ETUDE EXPÉRIMENTALE DES RÉGIMES D'AUTO-INJECTION OPTIQUE DANS LES LASERS A CASCADE QUANTIQUE

Louise Jumpertz[1,2], Mathieu Carras[2], Kevin Schires[1] et Frédéric Grillot[1]

[1]Telecom ParisTech, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, CNRS LTCI, 46 rue Barrault, 75013 Paris, France

[2]Alcatel Thales III-V Lab, Campus de Polytechnique, 1 avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France

louise.jumpertz@telecom-paristech.fr

RÉSUMÉ

L'auto-injection optique dans les lasers à cascade quantique émettant dans le moyen infrarouge est étudiée expérimentalement. La réponse dynamique de ces structures est proche de celle observée dans les lasers interbandes. Cinq régimes d'auto-injection apparaissent sur le spectre optique, en fonction de la phase et de l'amplitude de l'onde retour. L'expérience révèle que les lasers à cascade quantiques auto-injectés présentent une stabilité plus importante ainsi qu'une réduction substantielle de la zone de chaos.

MOTS-CLEFS : *laser à cascade quantique ; auto-injection optique ; effondrement de la cohérence*

1. INTRODUCTION

Les lasers à cascade quantique (LCQ) ont été inventés il y a vingt ans dans le but de fournir des lasers à semi-conducteurs compacts pour des longueurs d'onde allant du moyen infrarouge (4 à 12 µm) jusqu'au THz (30 µm à 1mm) [1]. Pour obtenir de telles longueurs d'ondes, le principe des LCQ repose sur des transitions radiatives inter-sous-bandes au sein de la bande de conduction du matériau. La longueur d'onde n'est donc pas déterminée par les propriétés intrinsèques du semi-conducteur utilisé mais peut être choisie en ajustant la largeur des puits quantiques dans les sous-bandes lors de la croissance. De plus, un effet de cascade des électrons permet d'obtenir de bons rendements de conversion électrique-optique. Cette technologie a rapidement progressé et les LCQ émettant dans le moyen infrarouge fonctionnent désormais en continu à température ambiante. Les LCQ sont donc devenus des sources de choix pour des applications telles que la spectroscopie de gaz, les contre-mesures optiques ou les communications en espace libre. Pour ces applications, il est nécessaire d'améliorer les propriétés d'émission des lasers, et notamment la finesse spectrale, la puissance optique et la bande passante de modulation.

L'auto-injection optique est étudiée depuis des années dans les lasers inter-bandes précisément parce qu'elle permet d'améliorer les performances de ces lasers [2]. Cet effet non-linéaire consiste à réinjecter une partie de la lumière émise par le laser après réflexion sur un miroir ou sur l'extrémité d'une fibre optique. Selon les deux paramètres d'auto-injection que sont la longueur de la cavité externe et le taux de réinjection, défini comme le rapport entre la puissance réinjectée et la puissance émise, le laser aura soit un comportement stable monomode soit un fonctionnement chaotique multi-mode.

Bien connue et maîtrisée dans les lasers inter-bandes, l'auto-injection n'a que très peu été étudiée dans les LCQ, surtout théoriquement [3]-[4]. L'objectif de ce travail est donc d'étudier expérimentalement l'effet de l'auto-injection optique sur un LCQ à contre-réaction répartie (DFB) émettant dans le moyen infrarouge.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le LCQ étudié est un laser en AlInAs/GaInAs émettant vers 5,6 µm. Il est constitué de 30 périodes comportant chacune une zone active composée de multi-puits quantiques et un injecteur qui fait passer les électrons dans la période suivante par effet tunnel. Le réseau de Bragg utilisé pour l'émission monomode est un réseau métallique que l'on a fait croître au-dessus du laser. L'efficacité de couplage du réseau est $\kappa = 4$ cm^{-1} et les dimensions du laser sont de 2 mm de long sur 9 µm de

large. Un traitement haute réflectivité (99%) sur la facette arrière garantit un fonctionnement en continu à température ambiante. Pour obtenir de meilleures puissances optiques, les expériences décrites par la suite sont réalisées à 10°C. Le courant de seuil est de 433 mA et le rendement quantique externe de 0,23 mW/mA. Le dispositif expérimental utilisé est présenté en figure 1. La lumière émise par le laser est collimatée et répartie sur deux voies par une lame séparatrice. Une partie est réfléchie sur un miroir et réinjectée dans le laser. Le taux de réinjection f_{ext} est déterminé par un polariseur et contrôlé par une mesure de puissance. La seconde partie du flux est envoyée sur un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) dont la résolution est de 40 nm pour analyser le spectre optique, ou sur un puissance-mètre.

