



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

"Résonateurs et couplage de modes" : un module de Master en interaction forte avec des problématiques de recherche actuelles en laboratoire

"Resonators and Mode coupling": a MSc teaching module in strong interaction with research-oriented laboratory issues

Yann G. BOUCHER^{*1}, Patrice FÉRON^{**2}

* FOTON – Systèmes Photoniques, CNRS, UMR 6082, CS 80518, 22305 Lannion Cedex, France

¹ ENIB, CS 73862, 29238 Brest Cedex 3, France, yann.boucher@enib.fr

² ENSSAT, CS 80518, 22305 Lannion Cedex, France, patrice.feron@enssat.fr

Mots-clés : Résonateur, Modes de galerie, Théorie des modes couplés, Enseignement
Keywords: Resonator, Whispering Gallery Modes (WGM), Coupled Mode Theory (CMT), Teaching

Résumé

Notre module de M2 nous servira d'exemple d'enseignement de l'Électromagnétisme en relation étroite avec nos thématiques de recherche, notamment en termes de micro-résonateurs et de leurs applications. Le formalisme du couplage de modes nous fournit la trame à partir de laquelle nous pouvons mettre en œuvre des outils de modélisation simples, qui se prêtent bien à une approche analytique des phénomènes expérimentalement observés.

Introduction

Le master Photonique^[1] est une formation orientée recherche dispensée simultanément, à l'échelle de la Région Bretagne, par quatre écoles d'ingénieurs (ENIB et Télécom Bretagne à Brest, ENSSAT à Lannion, INSA de Rennes) et deux universités (Université de Bretagne Occidentale et Université de Rennes 1), tous établissements co-habilités. Cette formation multisite (Brest, Lannion, Rennes) propose, après un premier trimestre en tronc commun, trois parcours thématiques fortement mutualisés : (A) Télécommunications optiques, (B) Nano-photonique, (C) Photonique pour le vivant et l'environnement. Porté conjointement par l'ENIB et par l'ENSSAT, notre module « Résonateurs et couplage de modes » s'inscrit dans le parcours B.

En nous appuyant sur une expérience de plusieurs années, nous nous proposons d'illustrer la manière dont nous visons un bon équilibre entre formation académique, outils génériques de modélisation et illustration par des recherches applicatives, en lien étroit avec des problématiques auxquelles nous sommes quotidiennement confrontés dans le cadre du laboratoire. C'est ainsi que le contenu du module évolue continuellement au rythme des avancées de nos recherches communes, qu'il s'agisse de la caractérisation et de la modélisation spectrales et temporelles de micro-résonateurs à modes de galerie (actifs ou passifs), ou encore de réseaux de guides périodiques couplés.

1. Micro-résonateurs

Notre thématique de recherche *Micro-résonateurs* s'inscrit dans le cadre du groupe *Lasers et Télécoms*, au sein de l'équipe lannionaise *Systèmes Photoniques* de l'UMR FOTON^[2] (Fonctions Optiques pour les Technologies de l'information). Comme en témoigne le récent Atelier Photonique sur Silicium^[3], organisé à Paris en janvier 2013 sous l'égide du CNRS, les micro-résonateurs sont un élément-clef de nombreux dispositifs indispensables à la montée en débit, l'un des enjeux des télécommunications optiques modernes. À ce titre, leur importance économique, technologique et scientifique n'est plus à démontrer. Au sein d'une vaste famille, le résonateur micro-sphérique à modes de galerie [Figure 1] constitue un sujet d'étude particulièrement attractif, non seulement pour ses propriétés, mais encore en tant que système-modèle.

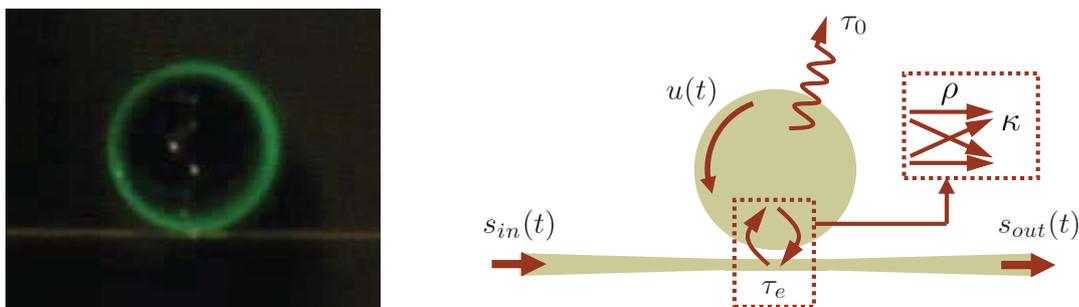


Figure 1 : À gauche, micro-résonateur sphérique (diamètre 80 μm) en verre fluoré dopé Erbium, réalisé à FOTON – Systèmes Photoniques. On distingue clairement en gris le guide d'accès monomode (fibre effilée) qui sert de dispositif d'insertion-extraction : ici, le pompage optique à la longueur d'onde $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ est responsable d'une double fluorescence par *up-conversion* (absorption multiphotonique) autour de $\lambda_1 = 520 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 540 \text{ nm}$, qui rend visible (en vert) le mode sélectionné. À droite, schéma de principe du même résonateur : le signal d'entrée $s_{in}(t)$ se couple vers la cavité par l'intermédiaire d'un coupleur directif caractérisé par ses seuls paramètres de transmissions directe (ρ) et croisée (κ) ; le champ interne $u(t)$ comme le signal de sortie $s_{out}(t)$ portent la signature spectrale du mode de cavité sélectionné ; les termes phénoménologiques τ_0 et τ_e représentent les temps caractéristiques respectivement associés aux effets intrinsèques de la cavité (atténuation ou amplification) et à ceux du coupleur (taux d'insertion-extraction).

