

# Conception, fabrication et caractérisation de cavités photoniques à haut facteur de qualité intégrées dans des diodes électroluminescentes organiques

Direction Alexis FISCHER, Azzedine Boudrioua, Mahmoud CHAKAROUN

## Contexte Universitaire

Les travaux doctoraux se dérouleront au sein de l'équipe Photonique Organique et Nanostructure du Laboratoire de Physique des Lasers, avec des travaux expérimentaux qui auront lieu au sein de la Centrale de Proximité en Nanotechnologies de Paris Nord. Des travaux de modélisation sur la dynamique des lasers auront lieu en collaboration avec l'Université Technique d'Eindhoven.

Ces travaux doctoraux se dérouleront en parallèle du projet européen HiSOPE (High-Speed Organic Photonic and optoElectronics) lauréat de l'appel à projet EIC Pathfinder Responsible Electronics que coordonne l'équipe PON et qui crée un environnement favorable et stimulant avec cinq partenaires européens du domaine.

## Contexte Scientifique

L'équipe Photonique Organique et Nanostructure du Laboratoire de Physique des Lasers a obtenu plusieurs avancées significatives et premières mondiales très prometteuses pour réaliser la diode laser organique. Pour concevoir et réaliser des diodes laser organiques, trois briques essentielles doivent être maîtrisées et intégrées ensemble ; premièrement un milieu à gain laser optimal qui soit aussi un semiconducteur, deuxièmement l'excitation électrique intense et troisièmement une cavité laser à haut facteur de qualité intégrée.

Le défi de l'excitation électrique est maîtrisé par l'équipe PON qui a introduit des électrodes coplanaires (CPW) inspirée des techniques microondes permettant ainsi d'atteindre des densités de courant jusqu'à 40kA/cm<sup>2</sup>. Ces densités de courant au meilleur niveau mondial constituent un avantage pour atteindre un seuil laser dans de nombreuses configurations [1]. L'équipe PON a étudié différents types de cavités laser à savoir des cavités de types microcavités Fabry-Perot coplanaires [2], ainsi que des structures photoniques de type cristaux photoniques [3] et plus récemment des cavités à contre-réaction répartie (Distributed Feedack – DFB) [4]. Les microcavités DFB d'ordre mixte ont été suggéré par Karnutsch, a été repris par les groupes de Samuel à l'Université de Saint Andrews et celui d'Adachi au Japon [5,6,4]. L'intégration de ces cavités dans les OLEDs est maîtrisée par l'équipe PON, cependant, les facteurs de qualité obtenus sont difficilement estimés dans la plage de 250-500 tandis que les facteurs  $Q > 3000$  sont nécessaires [1].

Si les structures photoniques appliquées aux semiconducteurs organiques constituent une solution prometteuse pour la photonique organique et le développement de nouvelles sources de lumière cohérente sous excitation électrique car elles sont compatibles avec l'excitation électrique intense, il n'en reste pas moins qu'elles sont mal comprises, mal modélisées et leurs fabrications demandent une forte maîtrise technologique.

**Ce projet se focalise donc sur l'intégration de structures photoniques de type microcavités DFB à très haut facteur de qualité dans des OLEDs rapides c'est à dire des cavités photoniques compatibles avec l'excitation électriques.**

## Problématique scientifique

Les cavités DFB fabriquées dans l'équipe n'ont jusqu'à présent pas permis d'atteindre des facteurs de qualité suffisamment important pour réduire le seuil laser.

Les cavités mixtes DFB de l'état de l'art sont constituées de trois sections; la 1<sup>re</sup> et la 3<sup>e</sup> section sont des réseaux DFB du 1<sup>er</sup> ordre sont des miroirs centrés sur la résonance de la cavité, tandis que la 2<sup>e</sup> section est un un réseau d'ordre 2 introduit à la fois pour insérer un espace entre les miroirs et pour extraire la lumière perpendiculairement au plan de confinement du laser.

La section 2 est ajoutée parce que récupérer la lumière de la DLO par la tranche est difficile. Cependant, la lumière extraite de la section d'ordre 2 induit également des pertes optiques pour la cavité laser et dégrade ainsi le facteur Q.

La réduction de la longueur d'ordre 2 entre les 2 miroirs a deux effet contradictoire, d'une part cela augmente intervalle libre-spectrale (ISL) et donc réduit le nombre de mode, mais d'autre part cela réduit le gain. À finesse de cavité fixe, la largeur de raie de la cavité réduit lorsque l'ISL diminue, ce qui entraîne une augmentation du facteur Q. L'amplification se produit également dans la section de deuxième ordre et réduit avec sa longueur. Ainsi, la combinaison des effets est incertaine, bien que le Pr. Adachi prétende qu'il existe un optimum avec 10 paires de périodes du second ordre l'assertion manque d'explication analytique et systématique.

