

Les diodes lasers à base de boîtes quantiques auto-assemblées de InAs/GaAs pour les télécommunications optiques

D. Guimard^{1,2}, J. Tatebayashi², M. Nishioka², T. Yang², S. Tsukamoto² and Y. Arakawa²

¹*LIMMS/CNRS-IIS*, ²*Nanoelectronics Collaborative Research Center
University of Tokyo, Institute of Industrial Science
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan
E-mail: dguimard@iis.u-tokyo.ac.jp*

Introduction

La réalisation de boîtes quantiques auto-assemblées, nanostructures dans lesquelles l'électron est confiné dans les trois directions de l'espace permet d'envisager l'élaboration de diodes laser pour les télécommunications optiques avec des caractéristiques supérieures à celles des diodes laser à puits quantique, commercialisées actuellement.

Après avoir évoqué le contexte technologique et économique des diodes laser, nous décrirons les caractéristiques principales des boîtes quantiques : leur mode d'élaboration, et leurs propriétés structurales et optiques. Puis nous présenterons les limites actuelles des lasers à boîtes quantiques de InAs/GaAs, tout particulièrement ceux réalisés par MOCVD, procédé de dépôt préconisé pour une production industrielle. Nous présenterons brièvement enfin les premiers résultats des travaux menés, qui ont pour but d'augmenter la densité des boîtes quantiques, via l'utilisation d'antimoine.

1. Les diodes lasers

1.1 Contexte économique et technologique

Les nanosciences et nanotechnologies connaissent depuis une vingtaine d'années un formidable essor, grâce au développement de nouveaux outils d'élaboration, d'observation et d'analyse. Un des domaines qui a bénéficié le plus à présent de la réduction à l'échelle nanométrique de la couche active est celui des diodes laser à semiconducteur, dispositifs clés des télécommunications optiques. Le marché des diodes laser, dont les télécommunications se taillent la part du lion, se relève de la grave crise des années 2000-2001 et connaît une croissance de l'ordre de 15 % depuis: il reste néanmoins colossal, se montant à près de 6 milliards de dollars en 2003 [1].

La nature même de la silice impose certaines longueurs d'onde d'émission bien précises pour les diodes laser, égales à 850, 1300 et 1555 nm. Pour une transmission longue distance, il est préconisé d'utiliser la plus grande longueur d'onde pour une atténuation minimale du signal. Aujourd'hui, la force motrice du marché des diodes lasers est le développement de dispositifs fonctionnant à 1.30 et 1.55 μm . Cependant, en raison du manque d'émetteurs et de détecteurs bon marché à ces longueurs d'onde, les communications par fibres optiques ne sont maintenant encore que peu utilisées dans les réseaux locaux (LAN, Local Area Network) et métropolitains (MAN, Metropolitan Area Network).

Les diodes laser commercialisées actuellement sont élaborées à partir de puits quantiques, couches minces semi-conductrices d'épaisseur nanométrique. De nombreuses études sont aujourd'hui consacrées aux boîtes quantiques (Quantum Dots, en anglais) semi-conductrices. Ces

structures ont le potentiel de supplanter les puits quantiques en tant que couche active et d'améliorer drastiquement les propriétés des diodes lasers. L'élaboration de diodes laser à base de boîtes quantiques de InAs sur substrat de GaAs est aujourd'hui la solution la plus prometteuse, à 1.30 μm .

1.2 Principe de fonctionnement d'une diode laser

Une diode laser est un dispositif optoélectronique qui produit un faisceau de lumière cohérent créé par le phénomène d'émission stimulée et de recombinaison radiative des porteurs de charge dans la zone active dans laquelle l'inversion de population est créée par injection de courant : la lumière confinée au sein de la zone active est amplifiée (Fig. 1).

