

COMPARAISON DE LA DIAPHONIE PRÉSENTÉE PAR DEUX TECHNOLOGIES D'INTÉGRATION DE BARRETTES DE VCSEL

A. RISSONS-BLANQUET, J-C. MOLLIER

Groupe Micro-onde et Optoélectronique pour système Embarqués (SUPAERO)

31500 TOULOUSE

Email: Angelique.Rissons@supaero.fr

Résumé. Nous présentons les résultats de simulations et caractérisations de diodes lasers VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) montées en barrettes selon 2 technologies distinctes: l'une de type microruban développée par Avalon Photonics, et l'autre de type coplanaire fournie par Ulm Photonics.

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années le souci d'un débit d'information toujours croissant a suscité le développement des technologies optoélectroniques. C'est dans ce contexte que sont apparus les VCSELS. Ces diodes Laser à Cavity Verticale Émettant par la Surface sont conçues par épitaxie par jet moléculaire afin de réaliser une planarisation de la diode laser assurant ainsi une intégration aisée et une possibilité de mise en matrices ou en barrettes. Outre la facilité d'intégration, cette conception apporte des modifications considérables dans la structure de la diode laser: une émission optique selon le même axe que l'injection des porteurs, conséquence directe de la planarisation, par opposition aux diodes lasers conventionnelles de type Fabry Perot ou DFB pour lesquelles l'émission se fait par la tranche et l'injection de porteurs par les autres faces; une taille très réduite de l'ordre de la dizaine de microns liée principalement à sa zone active à puits quantiques, impliquant un temps de réponse très rapide et une faible consommation électrique (courant de seuil <1mA), un faisceau émis circulaire (dû à une symétrie cylindrique)... Toutes ces caractéristiques ont permis au VCSEL de devenir le composant clé des modules d'interconnexion optique, réalisant des liaisons de courte distance et à très haut débit, dépassant largement le gigabit par seconde (Gbps) sur plusieurs canaux optiques. Or, pour satisfaire à la fois ces débits et ces faibles dimensions, l'électronique de commande et surtout les accès électriques doivent être adaptés aux dimensions tout en évitant des effets électromagnétiques parasites tels que la diaphonie. C'est pourquoi nous nous sommes penchés sur la modélisation en signal de barrettes de VCSELS en puces.

En utilisant une caractérisation sous pointes, les paramètres S11 électrique et S21 électro-optique ont été mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel pour différentes technologies de VCSELS et différentes conditions d'injection de porteurs. Les résultats nous ont permis d'une part, d'établir un schéma électrique équivalent du VCSEL cohérent

avec le modèle physique basé sur les équations d'évolution des porteurs et des photons [1] et, d'autre part, de mettre en évidence l'influence de la conception de l'accès électrique sur l'émission optique et notamment l'influence du crosstalk; c'est sur ce dernier point que nous insisterons.

En effet, comme dans les circuits électriques, le crosstalk a pour incidence la perturbation des informations transmises, à la différence que le phénomène se répercute sur le fonctionnement de l'émetteur laser [2] et ne s'amplifie pas lors de la transmission par fibre. Le crosstalk peut alors être caractérisé à partir de la mesure du paramètre S21 d'une ligne de transmission optoélectronique.

C'est ainsi que nous présentons dans une première partie les mesures effectuées sur des barrettes de VCSELS (Fig. 1 a) à accès microruban fabriquées par Avalon Photonics. Les résultats nous permettent d'estimer les perspectives d'utilisation d'une telle structure.

Le deuxième point de notre étude concerne la mesure de barrettes à accès coplanaire fournies par Ulm Photonics (Fig. 1 b) avec des résultats reflétant cette modification de structure.

II. EQUATIONS D'ÉVOLUTION ET MODÉLISATION DE VCSEL

La modélisation en signal [1][2] s'appuie sur deux équations traduisant la continuité du nombre de porteurs (N) et du nombre de photons (P) dans l'oscillateur laser.

