

## **Marcin Zieliński – résumé du mémoire HdR**

### ***Elaboration de couches épitaxiales de carbure de silicium, évaluation de leurs propriétés structurales et exemples d'applications technologiques.***

Le carbure de silicium est considéré comme un matériau semiconducteur idéal pour la fabrication de dispositifs électroniques de forte puissance, capables de fonctionner à haute température et /ou en environnements hostiles. Les couches homoépitaxiées de 4H-SiC sont utilisées dans l'industrie pour la fabrication de diodes Schottky 600V et 1200V. La faisabilité des dispositifs 3, 6 et 10kV a aussi été confirmée. De l'autre côté, les propriétés mécaniques du SiC en font un candidat de choix pour les dispositifs micromécaniques, tels que différents types des capteurs ou contacteurs. Des résonateurs, à base de 3C-SiC hétéroépitaxié sur substrats de silicium en sont un exemple type.

Cependant, la croissance des films minces en carbure de silicium – homo- ou hétéroépitaxiés – est un défi complexe, en partie à cause de la gamme des températures nécessaires (1300°C-1800°C) pour fabriquer un matériau de bonne qualité. Une gestion efficace des conditions thermiques constitue ainsi un des principaux verrous technologiques dans la mise en œuvre des procédés d'épitaxie.

Le mémoire, divisé en six chapitres, décrit les caractéristiques d'un réacteur de croissance en phase vapeur adapté à la fabrication des couches de SiC, la technique d'élaboration des couches et leurs propriétés physiques et structurales. La présentation est focalisée sur l'hétéroépitaxie de 3C-SiC sur substrats silicium – un sujet considérablement plus « amont » que les développements industriels au niveau de l'homoépitaxie de 4H-SiC.

Dans le premier chapitre sont présentés les détails du procédé d'élaboration des couches minces de 3C-SiC sur silicium. Un modèle simple décrivant d'une façon très satisfaisante la thermique des réacteurs CVD est suivi des descriptions quantitatives de la cinétique de la phase de nucléation et du dépôt CVD de 3C-SiC. Ces trois modèles facilitent le transfert des procédés entre les réacteurs et simplifient la conception de nouveaux outils de croissance.

Le second chapitre est consacré aux propriétés structurales des couches de 3C-SiC sur silicium. Il résume l'ensemble des études sur la densité des fautes d'empilement (SF), domaines de double positionnement (DPD) et domaines d'antiphase (APD). Le rôle des défauts planaires dans le transport électrique est aussi évoqué dans le manuscrit.

Un effort particulièrement important a été consacré à la compréhension de mécanismes de relaxation des contraintes dans les couches de 3C-SiC orientées (100) et (111) et déposées sur les substrats silicium *on-axis* ou *off-axis*. Ces travaux, présentés dans les chapitres III et IV, permettent de mieux comprendre le rôle de la relaxation plastique de la contrainte dans le 3C-SiC. Un modèle analytique est proposé pour expliquer l'évolution de la contrainte et du gradient de la contrainte avec les conditions de l'épitaxie (température, durée, vitesse de croissance). D'autres tendances expérimentales (influence du dopage, du ratio C/Si ou des conditions de carbonisation sur la courbure des plaques) peuvent aussi être prises en compte par le modèle.

Le chapitre V est dédié à la problématique du dopage des couches de carbure de silicium. L'incorporation de deux principaux dopants, azote et aluminium, est discutée en détail. Une technique originale d'évaluation *quantitative* du dopage à partir des spectres de photoluminescence à basse température est aussi présentée.

La validation du matériau 3C-SiC hétéroépitaxié passe par son utilisation dans des projets divers. Dans le dernier chapitre sont exposés les essais de conversion de plaques de 3C-SiC/Si en matériau 3C-SiC autosupporté par épitaxie en phase liquide. Les résultats d'utilisation des plaques de 3C-SiC/Si en tant que substrat pour la croissance des nitrures et du graphène sont également montrés. Finalement, quelques exemples de réalisation des dispositifs micromécaniques illustrent l'utilité du SiC dans le domaine des MEMS.