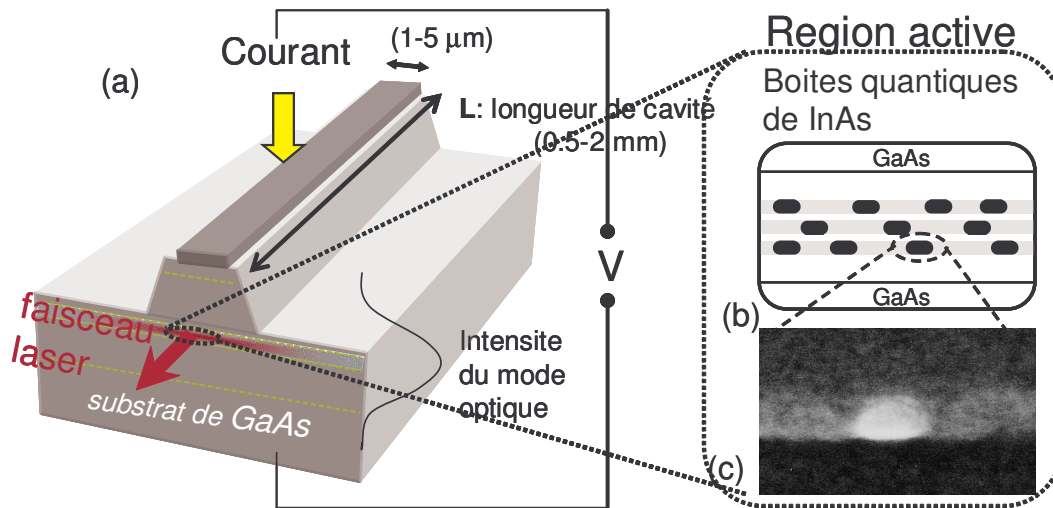


Figure 1 (a) schéma d'une diode laser émettant par la tranche. (b) région active schématisée d'un laser à boîtes quantiques constituée de trois couches empilées de boîtes quantiques de InAs, dans une matrice de GaAs, (c) image MET (Microscopie Electronique en Transmission) en tranche de la couche active de GaAs/InAs/GaAs.

Les principales caractéristiques d'une diode laser sont la longueur d'émission, le gain modal optique G , et tout particulièrement, le gain de seuil G_{th} et le gain de saturation G_{sat} , et la densité de courant de seuil J_{th} .

Le gain optique G (cm^{-1}) mesure l'amplification de la lumière au sein de la cavité laser. Le gain de seuil G_{th} est le gain minimum que la région active doit assurer pour que l'effet laser se produise. Il est déterminé par la géométrie et les caractéristiques de la cavité. La couche active, quant à elle, ne peut assurer qu'un certain gain, appelé le gain de saturation G_{sat} , caractéristique intrinsèque de la couche active. Si la région active ne peut assurer un gain supérieur au gain de seuil, l'émission laser n'a pas lieu.

Une diode laser est d'autant meilleure qu'elle présente un haut gain et une densité de courant de seuil la plus faible possible afin d'éviter notamment i) une consommation en énergie élevée et ii) un échauffement de la diode laser qui induit, entre autres, un changement de la longueur d'émission et nécessite des systèmes de refroidissement.

2. Boîtes quantiques auto-assemblées

2.1. Effet du confinement électronique sur la densité d'états

En 1982, Y. Arakawa et H. Sakaki [2], de l'Université de Tokyo étudièrent théoriquement l'effet de confinement de la zone active dans les trois dimensions de l'espace. Pour un laser à boîtes quantiques, ils prédirent une très faible densité de courant de seuil et une complète indépendance des caractéristiques laser vis-à-vis de la température.

Le paramètre clé est l'effet du confinement en taille sur la densité d'états qui se produit lorsque la dimension de la zone active est du même ordre que la longueur d'onde de de Broglie de l'électron (Fig. 2). Dans le cas de la boîte quantique où le confinement a lieu dans les trois directions, la densité d'états devient complètement quantifiée, avec une série de niveaux discrets, de manière similaire à celle d'un atome. D'ailleurs, les boîtes quantiques sont souvent décrites comme des «atomes artificiels». L'intérêt d'une densité d'états discrète est que les porteurs sont concentrés sur un seul niveau énergétique (via l'utilisation d'un ensemble de boîtes quantiques identiques) : les porteurs injectés contribuent tous à l'émission laser, ce qui a pour effet de réduire drastiquement le courant de seuil.