Les équations d'évolution s'écrivent de la façon suivante:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i \cdot I}{q \cdot N_w} - (A + B \cdot N) \cdot N - G \cdot P \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = N_w \cdot \Gamma \cdot \beta \cdot B \cdot N^2 + N_w \cdot G \cdot P - \frac{P}{\tau_p} \quad (2)$$

où N_w est le nombre de puits quantiques, $\frac{\eta_i \cdot I}{q \cdot N_w}$ représente l'inversion de population dans chaque puits, le terme $A+B \cdot N$ indique les recombinaisons non radiatives, G est le gain modal, correspondant à l'effet laser et τ_p est la durée de vie des photons dans la zone active.

D'autre part, la conversion courant-puissance optique peut être modélisée sous forme d'éléments simples de l'électronique (Résistances, capacités, inductances). De part la structure verticale, le schéma électrique équivalent du VCSEL est composé de trois cellules en cascade: le miroir de Bragg supérieur (DBR), la cavité, le miroir de Bragg inférieur (comme le montre la Figure 2). Le modèle électrique de la cavité a été obtenu en se basant sur celui d'une diode laser conventionnelle: le mécanisme électronique dans la zone active est alors représenté par la résistance R_j et la capacité C_j , le stockage des photons et l'amortissement de la résonance sont équivalent à une inductance L_0 et une résistance R_0 . Les miroirs de Bragg étant constitués d'un empilement périodique d'hétérojonctions, il est nécessaire de prendre en compte les effets résistifs et capacitifs à chaque interface. Le miroir supérieur est donc modélisé par une résistance, R_{mtop} , et une capacité, C_{mtop} , globalisant les résistances et capacités de chaque interface. De même le miroir inférieur est représenté par $R_{mbottom}$ et $C_{mbottom}$. Ces cellules sont modifiables selon la structure du VCSEL, comme le montrent les Figure 1a) et b) (par exemple, pour le VCSEL à diaphragme d'oxyde, le rétrécissement lié aux jonctions semiconducteur/isolant est modélisé par une cellule RC).

En faisant une approximation petit signal, il est alors possible de confronter les équations du circuit équivalent de la zone active aux équations d'évolution et d'en déduire des relations entre les éléments du circuit et les paramètres intrinsèques.

Dans ce cas, on superpose au courant de polarisation I_0 un courant sinusoïdal $\Delta I(t)$ tel que $\Delta I(t) \ll I_0$. Cette modulation nous permet, d'une part, d'écrire les équations de Kirchoff du circuit équivalent de la cavité:

$$\frac{d \Delta V}{dt} = \frac{\Delta I}{C_j} - \frac{\Delta V}{R_j \cdot C_j} - \frac{i_L}{C_j} \quad (3)$$

$$\Delta V = L_0 \frac{di}{dt} + R_0 \cdot i_L \quad (4)$$

où ΔV et ΔI sont respectivement la tension et le courant d'entrée, i_L est le courant équivalent à la variation du flux de photons.

En utilisant la relation suivante issue de la caractéristique courant tension de la diode laser:

$$\frac{\Delta V}{V_T} = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\Delta N}{N_0} \quad (5)$$

il devient possible de confronter les équations d'évolution et les équations du circuit, afin d'obtenir les relations suivantes entre les paramètres intrinsèques du VCSEL et les éléments du circuit:

$$C_j = \frac{N_0 \cdot q \cdot N_w}{V_T \cdot \eta_i} \quad (6)$$

$$R_j = \frac{V_T}{N_0} \cdot \frac{1}{\frac{I - I_{th}}{N_0 - N_{tr}} + \frac{q \cdot N_w}{\eta_i} \cdot (A + 2 \cdot B \cdot N_0)} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{V_T q P_0^2 g_0 (N_0 - N_{tr})}{N_0 \eta_i (I_0 - I_{th})^2 (2 \Gamma \beta B N_0 + \frac{\eta_i}{q N_w} \frac{I_0 - I_{th}}{N_0 - N_{tr}})} \quad (8)$$

$$R_0 = L_0 \cdot \left(\gamma_p - \frac{\eta_i^2 \cdot (I - I_{th})^2}{q^2 \cdot N_w \cdot P_0^2 \cdot g_0 \cdot (N_0 - n_{tr})} \right) \quad (9)$$

Ces paramètres sont déterminés expérimentalement à partir de la mesure du coefficient de réflexion électrique (S11) en entrée du VCSEL et du coefficient de transmission optoelectronique d'une liaison VCSEL+ fibre+ photodiode. Ces mesures sont alors comparées à celles simulées à partir du schéma électrique équivalent à l'aide du logiciel ADS. Cette validation a été réalisée sur les différentes structures de VCSEL présentées dans les paragraphes suivants.

