, une transformation

partielle de la phase diamant 3C vers la phase hexagonale 2H, a en effet été observée dans les nanofils de Si et de Ge, au-delà de 500 et 400°C respectivement. Les paramètres essentiels de la transformation de phase sont la contrainte de cisaillement résultant de la densification de la résine et le budget thermique. Les nanofils de Ge deviennent amorphes au-delà de 650°C, ce qui interdit en pratique leur dopage par SOD.

Les caractérisations électriques ont été réalisées sur des nanofils de Si réalisés par gravure ionique réactive sur substrats orientés (111) et contactés en matrice ou individuellement. Pour le contactage de nanofils uniques en configuration NW FET (nanowire field effect transistors), un procédé technologique basé sur la lithographie électronique a dû être développé. Les difficultés à surmonter étaient relatives à la faible longueur des nanofils. Diverses techniques de caractérisation ont été mises en œuvre (I-V en configuration verticale ou horizontale de type TLM (Transient Linear Measurement), SSRM (scanning spreading resistance microscopy), EBIC (electron beam induced current)). Les mesures collectives concernent des ensembles de nanofils de type p enrobés dans une résine qu'elle soit dopante ou non. Pour observer un courant notable dans la structure, un recuit est nécessaire. Au-delà d'une température de recuit de 600°C, une polarisation négative du substrat induit un comportement conforme au mécanisme SCLC (space charge limited current) attendu pour des nanofils faiblement dopés enrobés dans une matrice isolante. En positif, on observe une caractéristique I(V) ohmique et une densité de courant jusqu'à 500 fois plus élevée dans les nanofils que dans le substrat. Ce comportement pourrait être dû à l'influence des états d'interface provenant de la technique de gravure. Cette hypothèse est confortée par le fait qu'après recuit à 900°C, le courant en direct s'explique en considérant dans les fils un dopage proche de celui du substrat, et surtout par l'observation en SSRM d'une couche conductrice interfaciale entre fils et HSQ. Elle permet aussi d'interpréter les mesures sous pointes faites sur les fils de type n. Le mode de transport SCLC a également été observé pour des nanofils individuels contactés sous pointes ou par lithographie. Ces mesures n'ont pas mis directement en évidence l'influence de la transformation de phase.

Le dopage de type n ou p par SOD s'avère efficace après recuit à 900°C. Dans ce cas, les comportements observés, contacts ohmiques et jonctions p-n, peuvent être interprétés plus simplement en considérant des niveaux de dopage supérieurs à $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ en type p et $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ en type n. Ces valeurs déduites des résistivités mesurées sont sans doute très sous-estimées.