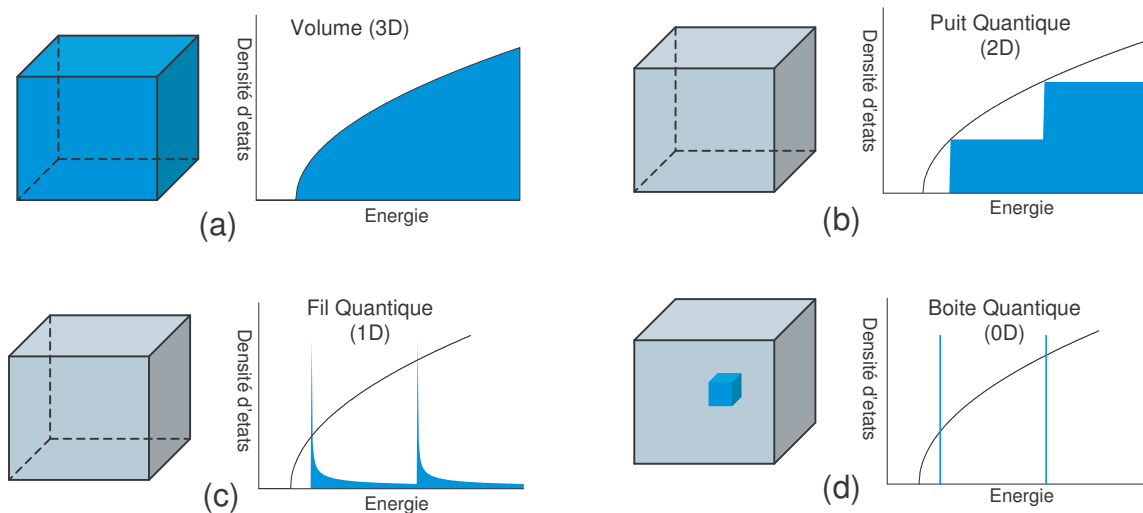


Figure 2 Densité d'états de (a) volume d'un semiconducteur, (b) puit quantique, (c) fil quantique et (d) boîte quantique. Les dimensions de la structure associée sont également représentées.

2.3 Caractéristiques des boîtes quantiques de InAs

2.3.1 Croissance des boîtes quantiques auto-assemblées

Bien que leur intérêt fut énoncé dès 1982, ce n'est qu'au début des années 1990 que des structures à boîtes quantiques avec des propriétés optiques raisonnables ont pu être élaborées. La croissance épitaxiale d'un matériau sur un substrat présentant un désaccord de maille peut avoir lieu en deux étapes, comme illustré sur la figure 3 dans le cas de boîtes (ou îlots) quantiques de InAs sur un substrat de GaAs. Tout d'abord, la croissance a lieu selon un mode plan avec la formation d'une couche dite « *de mouillage* » (Fig. 3.b). Cette couche a une épaisseur de 1.7 ML (MonoLayer ou monocouche). En raison du désaccord de maille ($\approx 7\%$), les contraintes élastiques dans la couche de InAs augmentent jusqu'à une valeur seuil : il y a alors formation d'îlots nanométriques de InAs à trois dimensions au-dessus de la couche de mouillage (Fig. 3.c), au lieu de la formation de

dislocations dans une couche à deux dimensions (relaxation plastique). Ce mode de croissance est communément nommé mode Stranski-Krastanov (SK). De ce mode de croissance résulte la formation d'îlots présentant une densité de défauts structuraux fortement réduits par rapport aux techniques de lithographie utilisées initialement. Ces boîtes quantiques sont également appelées boîtes quantiques auto-assemblées (Self-Assembled Quantum Dots).

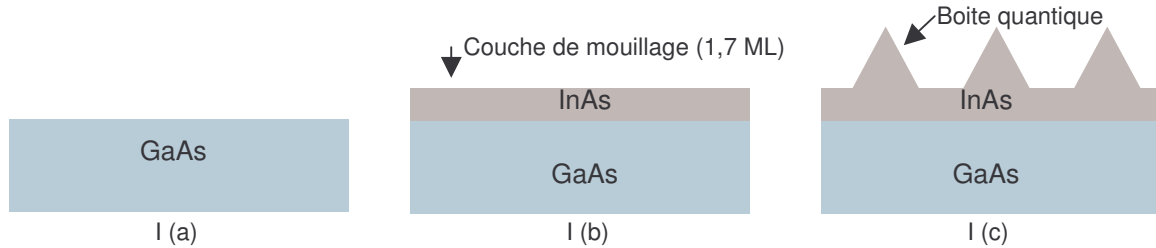


Figure 3 Mode Stranski-Krastanov de croissance hétéroépitaxiale

Les deux principales techniques de croissance épitaxiale utilisées aujourd'hui sont celles de l'Épitaxie par Jet Moléculaire (EJM ou MBE, Molecular Beam Epitaxy) et l'Épitaxie en Phase Vapeur aux OrganoMétalliques (EPVOM ou MOCVD, MetalOrganic Chemical Vapor Deposition). La technique de MBE est la technique la plus utilisée dans les laboratoires de recherche car elle permet, entre autres, d'obtenir des interfaces abruptes et un suivi in-situ (par RHEED) des processus de croissance. Cependant, c'est la technique de MOCVD qui est la plus utilisée en industrie en raison notamment d'une mise en oeuvre beaucoup plus souple et des vitesses de croissance beaucoup plus élevées.