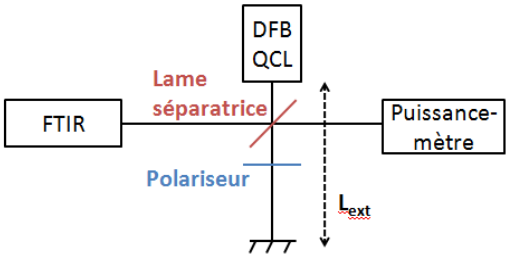

Fig. 1 : Schéma du dispositif expérimental.

3. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES COURANT PUISSANCE P-I

La figure 2a. montre l'évolution des courbes caractéristiques P-I de puissance en fonction du courant de pompe pour différents taux de réinjection. On constate une augmentation significative de la puissance émise à un courant donné, ainsi qu'une diminution du courant de seuil quand la puissance réinjectée augmente. Ainsi, pour un taux de réinjection maximal de 25%, le seuil diminue de 4% environ. On remarque également l'apparition d'ondulations sur la courbe P-I dont l'amplitude augmente avec la puissance réinjectée. D'après [5] et [6], la puissance optique émise est maximale lorsque les modes de la cavité interne et ceux de la cavité externes interfèrent de façon constructive, c'est-à-dire lorsque la longueur de la cavité externe est un multiple de la longueur effective de la cavité laser, définie comme le produit de l'indice de réfraction et de la longueur de cavité interne. Dans le cas présent, la longueur de cavité externe est fixe, mais la variation de température de la zone active liée à l'augmentation du courant injecté entraîne une modification de l'indice de réfraction et donc de la puissance optique, d'où les ondulations. Comme la variation de température avec le courant d'injection présente de l'hystérésis, on peut également observer ce phénomène d'hystérésis sur les courbes P-I, surtout à de forts taux de réinjection, comme le montre la figure 2b.

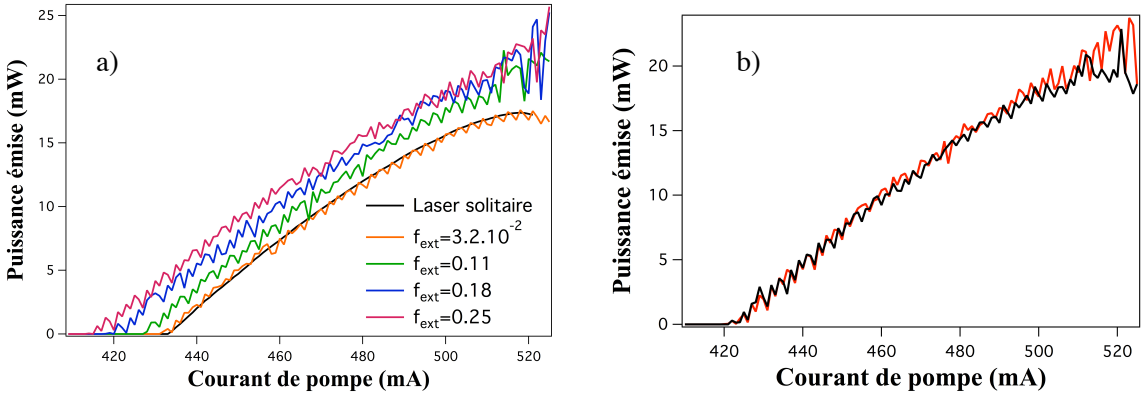

Fig.2 : a) Courbes P-I pour différents niveaux d'auto-injection. b) Présence d'hystérésis à fort taux de réinjection.

