



**HAL**  
open science

## Croissance hétérogène de semi-conducteurs III-V sur silicium : vers l'optoélectronique sur silicium

Charles Cornet, Antoine Létoublon, Weiming Guo, Alexandre Bondi, Soline Richard, Tony Rohel, Nicolas Chevalier, Olivier Dehaese, Karine Tavernier, Mathieu Perrin, et al.

### ► To cite this version:

Charles Cornet, Antoine Létoublon, Weiming Guo, Alexandre Bondi, Soline Richard, et al.. Croissance hétérogène de semi-conducteurs III-V sur silicium : vers l'optoélectronique sur silicium. Séminaire PONANT 2010, Jul 2010, Rennes, France. pp.9-11. hal-00504506

**HAL Id: hal-00504506**

**<https://hal.science/hal-00504506>**

Submitted on 21 May 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## CROISSANCE HETEROGENE DE SEMI-CONDUCTEURS III-V SUR SILICIUM : VERS L'OPTOELECTRONIQUE SUR SILICIUM

**Charles Cornet, Antoine Létoublon, Weiming Guo, Alexandre Bondi, Soline Boyer-Richard, Tony Rohel, Nicolas Chevalier, Olivier Dehaese, Karine Tavernier, Mathieu Perrin, Jean-Marc Jancu, Olivier Durand, Nicolas Bertru, Jacky Even, Slimane Loualiche, Hervé Folliot et Alain Le Corre**

*Université Européenne de Bretagne, Insa, 35000 Rennes  
CNRS, UMR 6082 Foton, Insa, CS 70839, 35708 Rennes  
charles.cornet@insa-rennes.fr*

### RÉSUMÉ

L'intérêt d'une croissance hétérogène cohérente et monolithique de semiconducteurs III-V sur substrat de silicium est exposée au regard des composants optoélectroniques visés. Les derniers développements sur la croissance cohérente de GaP sur silicium, et des possibles émetteurs optiques seront présentés.

**MOTS-CLEFS :** *croissance MBE ; photonique ; silicium ; semiconducteurs III-V.*

### 1. INTRODUCTION

Depuis la démonstration du premier transistor [1] et de la première conversion photovoltaïque, [2] le silicium a été l'objet de nombreuses études durant le XXème siècle, au point de devenir le matériau incontournable pour toute l'industrie des puces à semi-conducteurs et du secteur photovoltaïque. Malgré ces efforts, les propriétés optiques de ce semi-conducteur restent intrinsèquement limitées par son gap indirect. Ainsi, le développement d'émetteurs optiques sur silicium permettrait en particulier une communication optique inter et intra-puces, qui augmenterait d'une part les capacités d'intégration, et d'autre part les débits de traitement de l'information. [3] L'approche développée dans notre laboratoire propose dans un premier temps le développement de la croissance hétérogène et cohérente de GaP sur silicium, puis dans un deuxième temps le développement d'un émetteur optique sur GaP.

### 2. CROISSANCE HETEROGENE DE SEMICONDUCTEURS III-V SUR SI

Faire croître des semiconducteurs III-V sur silicium permet de combiner les bonnes propriétés optiques de ceux-ci et la technologie des composants bien maîtrisée sur substrat de silicium. Toutefois, pour assurer un fonctionnement optimum des composants (seuils lasers, durée de vie, etc ...) développés dans ce système, il faut pouvoir assurer une bonne qualité d'interface entre le silicium et le matériau III-V choisi. En particulier, il est donc nécessaire de pouvoir garantir une croissance cohérente, et éviter les défauts dus au désaccord de paramètre de maille cristallin. Le choix du matériau GaP permet d'assurer un faible désaccord de paramètre de maille sur substrat de silicium (~0.36 %) et donc de limiter ce type défauts. Pour autant, le problème de la croissance cristalline hétérogène n'est pas complètement résolu, puisqu'il reste les défauts classiques de croissance : fautes d'empilements cristallines, et micro-rotations du cristal. Enfin, la croissance cristalline hétérogène d'une maille de type Zinc-Blende sur une maille de type diamant génère un nouveau type de défauts : les domaines d'anti-phase. En effet, dans certaines zones du cristal, les atomes de phosphore se substituent à ceux de gallium et inversement (cf. figure 1(b) et 1(c)). [4] Pour étudier les mécanismes de croissance cristalline permettant d'éviter ou non la génération de ces défauts, différents modes de croissance sont mis en œuvres par épitaxie par jets moléculaires (MBE). En particulier, un mode de croissance de type « Migration Enhanced Epitaxy » (MEE) basse température est étudié. Les structures étudiées sont composées de 20 nm de

GaP/Si. Une analyse complète de la structure cristalline peut alors être menée à partir de cartographies de l'espace réciproque par diffraction de rayons X autour des réflexions (002), (004) et (006), et de caractérisations de l'état de surface par microscopie à force atomique (AFM). La figure 1 (a) représente une cartographie réalisée sur un échantillon (MEE). La tâche associée au GaP alignée verticalement sur celle associée au Si démontre une croissance cohérente de GaP sur Si. Par comparaison avec une croissance standard, le nombre de défauts est réduit par MEE.