2.3.2 Principales caractéristiques structurales

La figure 4 représente une image AFM (Atomic Force Microscopy) d'un réseau de boîtes quantiques de InAs/GaAs élaborés par MOCVD et ayant une densité de $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, soit plus de 10 milliards de boîtes quantiques par cm^2 . Ces boîtes ont une forme pyramidale avec une hauteur moyenne de 10 nm et un diamètre de base de 25 nm. Une image de Microscopie Electronique à Balayage (MEB, ou SEM, Scanning Electronic Microscopy) donne une image plus réaliste de la véritable géométrie de la boîte quantique de InAs.

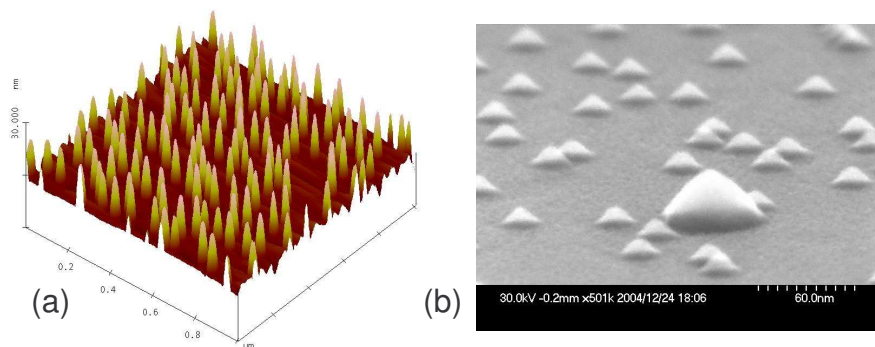


Figure 4 boîtes quantiques de InAs epitaxiées sur substrat de GaAs par MOCVD (densité de $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$): (a) image AFM (b) image MEB

2.3.3 Principales caractéristiques optiques

Le diagramme de bandes d'une boîte quantique de InAs dans une matrice de GaAs est représenté sur la figure 5.a : il comprend, entre autres, les niveaux discrets des électrons et des trous de la

boite quantique de InAs. La transition, représentée par la flèche bleue, est communément appelée transition fondamentale de la paire electron-trou. Différentes transitions de plus haute énergie sont représentées par les flèches rouges. Ces transitions sont communément appelées transitions du premier, deuxième, état excité de la paire électron-trou.

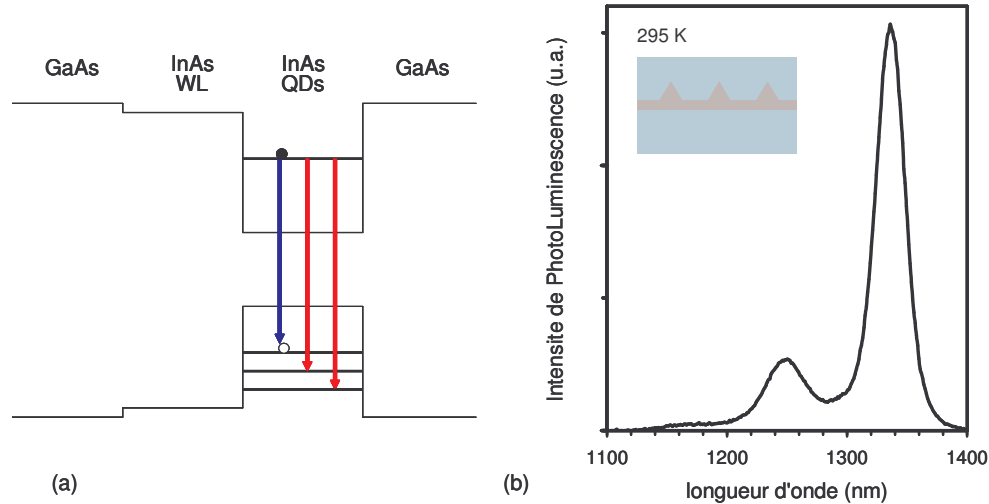


Figure 5 (a) Diagramme de bandes d'une boîte quantique de InAs dans une matrice de GaAs. (b) Spectre de photoluminescence d'une couche de boîtes quantiques auto-assemblées de InAs dans une matrice de GaAs.

Un réseau epitaxié de boîtes quantiques auto-assemblées est cependant caractérisé par une distribution en taille (forme, hauteur et largeur), en raison de différents paramètres comme l'hétérogénéité des flux d'espèces ou des gradients de température pendant l'étape de croissance. Ceci a pour conséquence directe un élargissement des raies d'émission, comme montré sur le spectre de photoluminescence (figure 5.b).

