

# DYNAMIQUE DE MODULATION D'UN LASER SEMI-CONDUCTEURS À LEVIER DE GAIN OPÉRANT SOUS INJECTION OPTIQUE EXTERNE

Jean-Maxime Sarraute,<sup>1</sup>, Kevin Schires<sup>1</sup> et Frédéric Grillot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Télécom-Paritech, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, CNRS LTCI, 46 rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13, France

grillot@telecom-paristech.fr

## RÉSUMÉ

Les propriétés dynamiques d'un laser à semi-conducteurs à levier de gain opérant sous injection optique externe sont étudiées théoriquement à travers la réponse fréquentielle (fonction de transfert). L'approche semi-analytique montre que la combinaison du levier de gain et du verrouillage optique constitue une excellente solution pour l'amélioration de la dynamique de modulation. En particulier, il est démontré que la dépression apparaissant dans la fonction de transfert sous forte injection optique et limitant la bande passante à -3 dB peut être contrecarrée par l'effet de levier de gain.

**MOTS-CLEFS :** *levier de gain, injection optique, boîtes quantiques, bande passante*

## 1. INTRODUCTION

En raison de leurs relatives insensibilités à la température et des faibles courants de seuil, les lasers à boîtes quantiques (BQ) sont d'excellents candidats pour les futurs réseaux de communications optiques [1]. Cependant, la compétition entre les états liés des boîtes quantiques limite la bande passante de modulation de ces lasers à environ quelques GHz. Dans le but de booster la dynamique de modulation, diverses solutions ont été proposées comme celles reposant sur l'injection optique externe [2, 3] ou sur l'effet de levier de gain [4, 5]. Dans le cas de l'injection optique, de nombreuses études (théoriques et expérimentales) ont clairement montré la possibilité de régénérer efficacement la bande passante de modulation dans la zone de verrouillage stable. Malgré l'apparition d'une dépression aux basses fréquences et d'une efficacité de modulation comparable à celle d'un laser en fonctionnement libre (sans injection), des fréquences de résonance beaucoup plus élevées que la fréquence de relaxation du laser solitaire ont été rapportées [3]. Par ailleurs, il est éprouvé que le laser à levier de gain dont le principe repose sur l'exploitation de la variation du gain avec la densité de porteurs améliore la dynamique de modulation sans altérer la fonction de transfert aux basses fréquences [6]. Dans un laser à levier de gain, la section de plus grande longueur est pompée en continu, au-dessus du seuil, et dans une région proche de la saturation (faible gain dynamique) alors que la section de modulation, plus courte est quant à elle polarisée proche de la transparence optique (fort gain dynamique). Par voie de conséquence, une petite variation de la densité de porteurs dans la section modulée se répercute automatiquement sous la forme d'une modification substantielle de la densité de porteurs et donc du nombre total de photons dans la section de gain. Afin d'améliorer à la fois l'efficacité de modulation et la bande passante à -3 dB, ce travail montre, pour la première fois, la possibilité d'exalter significativement les caractéristiques dynamiques d'un laser BQ en combinant judicieusement l'effet de levier de gain et l'injection optique externe.

## 2. MODÈLE

La figure 1. montre le schéma du laser à deux-sections opérant sous injection optique. Dans cette étude, on note  $h$  la longueur (choisie très proche de l'unité) de la section de gain. Le laser maître est utilisé pour verrouiller le laser esclave dans la zone de verrouillage stable [2]. En négligeant les processus de transport dans le matériau BQ, les propriétés dynamiques du laser à levier de gain opérant sous injection optique externe peuvent être décrites, dans l'approche excitonique *via* les équations d'évolutions :

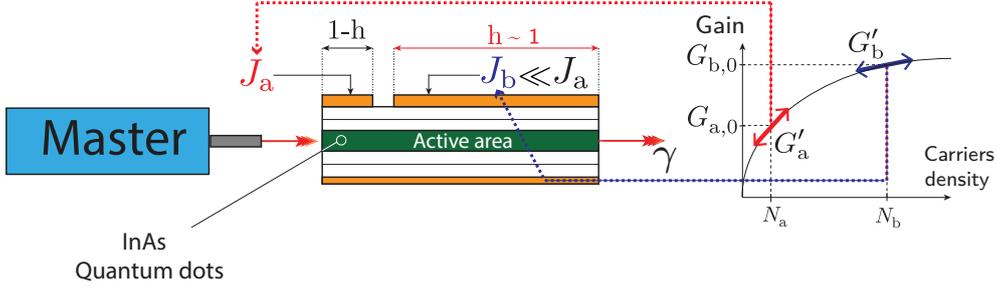


FIGURE 1: Schéma du laser BQ à levier de gain en présence d'injection optique externe.