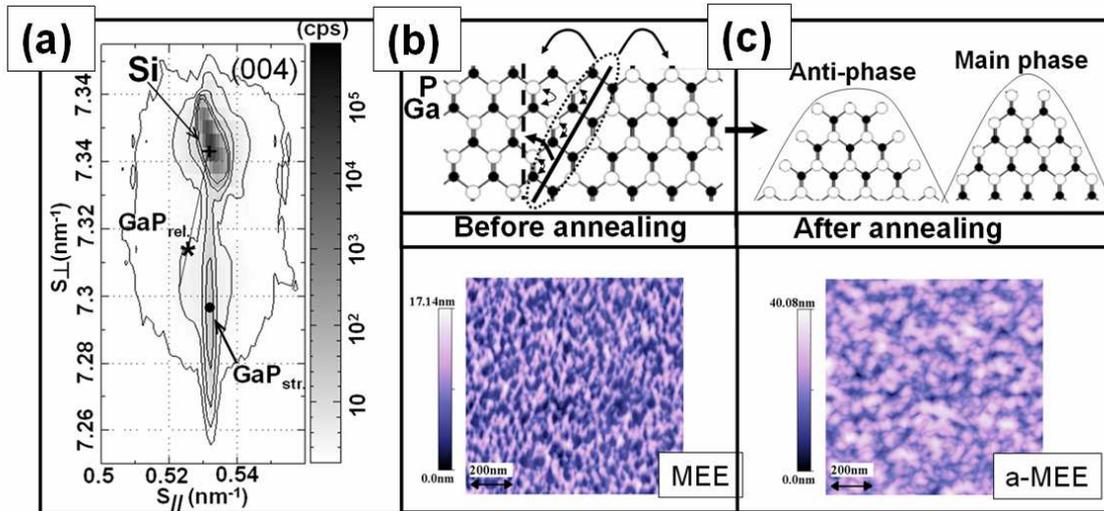


Fig. 1 : (a) cartographie de l'espace réciproque par diffraction de rayons X autour de la réflexion (004) montrant une croissance cohérente de 20 nm de GaP sur Si. Structure cristalline et image par microscopie à force atomique d'échantillons de 20 nm de GaP sur Si, montrant l'évolution de la structure (b) avant recuit et (c) après recuit. Les domaines d'antiphase modifient l'équilibre thermodynamique.

Une analyse plus poussée des cartographies démontre également, par un élargissement spécifique des réflexions faibles, que l'état cristallin est fortement modifié par un recuit supplémentaire de la structure, avec de plus une augmentation surprenante de la rugosité de surface. Ceci est interprété comme une modification de l'équilibre thermodynamique induite par les parois d'antiphase (fig. 1(b) et fig. 1(c)).[5] En effet, les parois d'anti-phase constituées de liaisons Ga-Ga ou P-P sont moins stables que le reste du cristal. Ceci favorise une redistribution des atomes impliqués contribuant à former des amas cristallins en anti-phase l'un avec l'autre. Une optimisation de la croissance passe alors par une croissance à suffisamment basse température pour éviter la migration induite par les parois d'antiphase, mais suffisamment haute pour garantir le moins de fautes d'empilements possible. L'épitaxie par jets moléculaires (MBE) semble donc être une technique prometteuse pour optimiser le régime de croissance MEE. Il faut toutefois garantir que la surface de silicium de départ soit suffisamment bien préparée. Pour cela, le laboratoire vient d'acheter dans le cadre du projet PONANT un tout nouveau bâti de type LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition), connecté sous ultra-vide au bâti MBE à source solide existant, formant ainsi un ensemble pour la croissance III-V-Si inédit en France qui sera présenté ici. Dans le même temps, des efforts ont été réalisés pour étudier les émetteurs optiques possibles à base de semi-conducteurs III-V sur GaP.