2. Approche phénoménologique

2.1. Facteur de qualité

Un micro-résonateur est trop souvent réduit à son seul facteur de qualité, ou facteur Q . Or, la valeur pertinente de Q dépend en réalité de l'application visée. Selon la gamme considérée, pour des topologies comparables, les ordres de grandeur peuvent ainsi varier typiquement de 10^3 (filtre *add-drop*) à plus de 10^9 (amplification sélective, émetteur laser). Les outils de caractérisation doivent donc impérativement s'adapter au contexte, d'où une problématique expérimentale sous-jacente, de nature quasiment métrologique : que mesure-t-on ? avec quels outils ? Ces questions nous ont ainsi conduits à adapter à notre système une méthode d'analyse temporelle, dite *Cavity Ring Down* (CRD)^[4], qui consiste à balayer en fréquence un signal laser de part et d'autre d'une raie de résonance. Sous réserve d'hypothèses simplificatrices raisonnables, le signal temporel détecté en sortie peut s'exprimer analytiquement en fonction de deux paramètres indépendants, que l'on peut relier physiquement aux pertes intrinsèques du résonateur d'une part, au taux d'extraction du coupleur de sortie d'autre part^[5].

2.2. Couplage de modes

Prenons pour exemple le schéma de principe de la Figure 1. Un des fils conducteurs de notre approche est le formalisme du couplage de modes (ou CMT pour *Coupled Mode Theory*). Nous distinguons deux formulations différentes de cette théorie. Une approche *stationnaire* articulée avec les outils usuels de l'Algèbre linéaire, notamment le formalisme matriciel^[6], conduit à une description synthétique de la fonction de transfert des dispositifs étudiés, qu'ils soient passifs, actifs (laser^[7]) ou non-linéaires^[8]. Au voisinage d'une résonance, le système {cavité + coupleur} peut alors être simplement décrit par sa fréquence de résonance et la largeur de celle-ci, elle-même reliée à la durée de vie globale τ de l'amplitude $u(t)$ du champ dans la cavité. En première approximation, $\tau^{-1} = (\tau_0^{-1} + \tau_e^{-1})$. Une seconde formulation initialement proposée par H. Haus^[9], temporelle celle-ci, permet une analyse très simple des propriétés *dynamiques* du résonateur^[5]. En fonction de l'application visée, les résonateurs et dispositifs associés sont décrits par l'une ou l'autre des deux expressions de la théorie des modes couplés.

3. Conclusion

Le caractère transversal et générique des méthodes et outils de simulation développés est complémentaire des approches numériques (FDTD, éléments finis & PML...) couramment utilisées pour la modélisation de ce type de structures. Ces méthodes donnent une formulation analytique (qualitative et phénoménologique) des régimes de couplage, des propriétés dispersives structurelles de ces dispositifs... et permettent une certaine intuition physique des phénomènes intervenant dans ces dispositifs.

Les auteurs

Yann G. Boucher est Maître de Conférences (HDR) à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB). Patrice Féron est Professeur des Universités à l'École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie (ENSSAT) à Lannion. Tous deux effectuent leurs recherches au sein du Laboratoire FOTON (UMR CNRS 6082), équipe Systèmes Photoniques.

Références bibliographiques

- [1] Site du Master : http://www.enssat.fr/fr_FR/ueb/master-photonique
- [2] Site du laboratoire : <http://foton.cnrs.fr/v2012/>
- [3] Atelier Photonique sur Silicium : <http://workshopcnrs.ief.u-psud.fr/index.html>
- [4] J. Poirson, F. Bretenaker, M. Vallet, A. Le Floch, “Analytical and experimental study of ringing effects in a Fabry-Perot cavity. Application to the measurement of high finesses”, J. Opt. Soc. Am. B, Vol. **14** (11), pp. 2811-2817, 1997.
- [5] Y. Dumeige, S. Trebaol, L. Ghişa, T.K.N. Nguyễn, H. Tavernier, P. Féron, “Determination of coupling regime of high- Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers”, J. Opt. Soc. Am. B, Vol. **25** (12), pp. 2073-2080, 2008.
- [6] A. Yariv, “Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides”, Electron. Lett., Vol. **36**, pp. 321-322, 2000.
- [7] Y.G. Boucher, P. Féron, “Generalized transfer function: A simple model applied to active single-mode microring resonators”, Optics Comm., Vol. **282** (19), pp. 3940-3947, 2009.
- [8] L. Ghişa, Y. Dumeige, T.K.N. Nguyễn, Y.G. Boucher, P. Féron, “Performances of a fully Integrated All-Optical Pulse Reshaper based on Cascaded Coupled Nonlinear Microring Resonators”, J. Lightwave Technol., Vol. **25** (9), pp. 2417-2426, 2007.
- [9] H. Haus, “Waves and fields in optoelectronics”, Prentice-Hall, 1984.