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'effectuer une recherche théorique, de simulation et expérimentale systématique avec des cavités DFB à 4 section au lieu de 3 afin de découpler l'effet de couplage de l'amplification et des effets FSR. Par conséquent, trois types d'innovations sont introduites au niveau de la conception, de la modélisation et des processus :

## Objectifs des travaux doctoraux

La doctorante ou le doctorant aura pour mission principale de contribuer à la conception, à la réalisation de structures photoniques de type microcavités DFB d'ordre mixte, à leur intégration dans une OLED et à leur caractérisation sous excitation électrique. Elle ou il suivra une démarche scientifique structurée, composée des trois étapes suivantes

**Étape 1 : Conception de la cavité : Étude bibliographique** : Une première tâche consistera à réaliser une revue de littérature approfondie sur les diodes lasers organiques, en mettant particulièrement l'accent sur les cavités DFB, leur conception, et leur utilisation dans ce contexte. Cette phase permettra au stagiaire de se familiariser avec les enjeux et les avancées récentes dans ce domaine de recherche.

La problématique principale de cette étape concerne la séparation des pertes par extraction et du gain. Pour séparer les pertes induites par le couplage externe de l'effet d'amplification, de nouvelles cavités à 4 sections au lieu de 3 sont proposées. Il s'agit d'ajouter une section d'amplification sans réseau. Le facteur de qualité sera étudié pour différentes configurations et combinaisons des différentes sections. Cela comprendra une étude en fonction des longueurs (ou du nombre de traits) de :

- 1- Miroir 1 faits d'un réseau du 1<sup>er</sup> ordre.
- 2- la section de gain sans réseau,
- 3- la section de réseau d'ordre 2 jouant le rôle d'extraction de la lumière (outcoupling), et
- 4- Miroir 1 faits d'un réseau du 1<sup>er</sup> ordre.

Nous étudierons également les configurations avec la section de deuxième ordre (outcoupling) située à l'extérieur de la cavité et des configurations avec un miroir fait d'un réseau d'ordre 1 plus court que l'autre miroir.

Un deuxième aspect de la conception des cavités, est d'identifier le détuning optimal de la résonance des cavités par rapport au pic d'électroluminescence du matériau à gain laser considéré. En effet, dans un résultat récent, l'équipe a démontré que la résonance optimale de la cavité doit être décalée du pic du spectre du matériau à gain laser [7]. Ceci est dû au fait que, le spectre d'absorption étant décalé du côté des petites longueurs d'ondes par rapport au spectre d'électroluminescence en raison du décalage de Stoke, il conduit à une plus grande absorption résiduelle sur ce côté du pic d'électroluminescence. La résonance de cavité doit alors être décalée du maximum d'électroluminescence pour offrir le gain effectif optimal plutôt que le gain optimal. Un raisonnement similaire s'applique à l'absorption des triplets. Afin d'identifier expérimentalement le décalage optimal, une matrice de cavités avec différents décalages sera conçue et fabriquée.

**Etape 2: Modélisation des cavités :** Une compréhension physique est nécessaire pour guider la conception des cavités. Pour cette raison, un modèle analytique sera développé. L'équipe possède une expertise dans le formalisme des matrices de transfert (FMT) [8] pour développer un modèle original amélioré inspiré par la théorie des ondes couplées (CWT) et le formalisme de transfert matriciel généralisé (FMTG) [9] afin de prendre en compte dans le calcul du facteur Q les pertes optiques rayonnées hors de la cavité par le réseau du 2e ordre. Les modèles qui en résultent, inspirés des travaux proposés par Shuang Li et al., permettront de comparer pour la première fois les cavités DFB à 3 et 4 sections mentionnées ci-dessus [10]. Pour cette étape ; l'étudiant profitera de l'expérience de l'équipe PON en terme de modélisation par la FMT et de simulation sous Matlab.

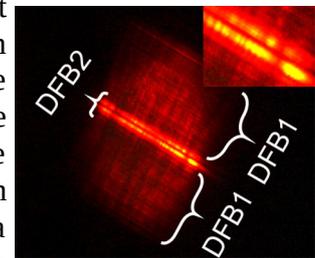


Figure 1: Double-lobe emission of a mixed-order DFB cavity-preliminary results from Partner 2

**Etape 3: Fabrication de cavités à haut facteur de qualité.** Le troisième objectif vise la fabrication de cavités multisections DFB à hauts facteurs de qualités. Les cavités DFB fabriquées par l'équipe sont faites avec une couche épaisse de 300 nm de résistance électro-sensible à base de silsesquioxane (HSQ) enduit directement sur l'électrode d'oxyde d'étain et d'indium et structuré par lithographie ebeam. Le travail de fabrication nécessite une grande précision, avec des incertitudes de l'ordre du nanomètre, ce qui représentera un défi technique et physique majeur. La structure photonique finale sera intégrée dans des dispositifs à semiconducteurs organiques (OLED) puis caractérisée. Pour cette étape ; l'étudiant profitera de la grande expérience de l'équipe PON en terme de fabrication en salle blanche notamment en lithographie électronique

## Compétences et qualifications souhaitées

La ou le stagiaire devra faire preuve de rigueur scientifique et de bonnes capacités expérimentales. Une bonne maîtrise des outils de modélisation (Matlab) est un atout. Il est attendu de la candidate ou du candidat rigueur et précision dans le travail expérimental.