II. BARRETTE DE VCSELS à accès microruban

Les barrettes à accès microruban constituent l'une des premières générations de barrettes de VCSELS. Les diodes lasers sont donc reportées en cathodes communes accessibles par la face inférieure, une métallisation annulaire de la face supérieure du VCSEL constitue l'anode qui est reliée à un plot de contact via une ligne. Compte tenu de ces spécificités, il est impossible de moduler directement de tels composants à des fréquences RF, d'où la nécessité de reporter les barrettes sur un support adapté. Ainsi, les barrettes sont reportées par brasure sur une plaque d'alumine comportant 8 pistes coplanaires espacées de 250µm. La liaison VCSEL-ligne est alors réalisée par des wire bonding de quelques centaines de microns.

Dans le cadre de nos tests, il est donc possible d'alimenter un tel dispositif par des pointes RF. La lumière émise par le VCSEL est alors recueillie par une sonde optique, guidée vers une photodiode à travers une fibre multimode de longueur inférieure à un mètre. Cette liaison est donc reliée en entrée et en sortie à un analyseur de réseau vectoriel afin de relever les paramètres S11 et S21.

Or, nous avons remarqué d'une part, que le signal était fortement perturbé en entrée et d'autre par, qu'il était possible d'observer une émission de photons sur un VCSEL voisin non modulé [3].

Ce phénomène est dû à un crosstalk électrique apparaissant avant que le signal électrique ne soit traduit en signal optique. Dans ce cas, ce sont les chemins d'accès--ligne coplanaire, microruban et wire

bonding-- qui sont susceptibles de générer ce couplage.

En effet, les signaux haute fréquence vont se propager d'un accès électrique à l'autre par des couplages capacitifs et inductifs. Par l'intermédiaire de ces couplages, des porteurs sont injectés dans des lasers non modulés et adjacents au laser modulé, ce qui engendre un signal optique parasite. Il est alors possible de déterminer le crosstalk en fonction de la fréquence, à partir de la différence entre les paramètres S₂₁ du VCSEL émettant le signal parasite et du VCSEL modulé.

En utilisant le modèle physique de VCSEL, les données relatives au circuit électrique d'accès, et en se basant sur les études de la diaphonie dans des transmissions sur plusieurs canaux, ce phénomène a été modélisé sous la forme du schéma électrique équivalent de deux VCSELs avec leurs accès électriques respectifs. Comme le représente la figure 3, le couplage entre les lignes coplanaires est modélisé par une inductance mutuelle et le couplage entre les wire bonding par une capacité et une résistance reliant les deux canaux. En optimisant les paramètres S₂₁ des deux canaux nous avons pu en déduire l'évolution du crosstalk en fonction de la fréquence (Figure 4).

Ces résultats montrent qu'au-dessus de 1 Ghz le crosstalk augmente et limite donc la transmission à cette fréquence. Ainsi, il est impossible d'utiliser de telles barrettes dans des liaisons par fibre optiques à 10Gbps.

III. BARRETTE DE VCSELs à accès coplanaire

Contrairement aux barrettes caractérisées précédemment, le constructeur U-L-M Photonics propose des composants à accès coplanaire dont le contact central est intégré sur l'anode du VCSEL. La masse est remontée sur un "pad" de la face supérieure par "via-hole" (Fig. 1 b). L'accès est donc direct, ce qui évite le report de la barrette sur céramique et réduit considérablement les risques de perturbations du signal dus aux longueurs électriques.