$$\begin{cases} \frac{dN_{e^-,a}}{dt} = \frac{J_a}{eD} - \frac{N_{e^-,a}}{\tau_{sp,a}} - G_a N_\gamma \\ \frac{dN_{e^-,b}}{dt} = \frac{J_b}{eD} - \frac{N_{e^-,b}}{\tau_{sp,a}} - G_b N_\gamma \\ \frac{dN_\gamma}{dt} = \left( \Gamma [G_a(1-h) + G_b h] - \frac{1}{\tau_s} \right) N_\gamma + 2k_c \sqrt{N_{\gamma,inj} N_\gamma} \cos(\phi) \\ \frac{d\phi}{dt} = \left( \Gamma [G_a(1-h) + G_b h] - \frac{1}{\tau_s} \right) \frac{\alpha}{2} - \Delta\omega_{inj} - k_c \sqrt{\frac{N_{\gamma,inj}}{N_\gamma}} \sin(\phi) \end{cases} \quad (1)$$

Dans (1), deux équations différentielles distinctes sont utilisées pour décrire l'évolution des densités de porteurs  $N_{a,b}$  tandis que deux autres sont également requises pour décrire l'évolution de la phase  $\phi$  du champ électrique ainsi que de la densité de photons  $N_\gamma$ . Les valeurs du temps de vie des porteurs  $\tau_{sp}$ , du temps de vie des photons  $\tau_p$ , et du facteur de couplage phase-amplitude  $\alpha$  correspondent aux valeurs rapportées dans la référence [5]. Le paramètre  $G_{a/b}$  quantifie l'effet de levier de gain ; il est défini comme le rapport des gains optiques de chacune des sections A et B. Enfin, les termes d'injection  $\Delta\omega_{inj}$  et  $\Delta N_{inj}$ , correspondent respectivement au désaccord de fréquence entre les lasers maître et esclave et à la densité de photons injectés dans l'esclave. On note  $k_c$  le taux de couplage.

En appliquant une analyse petit signal au jeu d'équations (1), la fonction de transfert normalisée de l'oscillateur à levier de gain injecté peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$|R(f)|^2 = \frac{\mathcal{A}_0^2 \left[ (1 - \mathcal{A}'_2 f^2)^2 + (\mathcal{A}'_1 f)^2 \right]}{[\mathcal{A}_1 f - \mathcal{A}_3 f^3]^2 + [\mathcal{A}_0 - \mathcal{A}_2 f^2 + \mathcal{A}_4 f^4]^2} \quad (2)$$

où les coefficients  $\mathcal{A}_i$  et  $\mathcal{A}'_j$  sont exprimés en fonction des paramètres des BQ et de l'injection optique. L'équation (2) est valide dans la limite de l'hypothèse  $h \sim 1$  et pour des densités de courant telles que  $J_a \gg J_b$ . Les degrés de liberté utilisés pour les simulations sont les paramètres d'injection ainsi que le rapport des taux d'amortissement  $g = \frac{\gamma_b}{\gamma_a}$  où  $\gamma_i$  est le taux d'amortissement de la section  $i$ .

### 3. RÉSULTATS

La figure 2a montre l'évolution des réponses en modulation calculées pour différentes configurations. La ligne en pointillé noir représente le cas du levier de gain ( $g = 5$ ) sans injection optique, tandis que toutes les autres courbes pointillées sont obtenues sans effet de levier de gain ( $g = 1$ ) mais pour différents taux d'injection (2, 6 et 12 dB). Enfin, les traits pleins rouges représentent les situations combinées pour plusieurs valeurs de  $g$  (1, 5, 7 et 9) et pour un taux d'injection de 12 dB. Ces simulations montrent que l'injection optique d'un laser à levier de gain conduit à une régénération de la dynamique

de modulation avec une amélioration substantielle de la bande passante à -3 dB. La figure 2b montre les cartographies de la bande passante à -3 dB dans le plan  $\{\Delta\omega_{inj}, \Delta N_{inj}\}$  pour  $\alpha = 4$  et  $g = 1$  et 9. Comme indiqué, il est possible de trouver différents points de fonctionnement pour lesquels la bande passante est grandement améliorée (par exemple jusqu'à 50 GHz pour  $g = 9$ ). En outre, les calculs montrent que la dépression indésirable observée dans la fonction de transfert [3] peut être compensée sans sacrifier la bande passante de modulation à -3 dB.