- Master 2 ou diplôme d'ingénieur en électronique, physique, matière/ matériaux, optique, dispositifs photoniques et/ou nanotechnologies
- Des connaissances en matériaux organiques ou en chimie organique constituent un plus
- Compétences en modélisation et en simulation de structures photoniques constituent un plus
- Une expérience en salle blanche constitue un plus
- Rigueur, autonomie et capacité à travailler en équipe

## Candidature

Les candidats intéressés soumettent leur CV accompagné d'une lettre de motivation aux deux adresses suivantes : [fischer@univ-paris13.fr](mailto:fischer@univ-paris13.fr)

- [1] A. Ouirimi, A. C. Chime, N. Loganathan, M. Chakaroun, A. P. A. Fischer, and D. Lenstra, "Threshold estimation of an organic laser diode using a rate-equation model validated experimentally with a microcavity OLED submitted to nanosecond electrical pulses," *Organic Electronics*, vol. 97, p. 106190, Oct. 2021, doi: [10.1016/j.orgel.2021.106190](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106190).
- [2] A. Coens, M. Chakaroun, A. P. A. Fischer, M. W. Lee, A. Boudrioua, B. Geffroy, G. Vemuri, "Experimental optimization of the optical and electrical properties of a half-wavelength-thick organic hetero-structure in a Microcavity," *Opt. Express*, OE, vol. 20, no. 28, pp. 29252–29259, Dec. 2012, doi: [10.1364/OE.20.029252](https://doi.org/10.1364/OE.20.029252).
- [3] Gourdon, F., N. Fabre, M. Chakaroun, J. Solard, E. Cambriel, A. M. Yacomotti, S. Bouhoule, A. Fischer, A. Boudrioua, et B. Geffroy. « Study of two-dimensional photonic crystals cavity using organic gain materials ». In *Organic Photonics V*, 8435:178-84. SPIE, 2012. <https://doi.org/10.1117/12.922469>.
- [4] A. Ouirimi, A. C. Chime, N. Loganathan, M. Chakaroun, Q. Gaimard, and A. P. A. Fischer, "Multiscale Fabrication Process Optimization of DFB Cavities for Organic Laser Diodes," *Micromachines*, vol. 15, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2024, doi: [10.3390/mi15020260](https://doi.org/10.3390/mi15020260).
- [5] Karnutsch, et al., 2007. Improved organic semiconductor lasers based on a mixed-order distributed feedback resonator design. *Applied Physics Letters* 90, 131104. <https://doi.org/10.1063/1.2717518>
- [6] A. Ouirimi, A. C. Chime, N. Loganathan, M. Chakaroun, D. Lenstra, et A. P. A. Fischer, « Design, Fabrication and Validation of Mixed Order Distributed Feed-Back Organic Diode Laser Cavity », *Photonics*, vol. 10, n° 6, Art. n° 6, juin 2023, doi: [10.3390/photonics10060670](https://doi.org/10.3390/photonics10060670).
- [7] D. Lenstra, A. Ouirimi, N. Loganathan, M. Chakaroun, and A. P. A. Fischer, "Practical theory of spectral evolution in an organic laser diode," *Organic Electronics*, p. 106852, May 2023, doi: [10.1016/j.orgel.2023.106852](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2023.106852).
- [8] M. Chakaroun, A. T. Diallo, S. Hamdad, S. Khadir, A. P. A. Fischer, and A. Boudrioua, "Experimental and Theoretical Study of the Optical Properties Optimization of an OLED in a Microcavity," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Nov. 2018, doi: [10.1109/TED.2018.2870070](https://doi.org/10.1109/TED.2018.2870070).
- [9] J.-P. Weber, S. Wang, A New Method for the Calculation of the Emission Spectrum of DFB and DBR Lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 27 (10), pp. 2256-2266, 1991; J.-P. Weber, Correction to "A New Method for the Calculation of the Emission Spectrum of DFB and DBR Lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 29 (1), p. 296, 1993.
- [10] L. Shuang Li, et al., Analysis of surface-emitting second-order distributed feedback lasers with central grating phaseshift. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 2003. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819467>