On peut donc s'attendre à avoir une mesure beaucoup moins perturbée et à pouvoir atteindre des fréquences plus importantes. En utilisant la même méthode de mesure de paramètres S que pour les précédentes barrettes, des résultats non parasités ont été obtenus sur une plage de fréquences allant de 45MHz à 10 Ghz. Comme l'indique la Figure 5, on a un très bon accord entre la mesure et la simulation, aussi bien en réflexion (module et phase) qu'en transmission (module uniquement, compte tenu de la nature du signal). En balayant toute la barrette avec la sonde optique, nous n'avons observé aucune lumière parasite et donc aucun crosstalk électrique jusqu'à 10GHz, ce qui est un avantage conséquent pour les modules d'interconnexion optique.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Ainsi, bien que les barrettes de VCSELs ouvrent des perspectives de réalisation de transmissions par fibre optique à des débits supérieurs à 10 Gbps, les accès électriques peuvent constituer un obstacle à ce développement. Comme nous l'avons montré, une première alternative à ce problème est donc de développer le report à accès coplanaire direct. Il reste à voir si d'autres couplages ne limiteront pas le système au niveau de la connexion barrette-circuit électronique de commande.

V. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement Mathias PEZ de la société D-Lightsys pour nous avoir permis de réaliser des mesures sur des VCSELs d'Avalon Photonics, et Martin Grabherr de la société U-L-M Photonics pour nous avoir fourni des barrettes de VCSELs.

REFERENCES

- [1] A. Rissons, "Modélisation et Caractérisation optoélectronique de diodes lasers à Cavité verticale émettant par la surface", thèse en Optoélectronique et Hyperfréquences, Supaero, Toulouse, Octobre 2003.
- [2] G. Kim, X. Han, and R. T. Chen, "Crosstalk and Interconnection Distance Considerations for Board-to-Board Optical Interconnects Using 2-D VCSEL and Microlens Array", IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 12, NO. 6, Juin 2000.
- [3] M. W. Maeda, C. Chang-Hasnain, A. Von Lehmen, H. Izadpanah, Chinlon Lin, M.Z. Iqba, L. Florez, and J. Harbison, "Multigigabit/S Operation of 16-Wavelength Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array", IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 3, NO. 10, Octobre 1991.



Fig. 1: a) barrette à accès microruban AVALON Photonics b) barrette à accès coplanaire ULM Photonics

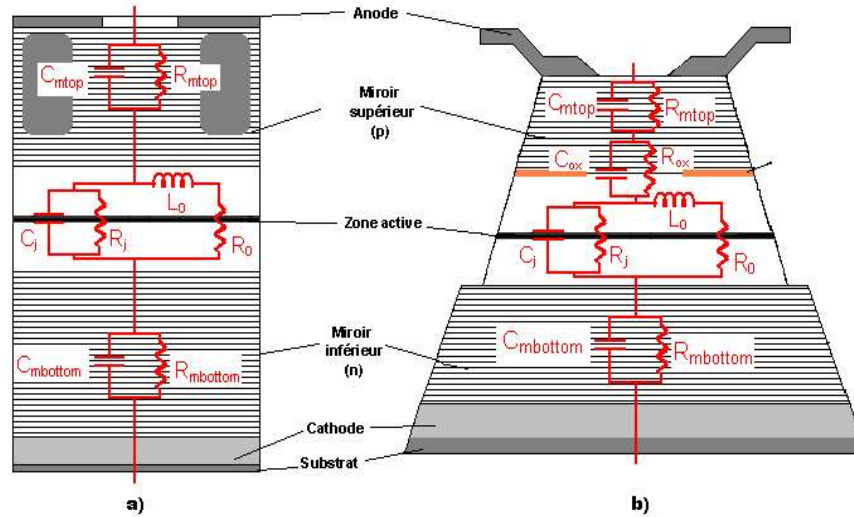


Fig. 2: Schéma électrique équivalent comportemental a) d'un VCSEL à implantation de protons, b) d'un VCSEL à diaphragme d'oxyde.

