



# Soutenance de thèse

Jeudi 27 avril  
10h00 – Amphithéâtre

Silicium supraconducteur ultra-dopé par laser :  
du matériau aux dispositifs  
*Laser doped superconducting silicon :  
from the material to the devices*

**Léonard DESVIGNES**

**Francesca Chiodi**  
Directrice de thèse

## Jury members :

Kamran Behnia (rapporteur)  
Nikolay Cherkashin (rapporteur)  
Ulf Genser (examineur)  
Sébastien Kerdilès (examineur)  
Claire Marrache-Kikuchi (examinatrice)  
Hervé Aubin (examineur)

## Abstract :

Communément connue dans les métaux, la supraconductivité peut également apparaître dans les semi-conducteurs du groupe IV. Le silicium dopé au bore (SiB), l'un des matériaux les plus courants dans l'industrie des semi-conducteurs, présente une telle phase à condition que la quantité de dopants actifs  $n_B$ , les atomes de B qui participent à la conduction, soit supérieure à une concentration seuil  $n_s \sim 2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Cette concentration seuil pour la supraconductivité est largement supérieure au seuil de solubilité du B dans le Si solide (c-Si),  $n_{sol} \sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Pour atteindre une telle concentration (active)  $n_B$ , il est possible d'exploiter le dopage laser nanoseconde hors équilibre, et plus exactement le Gas Immersion Laser Doping (GILD), ouvrant la voie à une nouvelle génération de dispositifs supraconducteurs tout faits de Si. Cependant, le dopage important nécessaire pour atteindre la phase supraconductrice induit des changements importants dans les propriétés du matériau. Cette thèse a pour objectif de comprendre les propriétés supraconductrices avec le dopage et la structure des couches dopées par GILD, et de tirer profit de ces connaissances pour optimiser les propriétés supraconductrices et les performances des dispositifs. Nous étudions en premier lieu l'évolution des propriétés électriques (mesures d'effet Hall et de résistivité) et structurales (XRD, STEM) de nos couches avec le dopage. Nous démontrons que les atomes B forment des paires, électriquement inactives, induisant une réduction du taux d'activation. La concentration de ces paires et son augmentation avec la quantité totale de dopants  $C_B$  ont pu être prédites à l'aide d'un modèle probabiliste simple. En parallèle, l'évolution de la déformation est observée : à faible dopage, la couche de SiB s'adapte parfaitement au réseau cristallin du Si avec une déformation maximale hors plan  $\epsilon_{\perp} = -3.7\%$  qui évolue linéairement avec  $C_B$ , suggérant que tous les dopants sont en substitution. À des concentrations plus élevées ( $\sim 3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), une relaxation partielle de la déformation a lieu en même temps que l'apparition de défauts cellulaires. La coïncidence de ces deux phénomènes est attribuée à un changement de régime de croissance : la surfusion constitutionnelle.



Ces études nous permettent d'établir des diagrammes de phase, que nous comparons aux propriétés structurales et de transport. Notamment, ces études nous permettent de démontrer que l'apparition de la phase supraconductrice coïncide avec l'apparition de la phase relaxée. Nous avons décrit avec succès l'augmentation de  $T_c$ , qui atteint **900mK**, avec le dopage actif dans le cadre de la théorie BCS dans le régime de couplage intermédiaire. Nous avons réalisé des jonctions Supraconducteur/ Semiconducteur dopé où deux contacts supraconducteurs de SiB sont séparés par un canal Si ( $\sim 100$  nm) dopé ( $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) couplé à une grille, dans le but de réaliser un transistor Josephson supraconducteur avec modulation du supercourant. Les JoFETs en silicium réalisés à partir de contacts supraconducteurs métalliques sont limités par la transparence de l'interface SN, généralement de l'ordre de  $R_{\text{int}} A \sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , ce qui supprime l'effet de proximité. Au contraire, nous avons démontré une résistance d'interface extrêmement faible  $R_{\text{int}} A \sim 10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , dans les contacts Si/SiB, permettant l'établissement d'un effet de proximité à longue portée. Nous étudions notamment l'évolution du courant critique  $I_c(T)$  de ces jonctions.

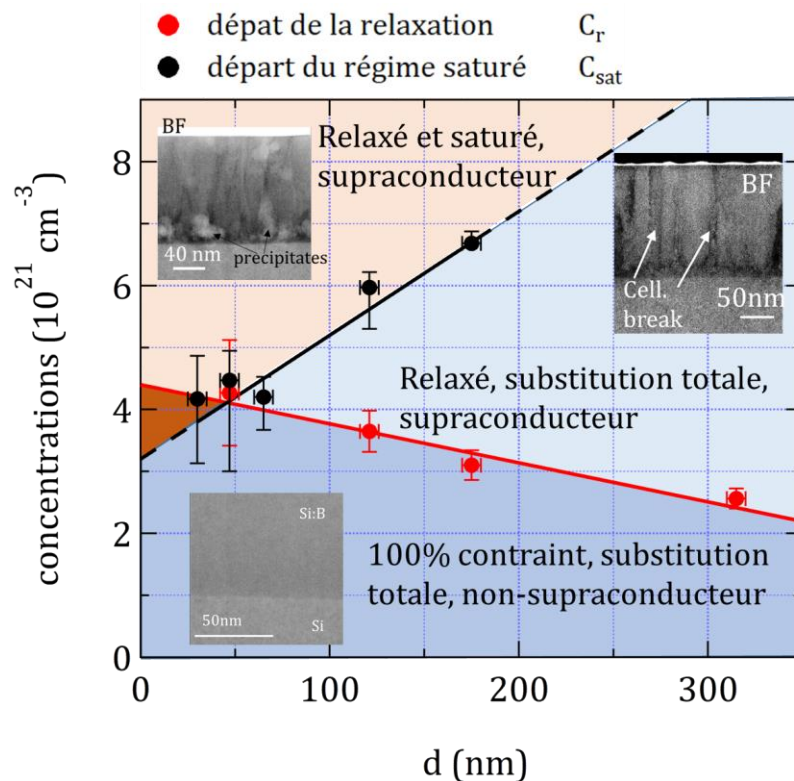


Figure : Diagramme de phase du SiB ultra-dopé par dopage laser nanoseconde hors équilibre. Les propriétés électriques, structurales et supraconductrices ont été étudiées sur plusieurs séries de couche dopées en profondeur, à différentes conditions de concentrations. Trois régimes de dopage sont mis en évidence. 1 - A faible concentration, les couches épitaxiées reprennent bien la maille cristalline du substrat et la couche est complètement contrainte et ne présentent pas de défauts cristallins ou de dopage. Pour ces conditions de dopage, la supraconductivité n'est pas observée. 2 - A plus fortes concentrations ( $3.4 \pm 0.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , voir la ligne rouge), on observe une coïncidence des relaxations de contrainte et de la phase supraconductrice. Des défauts cellulaires apparaissent notamment au sein de la couche. 3 - Au-delà d'une certaine concentration,  $5.5 \pm 1.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  (ligne noire), l'ensemble des propriétés électriques (concentration active, résistivité), structurale (déformation de la maille) et supraconductrices saturent. On observe simultanément l'apparition d'agrégats de B en fond de couche.