3. Lasers à boîtes quantiques de InAs/GaAs émettant à 1.30 μm

3.1 Emission laser depuis l'état excité

Aujourd'hui, le système de boîtes quantiques de InAs sur substrat de GaAs est le plus prometteur afin de réaliser des diodes lasers émettant à 1.30 μm , sur substrat de GaAs. La valeur record publiée pour J_{th} est de 16 A/cm² [3], valeur qui constitue la plus faible valeur obtenue pour un laser émettant par la tranche, puits et boîtes quantiques confondus. Cependant, ces boîtes quantiques de InAs/GaAs sont élaborées par MBE. Pour une production industrielle, une réelle avancée serait d'élaborer ces mêmes structures par MOCVD.

A présent, la plus grande longueur d'onde obtenue par MOCVD pour des lasers à boîtes quantiques de InAs/GaAs est 1.285 μm [4], mais reste néanmoins inférieure à 1.30 μm . Cependant, la valeur de J_{th} est encore trop grande (476 A/cm²). Ceci est du au fait que l'émission laser n'intervient pas via la transition de l'état fondamental, mais via celle du premier état excité, car le gain de saturation de l'état fondamental G_{sat} est trop faible : le gain de saturation de l'état excité étant plus important, l'émission laser a lieu via cette transition.

3.2 Effet de l'augmentation de la densité des boîtes quantiques

Le gain de saturation peut être augmenté en augmentant la densité des boîtes quantiques auto-assemblées. Ceci peut être effectué soit en empilant plusieurs couches de boîtes quantiques (séparées par une couche de GaAs, Fig. 1.b), soit en augmentant la densité des boîtes quantiques dans le plan d'une couche.

Cependant, l'empilement de couches de boîtes quantiques ne peut être fait indéfiniment en raison d'une accumulation graduelle de contraintes et dislocations, rendant les conditions expérimentales délicates à contrôler. Le meilleur compromis, recherché actuellement, est de limiter le nombre de plans empilés et d'augmenter simultanément la densité des boîtes quantiques dans le plan.

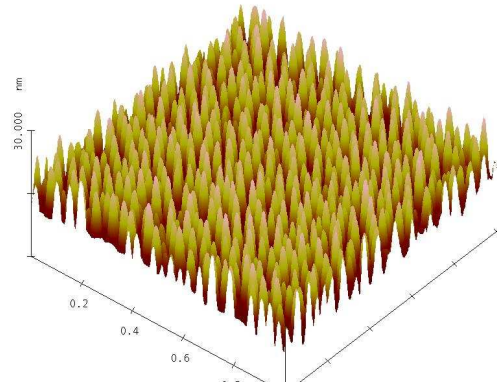


Figure 6 image AFM d'une couche de boîtes quantiques de InAs sur GaAs avec une densité de $5.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

La figure 7 montre une image AFM d'une couche de boîtes quantiques de InAs/GaAs élaborée par MOCVD et ayant une densité de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Cette augmentation de la densité est obtenue en irradiant préalablement la surface de GaAs par un flux d'antimoine, qui va affecter les processus de nucléation et de croissance dans le sens d'une augmentation de la densité en boîtes quantiques [5]. Cette augmentation de la densité provoque une augmentation de l'intensité de photoluminescence. L'obtention de telles couches de boîtes quantiques est très prometteuse et fera l'objet prochainement de l'élaboration de diodes laser, en collaboration avec Fujitsu.

Conclusion

Les boîtes quantiques sont des nanostructures où l'électron est confiné dans les trois directions de l'espace. Il en résulte une densité d'états discrète, très favorable pour l'élaboration de diodes laser à semiconducteur, destinées en particulier pour le marché des télécommunications. L'élaboration de couches à haute densité de boîtes quantiques de InAs sur GaAs par MOCVD, via l'utilisation d'antimoine, permet d'envisager l'élaboration de diodes lasers émettant à $1.30 \mu\text{m}$ avec des courants de seuil fortement réduits.

Denis Guimard remercie la JSPS pour le financement de ce contrat post-doctoral.

Bibliographie

- [1] R. Szweda, "Diode Laser Materials et Devices: a Worldwide Market et Technology Overview to 2005", Elsevier (2002)
- [2] Y. Arakawa et H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939 (1982)
- [3] K. Otsubo, N. Hatori, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe. M. Sugawara, et Y. Arakawa., Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 43, L1124 (2004)
- [4] J. Tatebayashi, N. Hatori, M. Ishida, H. Ebe, M. Sugawara, H. Sudo, A. Kuramata, et Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett. 86, 053107 (2005)
- [5] D. Guimard *et al.*, autumn meeting of Japanese Society of Applied Physics, 13.3, 8p-ZD-16 (2005), Tokushima