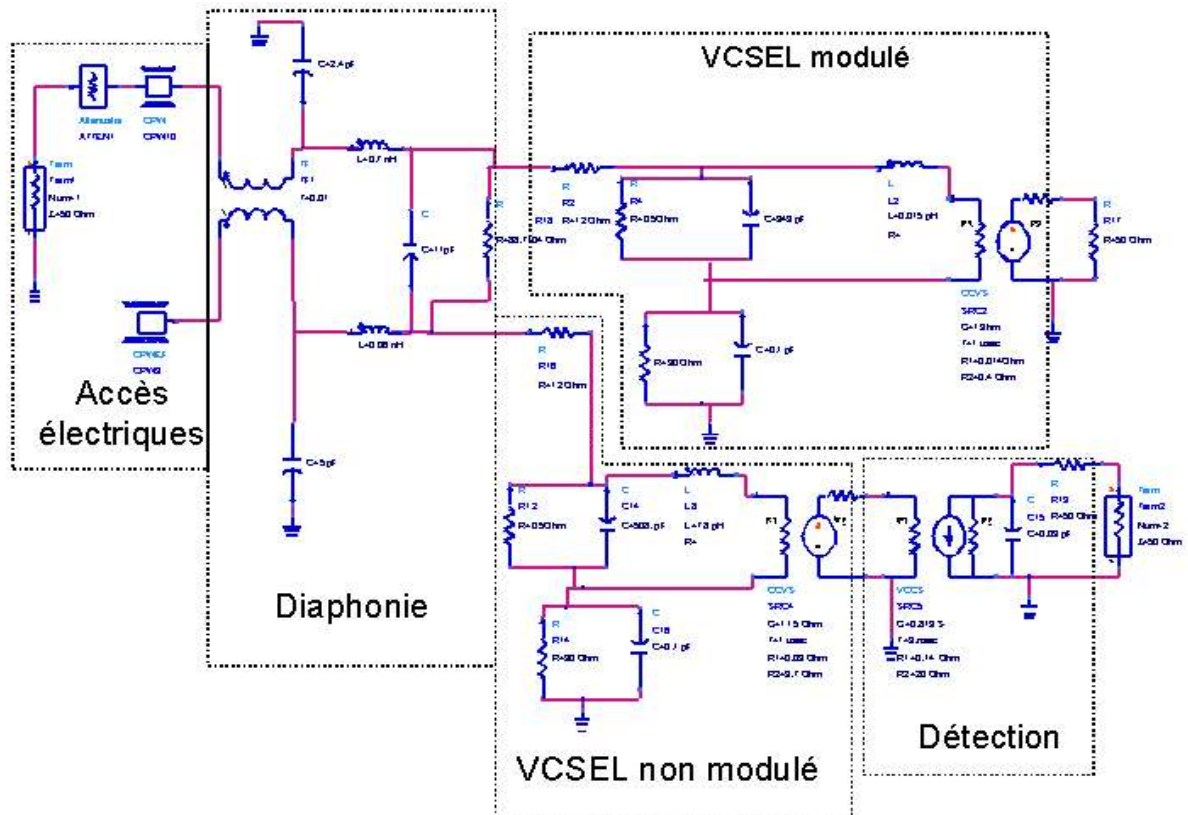


Fig. 3: schéma équivalent de deux VCSELs adjacents avec inclusion de la diaphonie