4. ETUDE DES RÉGIMES DE RÉINJECTION OPTIQUE

L'étude des spectres optiques pour différentes valeurs d'auto-injection permet d'identifier cinq régimes de fonctionnement (cf. figure 3) qui présentent des caractéristiques proches de celles

communément observées dans les lasers inter-bandes. Pour de très faibles taux de réinjection, le laser a un comportement stable monomode, avec une variation de puissance dépendant de la phase de l'onde réinjectée. Si l'on augmente légèrement le taux de rétroaction, on observe un battement entre le mode principal fixé par le réseau de Bragg et le mode adjacent de la cavité Fabry-Perot. Par la suite, le laser devient à nouveau monomode, émettant sur le premier mode adjacent. Le quatrième régime est le plus difficile à analyser. On observe une forte augmentation du bruit associée à une remontée en puissance des modes Fabry-Perot, mais la résolution du FTIR ne nous permet pas de conclure sur un éventuel effondrement de la cohérence qui se traduirait par un fort élargissement spectral, phénomène bien présent dans les lasers inter-bandes où ce régime correspond à une dynamique chaotique. Enfin, pour des taux de réinjection très élevés, le laser entre dans un régime de cavité étendue, dans lequel le LCQ serait équivalent à une petite zone active entre deux miroirs très espacés. Le spectre pour ce régime est strictement monomode avec une forte puissance d'émission.

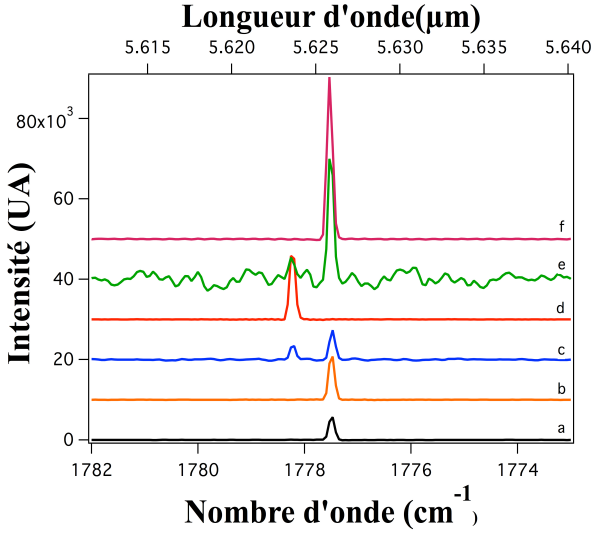

Fig. 3 : Spectres optiques des régimes d'auto-injection. a) Laser solitaire (f_{ext}=0). b) Régime 1, $f_{ext} = 9.1\times10^{-4}$. c) Régime 2, $f_{ext} = 1.5\times10^{-3}$. d) Régime 3, $f_{ext} = 3.2\times10^{-2}$. e) Régime 4, $f_{ext} = 0.13$. f) Régime 5, $f_{ext} = 0.25$.

CONCLUSION

Pour conclure, nous avons montré que le LCQ DFB émettant dans le moyen infra-rouge présente cinq régimes qui apparaissent selon le taux de réinjection, proches de ceux observés dans les lasers interbandes. L'expérience révèle également une stabilité plus importante ainsi qu'une réduction substantielle de la zone de chaos.

Ce travail est financé par le ministère de la Defense (DGA).

REFERENCES

[1] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L.Hutchinson, and A. Y. Cho, "Quantum Cascade Laser", *Science*, vol. 264, no. 5158, p. 553, 1994.

[2] K. Peterman, "External optical feedback phenomena in semiconductor lasers", *IEEE J. Select. Top. in Quantum Electron.*, vol. 1, no. 2, p. 480, 1995.

[3] F. P. Mezzapesa, L. L. Columbo, M. Brambilla, M. Dabbicco, S. Borri, M. S. Vitiello, H. E. Beere, D. A. Ritchie, and G. Scamarcio, "Intrinsic stability of quantum cascade lasers against optical feedback", *Opt. Express*, vol. 21, no. 11, p. 13748, 2013.

[4] L. L. Columbo and M. Brambilla, "Multimode regimes in quantum cascade lasers with optical feedback", *Opt. Express*, vol. 22, no. 9, p. 10105, 2014.

[5] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties", *IEEE J. Quantum Electron.,* vol. 16, no. 3, p. 347, 1980.

[6] H. Kakiuchida and J. Ohtsubo, "Characteristics of a semiconductor laser with external feedback", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 9, p. 2087, 1994.