### 3. EMETTEURS OPTIQUES POUR LA PHOTONIQUE SUR SILICIUM

Dans la structure finale envisagée (DEL ou laser), il faut développer à la fois une jonction p-n et une zone active sur GaP. La croissance de puits quantiques GaAsP/GaP est développée au laboratoire. Ces puits quantiques présentent une photoluminescence à température ambiante.[6]

La maîtrise des dopages dans le GaP permet ainsi d'obtenir une diode électroluminescente GaAsP/GaP fonctionnant à température ambiante. (figure 2)

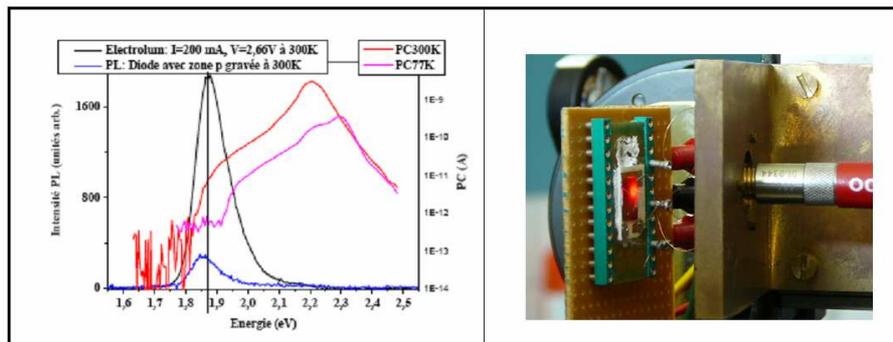


Fig. 2 : Photocourant, photoluminescence et électroluminescence d'une DEL GaAsP/GaP

Afin d'explorer d'autres longueurs d'onde, d'autres structures sont également développées à base de boîtes quantiques essentiellement. En particulier, les matériaux induisant un désaccord de maille avec le GaP à base d'InAs, d'InP, ou de GaAs constituent des systèmes intéressants pour la croissance de nanostructures.[7] Enfin, le laboratoire a récemment fait l'acquisition d'une cellule permettant l'incorporation d'azote dans ces structures. L'incorporation d'azote doit permettre d'une part d'obtenir un alliage GaPN en accord de maille parfait sur silicium, et d'autre part de rendre le gap du GaP direct afin d'obtenir un confinement électronique des porteurs dans la zone active qui sera réalisée par dessus. Les résultats préliminaires indiquent qu'une faible proportion d'azote incorporé suffit à renforcer considérablement l'efficacité de photoluminescence du GaP. Des perspectives sont donc à envisager avec l'utilisation de l'azote.

### CONCLUSION

Il est montré ici que la croissance hétérogène de GaP sur Si entraîne des défauts d'antiphase qui modifient l'équilibre thermodynamique de la matière. Un compromis sur la température de croissance doit donc être trouvé afin d'optimiser les conditions de croissance. Une DEL à base de puits quantiques GaAsP/GaP est également présentée à température ambiante. Des perspectives sur l'utilisation des nanostructures pour la photonique sur silicium sont finalement données.

### REFERENCES

- [1] J. Bardeen and W. H. Brattain, "The transistor: a semiconductor triode," *Phys. Rev.*, vol. 74, pp. 230, 1948.
- [2] D. M. Chapin, C.S. Fuller and G.L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, pp. 676, 1954.
- [3] G. T. Reed, "The optical age of Silicon," *Nature*, vol. 427, pp. 595, 2004.
- [4] Y. Takagi, H. Yonezu, K. Samonji, T. Tsuji, and N. Ohshima, "Generation and suppression process of crystalline defects in GaP layers grown on misoriented Si(100) substrates," *J. Cryst. Growth*, vol. 187, pp. 42, 1998.
- [5] W. Guo, A. Bondi, C. Cornet, A. Létoublon, O. Durand, T. Rohel, S. Boyer-Richard, N. Bertru, S. Loualiche, J. Even and A. Le Corre, "Anti-phase domain thermodynamics in GaP epilayers grown on Silicon substrate," *J. Appl. Phys.*, soumis.
- [6] A. Bondi, W. Guo, L. Pedesseau, S. Boyer-Richard, H. Folliot, N. Chevalier, C. Cornet, A. Létoublon, O. Durand, C. Labbé, M. Gicquel, A. Le Corre, J. Even, S. Loualiche and A. Moreac, "Light emitting diodes on silicon substrates: preliminary results" *phys. stat. sol. (c)*, vol. 6, pp. 2212, 2009.
- [7] W. Guo, A. Bondi, C. Cornet, H. Folliot, A. Létoublon, S. Boyer-Richard, N. Chevalier, M. Gicquel, B. Alshawa, A. Le Corre, J. Even, O. Durand and S. Loualiche, "First step to Si photonics: synthesis of quantum dots light-emitter on GaP substrate by MBE" *phys. stat. sol. (c)*, vol. 6, pp. 2207, 2009.