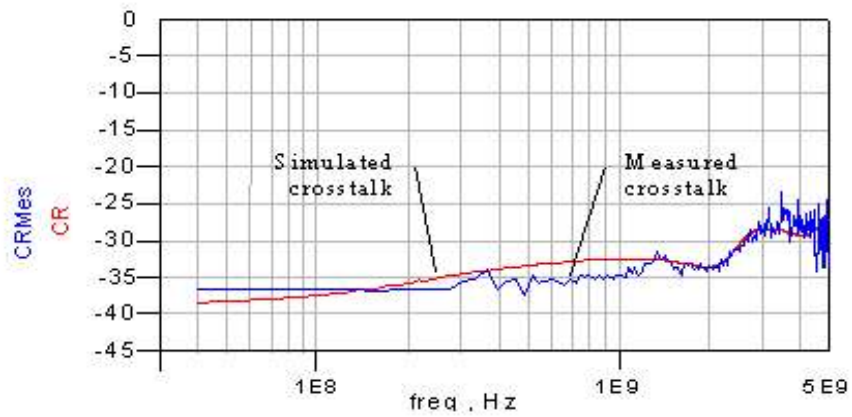


Fig. 4 Crosstalk mesuré et simulé d'un VCSEL en barrette à accès micro-ruban

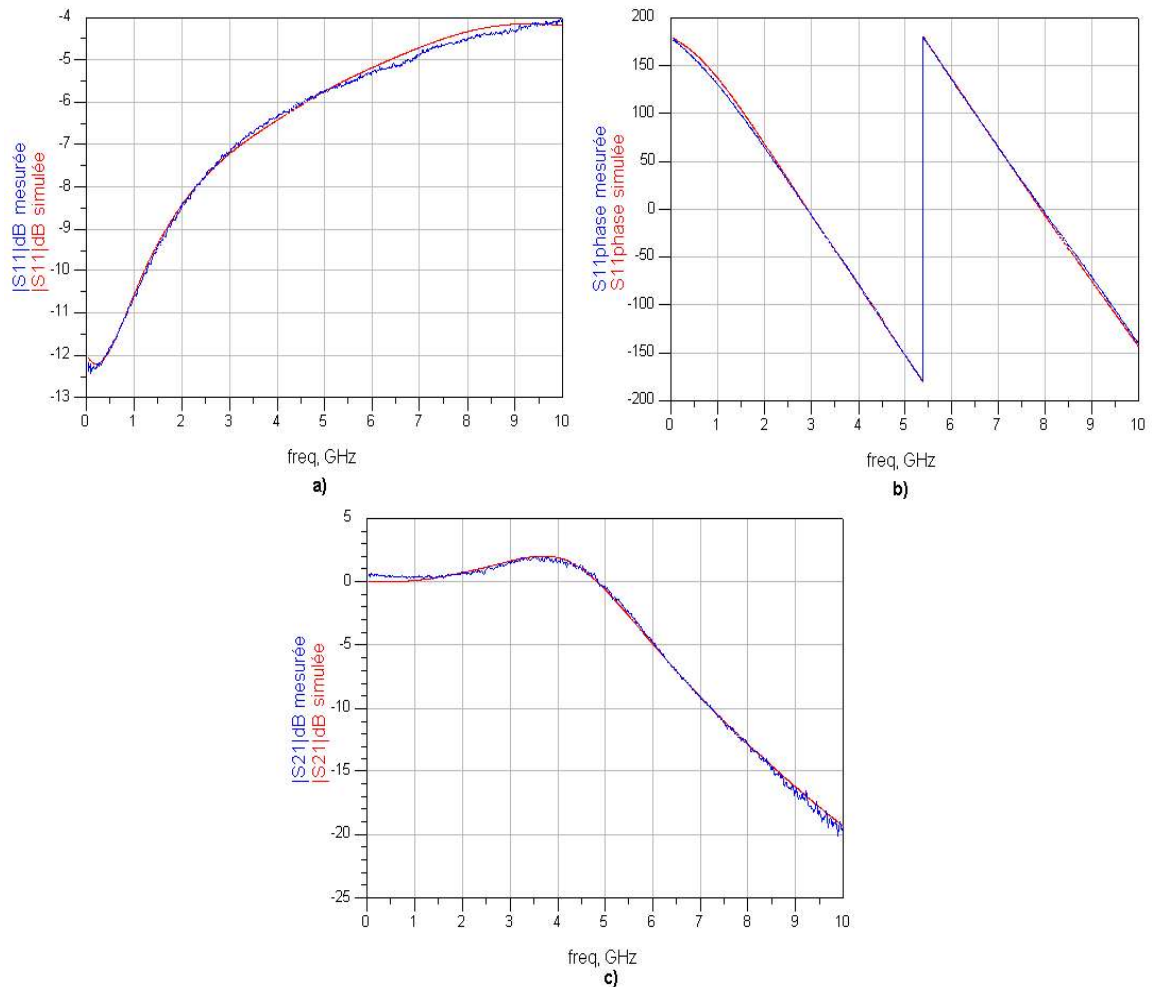


Fig. 5: mesures et simulations : du paramètre S_{11} a) en module et b) phase, c) du module du paramètre S_{21}