
EPITAXIAL GROWTH AND NEAR-FIELD CHARACTERIZATION OF InSb NANOSTRUCTURES FOR ADVANCED ELECTRON DEVICES
Abstract

At the dawn of the quantum era, which promises radically new ways of processing information, III-V semiconductors — and InSb in particular — stand out as one of the most promising material for this transition. With high electron mobility, strong spin-orbit interaction, and small effective mass, InSb exhibits ideal properties for quantum applications such as Majorana-based devices, while also offering opportunities in high-performance nanoelectronics beyond quantum computing. However, the deployment to functional devices has been hampered by the strong lattice-mismatch of InSb to conventional III-V substrates, making the growth of defect-free nanostructures challenging. This thesis investigates the **Selective Area Growth (SAG)** of InSb nanostructures on both lattice-matched and highly mismatched substrates using **Molecular Beam Epitaxy (MBE)**. To enable the carrier density modulation required for quantum devices, InSb was also integrated within gated heterostructures incorporating semiconducting barriers.

This thesis work dealt with the InSb growth on lattice-matched CdTe substrates at the beginning, but technological limitations constrained the quality and scalability of the InSb nanostructures. The study then shifted to GaAs (111)_B substrates, where growth optimization yielded high crystal quality thin films and planar nanostructures with low defect density, as confirmed by cross-sectional **Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM)** and **Scanning Tunneling Microscopy (STM)**.

Following the optimized growth on GaAs (111)_B, high quality InSb thin-films and in-plane **nanowires (NWs)** were produced on low roughness GaInP buffer layers grown on GaAs under carefully optimized conditions. Through a structural and a morphological study, we then discussed the minor differences observed with the growth of InSb nanostructures on GaAs substrates. The final part of the thesis focused on electrical transport studies of the InSb/GaInP/GaAs:n+ heterostructure combining Hall measurements, **Transfer Length Method (TLM)**, and **Four-Probe Scanning Tunneling Microscopy (4P-STM)**. An effective charge density modulation inside the InSb nanostructures as well as a record-high electron mobility for InSb thin films grown on III-V mismatched substrate were demonstrated. A last comprehensive **Scanning Tunneling Spectroscopy (STS)** study revealed that precise control of surface integrity is essential to fully exploit the potential of these nanostructures.

Altogether, this work establishes a scalable route to high-quality InSb nanostructures, advancing both quantum device development and high-performance III–V nanoelectronics.

Keywords: InSb, III-V Heterostructures, Nanowires, Quantum transport, Selective Area Growth, Molecular Beam Epitaxy, Multiple-tip Scanning Tunneling Microscopy, Transport measurements

CROISSANCE ÉPITAXIALE ET CARACTÉRISATION CHAMP-PROCHE DE NANOSTRUCTURES D'INSB POUR COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES AVANCÉS**Résumé**

À l'aube de l'ère quantique, qui promet des modes de traitement de l'information radicalement nouveaux, les semi-conducteurs III-V — et en particulier l'antimoniure d'indium (InSb) — apparaissent comme des matériaux prometteurs pour contribuer à cette transition. Grâce à sa mobilité électronique élevée, son fort couplage spin-orbite et sa faible masse effective, l'InSb possède les propriétés idéales pour des applications quantiques telles que les dispositifs à base de fermions de Majorana, tout en ouvrant la voie à des applications innovantes en nanoélectronique haute performance au-delà du calcul quantique. Cependant, la mise en oeuvre de tels dispositifs fonctionnels reste freinée par le fort désaccord de maille entre l'InSb et les substrats III-V conventionnels, qui rend difficile une croissance de nanostructures exemptes de défauts. Cette thèse explore la croissance sélective de nanostructures d'InSb sur des substrats à maille accordée et fortement désaccordée, en utilisant l'épitaxie par jets moléculaires. Afin de permettre la modulation de densité de porteurs nécessaire aux dispositifs quantiques, l'InSb a également été intégré dans des hétérostructures comportant des barrières de potentiel semi-conductrices.

L'étude a porté dans un premier temps sur la croissance de l'InSb sur des substrats de tellure de cadmium (CdTe) accordés en maille, mais des limitations technologiques ont limité la qualité et la production de nanostructures d'InSb. La suite de l'étude s'est alors orientée vers l'utilisation de substrats d'arseniure de gallium (GaAs) orientés selon la direction $(111)_B$, où l'optimisation des paramètres de croissance a permis d'obtenir des couches minces et des nanostructures planaires de haute qualité cristalline avec une faible densité de défauts, confirmées par des analyses en microscopie électronique en transmission ainsi qu'en microscopie à effet tunnel.

À la suite de l'optimisation de la croissance d'InSb sur GaAs $(111)_B$, des couches minces et des nanofils d'InSb de haute qualité ont été réalisés sur des couches tampons de phosphure de gallium-indium à faible rugosité, elle-même épitaxiée sur substrat GaAs dans des conditions optimisées. Une étude structurale et morphologique a permis de discuter les différences mineures observées par rapport à la croissance des nanostructures d'InSb directement sur GaAs. La dernière partie de la thèse a été consacrée à l'étude des propriétés de transport électrique de l'hétérostructure InSb/GaInP/GaAs dopé n, en combinant des mesures de Hall, la méthode des longueurs de transfert et la microscopie à effet tunnel à quatre pointes. Une modulation efficace de la densité de porteurs à l'intérieur des nanostructures d'InSb, ainsi qu'une mobilité électronique record pour des couches minces d'InSb épitaxiées directement sur substrats III-V désaccordés, ont été démontrées. Enfin, une étude par spectroscopie à effet tunnel a révélé que le contrôle précis de l'état de surface est essentiel pour exploiter pleinement le potentiel de ces nanostructures.

Dans l'ensemble, ce travail établit une base fondamentale vers la production de nanostructures d'InSb de haute qualité, utile à la fois pour le développement de dispositifs quantiques et la nanoélectronique III-V haute performance.

Mots clés : InSb, Hétérostructures III-V, Nanofils, Transport quantique, Croissance Sélective, Epitaxie par Jets Moléculaires, Microscopie à effet tunnel à pointes multiples, Transport électronique
