

**TITRE DU SUJET DE THÈSE** :Vers un laser germanium utilisant le Ge dopé-n et contraint en tension.

**DIRECTEUR DE THÈSE** :(Moustafa El Kurdi, e-mail: moustafa.el-kurdi@u-psud.fr)

**ÉQUIPE D'ACCUEIL** (groupe Boîtes Quantiques et Nanostructures Photoniques département NAEL (Nanophotonique et Électronique ultra-rapide) : IEF, UMR 8622) :

### **DESCRIPTIF ET APPORT DU TRAVAIL DE THÈSE :**

#### **- Contexte de la recherche**

La réalisation de sources optiques émettant aux longueurs d'ondes des télécommunications optiques et intégrées dans la filière silicium est limitée par le faible taux de recombinaison radiatif dans les matériaux à bande interdite indirecte tels que le silicium et le germanium. Des efforts récents ont été effectués à l'IEF sur l'utilisation de nanostructures SiGe, à confinement électronique combinées à des cavités optiques ultra-résonnantes afin de renforcer les rendements d'émission autour de  $1,55\mu\text{m}$  de longueur d'onde[1]. Des recherches sont menées actuellement sur l'utilisation du germanium pur comme source optique en utilisant les transitions en bande directe du germanium à  $1,55\mu\text{m}$  de longueur d'onde et situées à  $0,14\text{ eV}$  au dessus des transition indirectes. Plus particulièrement l'utilisation de substrats de type GeOI (germanium-on-insulator) obtenus par une collaboration avec STMicroelectronics nous ont permis de mettre en évidence le couplage entre l'émission en bande interdite directe du germanium et des modes de cavités à cristaux photoniques[2]. Ces cavités ont été fabriquées à partir de substrat GeOI à l'IEF au sein de la centrale de technologie universitaire CTU. Parallèlement à ces recherches expérimentales notre équipe poursuit des travaux théoriques permettant de décrire la structure de bande du germanium utilisant un formalisme  $\mathbf{k},\mathbf{p}$  incluant l'effet de la déformation sur le cristal de germanium. Il est montré que lorsqu'on applique une contrainte en tension sur le germanium et plus particulièrement une contrainte biaxiale le matériau devient à bande interdite directe si cette déformation dépasse typiquement 1,9%. Ces travaux ainsi que ceux effectués par d'autres équipes de recherches [3] tendent à montrer qu'il est possible d'obtenir du gain optique et en principe de réaliser une source laser avec du germanium[4]. Concernant les projets financés sur ces recherches, une convention du ministère de l'industrie avec STMicroelectronics (Nano2012) est en cours et un projet du triangle de la physique (RTRA: GAIN) a démarré en novembre 2008. L'objectif est de poursuivre les recherches sur l'utilisation du germanium pour réaliser une source optique efficace, idéalement une source laser.

#### **- Bref descriptif scientifique et pré requis**

L'objectif de la thèse est d'étudier les propriétés optiques du germanium contraint en tension et à fort dopage-n en vue de réaliser une source laser. L'étude devrait être principalement expérimentale avec une part théorique qui sera fonction de la motivation du candidat. La contrainte en tension du germanium peut être obtenue grâce à des procédés de dépôt chimique en phase vapeur aux organo-métalliques (Collab. LPN projet GAIN) du Ge sur un substrat d'InP, celui-ci présentant un paramètre de maille (distance inter-atomique) plus élevé que celui du Ge. Dans ce cas, le germanium déposé a un paramètre de maille adapté à celui de l'InP et se trouve ainsi en tension à 3.6 % , tension suffisante pour que le germanium présente une bande interdite directe.

Il a été observé récemment que le dopage-n du germanium contribue à renforcer son rendement d'émission même s'il ne présente pas de bande interdite directe (contrainte en tension insuffisante voir inexistante ). Ce dopage-n peut être obtenu par GILD (Gas Immersion Laser doping ) comme nous le faisons actuellement à l'IEF en collaboration avec l'équipe SiGeC, ou par des techniques d'implantation ionique ou d'incorporation in situ. Dans un premier temps nous chercherons les conditions expérimentales de contrainte et de dopage-n conduisant à l'obtention du gain optique dans le Ge, puis nous les appliquerons sur des structures à fort confinement optique afin de montrer l'émission laser.

#### **- Compétences acquises lors du travail de thèse**

Lors de sa thèse le candidat sera amené à travailler en autonomie sur des outils expérimentaux incluant ceux de la Centrale Universitaire de Technologie pour la fabrication de dispositifs photoniques.

[1] M. El Kurdi, X. Checoury, S. David, T.-P. Ngo, N. Zerounian, P. Boucaud. *Quality factor of Si-based photonic crystal L3 nanocavities probed with an internal source*, Opt. Express **16**, 8780 (2008).

[2] T.P. Ngo, M. El Kurdi, X. Checoury, P. Boucaud, J. F. Dalemcourt, O. Kermarrec, and D. Bensahel. *Two-dimensional photonic crystals with germanium on insulator obtained by a condensation method*, Appl. Phys. Lett. **93**, 241112 (2008)

[3] J. Liu, X. Sun , D. Pan X. Wang, L. C. Kimerling T. L. Koch and J. Michel. *Tensile-strained, n-type Ge as a gain medium for monolithic laser integration on Si*. Opt. Express, **15**, 11272 (2007).

[4] M. El Kurdi, G. Fishman, S. Sauvage, P. Boucaud, *Band structure and optical gain of tensilely-strained germanium obtained with a 30 band  $\mathbf{k},\mathbf{p}$  formalism*, soumis à Phys. Rev. B

