

Master or Engineer internship 2022-2023

Proposed by : Sylvain Bollaert – Nicolas Wichmann – Xavier Wallart

Phone number : 03 20 19 78 58

E-mail : sylvain.bollaert@univ-lille.fr

Research group : ANODE - EIPHY

Title : InSe-based transistors (InSeT)

L'étude des matériaux 2D (2DMs) a connu un intérêt grandissant depuis la découverte du graphène en 2004 [1], primée par un prix Nobel en 2010. Les 2DMs offrent des propriétés uniques principalement liées à leur structure cristallographique composée de couches faiblement couplées constituées de quelques plans atomiques (1 à 4) dans lesquels les atomes sont liés de manière covalente. Cette structure particulière entraîne l'absence de liaisons pendantes en surface et permet donc la formation d'hétérostructures reposant sur de nombreuses possibilités de combinaisons de matériaux qui ne nécessitent pas d'adaptation de paramètre de maille et rend possible une intégration sans contrainte. Parmi les 2DMs, les chalcogénures associant un atome métallique et un atome chalcogène (S, Se ou Te) sont particulièrement intéressants car, contrairement au graphène, ils présentent des bandes interdites significatives dans la gamme de 0,5 à 2 eV et une variété d'alignements de bandes. De plus, leur bande interdite peut changer de nature et être modulée en fonction de l'épaisseur. Ces propriétés font des chalcogénures des candidats prometteurs pour de nombreuses applications, notamment les dispositifs électroniques et photoniques, la spintronique, le grappillage d'énergie et les sources quantiques. L'InSe fait partie de ces matériaux. En monocouche, il présente une bande interdite indirecte de 2.2eV qui devient directe à partir de quelques monocouches et tend vers une valeur de 1.26eV en volume. Cette bande interdite directe offre des possibilités d'applications optoélectroniques dans la gamme du visible à l'infrarouge, avec une meilleure photo réponse que le Graphène ou le MoS₂. InSe peut également s'avérer prometteur pour les dispositifs THz, la fabrication de Memristor, la thermoélectricité. Pour les applications électroniques, une mobilité de 2000cm²/V.s a été mesurée et un rapport I_{ON}/I_{OFF} de 10³ a été atteint sur un transistor à effet de champ, ce qui en fait un candidat intéressant pour la fabrication de transistors. Néanmoins, jusqu'à présent, la plupart des dispositifs ont été réalisés à partir de flocons exfoliés et aucune caractérisation des performances en fréquence n'a été reportée à ce jour.

L'objectif de ce projet est d'explorer les potentialités du matériau InSe pour des applications électroniques. Il vise la détermination des propriétés physico-chimiques de matériaux InSe puis la réalisation technologique par des techniques de fabrication d'un transistor de type MOS à canal InSe avec une caractérisation électrique complète en DC et haute fréquence. Deux sources de matériaux pourront être explorées : par exfoliation et/ou par croissance. La croissance sera réalisée par épitaxie par jets moléculaires dans le réacteur dédié au chalcogénures récemment installé à l'IEMN. Un accent particulier sera mis sur la qualité cristalline des couches et interfaces obtenues en fonction des conditions de croissance. À cette fin, elles seront caractérisées de manière approfondie afin d'évaluer : *i*) leur morphologie par microscopie à force atomique (AFM) et microscopie électronique à balayage (SEM) ; *ii*) leur cristallographie et leur caractère 2D par spectroscopie Raman, diffraction d'électrons et de rayons X (XRD) et *iii*) leurs propriétés électroniques par spectroscopies électroniques X et UV (XPS/UPS). Des caractérisations complémentaires, notamment par microscopie électronique à transmission (TEM), seront également envisagées si nécessaire. Enfin, des mesures par effet Hall avec contacts non optimisés seront menées sur les meilleures couches pour une première détermination de la densité de porteurs et de la mobilité électronique.

Le développement des procédés technologiques commencera par la réalisation des contacts ohmiques de source et de drain : choix du métal, préparation de surface, recuit et caractérisation électrique voire physico-chimique par photoémission X. La seconde étape visera la réalisation du contact de grille dont l'élément principal est l'oxyde.

The study of 2D materials (2DMs) has seen a growing interest since the discovery of graphene in 2004, which won a Nobel Prize in 2010. 2DMs offer unique properties mainly related to their crystallographic structure composed of weakly coupled layers consisting of a few atomic planes (1 to 4) in which the atoms are covalently bonded. This particular structure results in the absence of dangling bonds on the surface and therefore allows the formation of heterostructures based on numerous possibilities of material combinations that do not require adaptation of the lattice parameter and makes possible integration without constraint. Among the 2DMs, chalcogenides associating a metal atom and a chalcogen atom (S, Se or Te) are particularly interesting because, unlike graphene, they have significant bandgaps in the range of 0.5 to 2 eV and a variety of band alignments. In addition, their band gap can change in nature and be modulated according to the thickness. These properties make chalcogenides promising candidates for many applications, including electronic and photonic devices, spintronics, energy harvesting, and quantum sources. InSe is one of these materials. In monolayer, it has an indirect band gap of 2.2eV which becomes direct from some monolayers and tends towards a value of 1.26eV in volume. This direct band gap offers optoelectronic application possibilities in the range from visible to infrared, with a better photoresponse than Graphene or MoS₂. InSe may also show promise for THz devices, Memristor manufacturing, thermoelectricity. For electronic applications, a mobility of 2000cm²/V.s was measured and an I_{ON}/I_{OFF} ratio of 10³ was achieved on a field-effect transistor, making it an interesting candidate for transistor fabrication. However, until now, most devices have been made from exfoliated flakes and no frequency performance characterization has been reported to date.

The objective of the work is to explore the potential of the InSe material for electronic applications. It aims at the determination of the physico-chemical properties of InSe materials and then the technological realization by manufacturing techniques of an InSe channel MOS type transistor with a complete electrical characterization in DC and high frequency. Two sources of materials can be explored: by exfoliation and/or growth.

Growth will be achieved by molecular jet epitaxy in the chalcogenide reactor recently installed at the IEMN. Particular emphasis will be placed on the crystal quality of the layers and interfaces obtained according to the growing conditions. To this end, they will be characterized in order to evaluate: *i*) their morphology by atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM); *ii*) their crystallography and 2D character by Raman spectroscopy, electron and X-ray diffraction (XRD) and *iii*) their electronic properties by X-ray and UV electron spectroscopy (XPS/UPS). Further characterizations, including transmission electron microscopy (TEM), will also be considered if necessary. Finally, Hall effect measurements with non-optimized contacts will be conducted on the best layers for a first determination of carrier density and electronic mobility.

The development of technological processes will begin with the realization of source and drain ohmic contacts: choice of metal, surface preparation, annealing and electrical or even physico-chemical characterization by X-ray photoemission. The second step will aim to achieve the gate contact whose main element is the oxide.