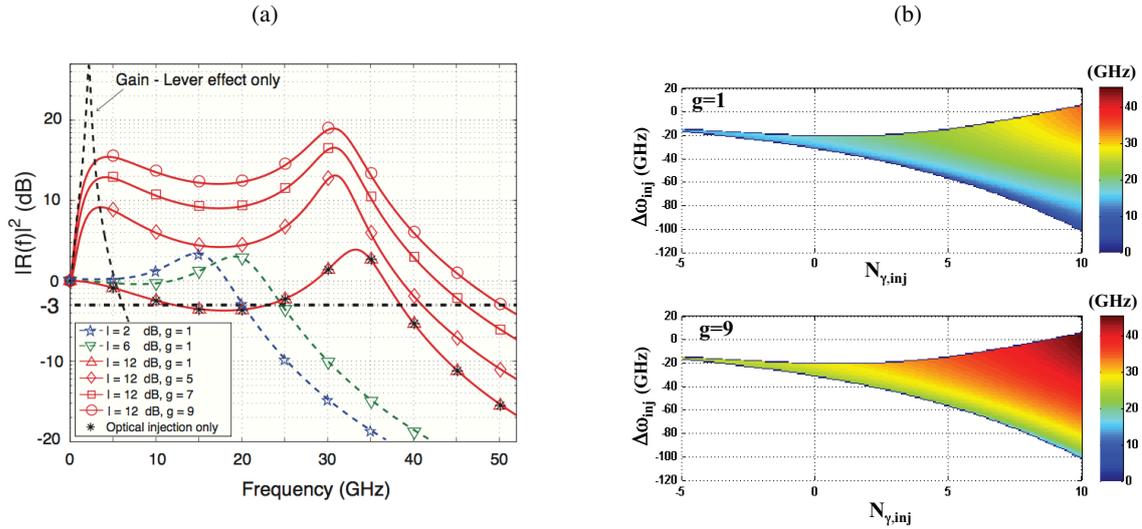


FIGURE 2: (a) Evolution des fonctions de transfert pour différentes configurations ; (b) Cartographie de la bande passante à -3 dB dans le plan  $\{\Delta\omega_{inj}, \Delta N_{inj}\}$  pour  $\alpha = 4$  et  $g = 1$  et 9.

#### 4. CONCLUSION

En conclusion, l'utilisation de lasers BQ à levier de gain injecté optiquement constitue une technique prometteuse non seulement pour les communications ultra-large bande mais aussi pour le traitement des données massives, tant du point de vue du stockage (Cloud), du calcul distribué, que de l'analyse des données (Big Data). L'approche semi-analytique montre que la dépression apparaissant dans la fonction de transfert sous forte injection optique et limitant la bande passante à -3 dB peut être fortement atténuée avec le levier de gain. De futurs travaux porteront sur l'augmentation de l'efficacité de modulation ainsi que sur la réduction des distorsions non linéaires.

#### 5. RÉFÉRENCES

- [1] M. T. Crowley and al., "Gaas based quantum dot lasers," *Semiconductors and Semimetals : Advances in Semiconductor Lasers*, New York : Academic, (2012).
- [2] T. B. Simpson and J. M. Liu, "Bandwidth enhancement and broadband noise reduction in injection-locked semiconductor lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, pp. 709, (1995).
- [3] N. A. Naderi and al., "Modeling the injection-locked behavior of a quantum dash semiconductor laser," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, Vol. 15, pp. 563, (2009).
- [4] K. J. Vahala and al., "The optical gain lever : A novel gain mechanism in the direct modulation of quantum well semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 54, pp. 2506, (1989).
- [5] Y. Li and al., "Enhancing the 3-db bandwidth via the gain-lever effect in quantum-dot lasers," *IEEE Photonics Journal.*, Vol. 2, pp. 320, (2010).
- [6] H.-K. Sung and al., "Amplitude modulation response and linearity improvement of directly modulated lasers using ultra-strong injection-locked gain-lever distributed bragg reflector lasers," *J. of the Optical Society of Korea*, Vol. 12, pp. 303, (2008).