

Optimisation robuste de forme pour la nano-photonique

Nicolas LEBBE

Université Grenoble Alpes, LJK, CEA, LETI, F-38000 Grenoble, France

Charles DAPOGNY

Université Grenoble Alpes, CNRS, Inria, Grenoble INP, LJK, F-38041 Grenoble, France

Karim HASSAN

Université Grenoble Alpes, CEA, LETI, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble, France

Édouard OUDET

Université Grenoble Alpes, LJK, F-38041 Grenoble, France

Alain GLIÈRE

Université Grenoble Alpes, CEA, LETI, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble, France

Résumé. Nous étudions l'optimisation de la forme de dispositifs nano-photoniques par la méthode des dérivées de forme d'Hadamard. Nos recherches nous ont porté vers l'optimisation robuste (au pire cas) de ces dispositifs lorsque des incertitudes sont attendues soit au niveau de la longueur d'onde de la lumière incidente soit au niveau de la forme réalisée. Mathématiquement on cherche à résoudre le problème

$$\max_{\Omega} \inf_{\|\delta\| \leq m} \mathcal{J}(\Omega, \delta)$$

où Ω est la forme recherchée, δ un paramètre représentant l'incertitude d'amplitude maximale m et \mathcal{J} un objectif, tel que la puissance en sortie, qui dépend de la forme par l'intermédiaire du champ électrique, solution des équations de Maxwell à l'intérieur du dispositif. La plupart des méthodes proposées pour ce type de problème d'optimisation robuste repose sur l'ajout d'un terme de pénalisation au niveau de l'objectif. Dans cet exposé nous présenterons les résultats que nous avons obtenus en appliquant une méthode d'optimisation multi-objectifs.

Mots-clefs : optimisation de forme, nano-photonique, robustesse en longueur d'onde, robustesse géométrique

Les composants nano-photoniques constituent les briques fonctionnelles de base qui sont combinées dans de nombreux circuits photoniques intégrés, utilisés par exemple dans le domaine des télécommunications.

La lumière est guidée dans des dispositifs planaires composés de couches structurées de matériaux à fort indice optique (silicium, germanium ...) entourées de différents matériaux (silice, nitrure de silicium, air ...) d'indice plus faible. Le confinement de la lumière est assuré par un principe semblable à celui qui est mis en oeuvre dans les fibres optiques. En fonction de la

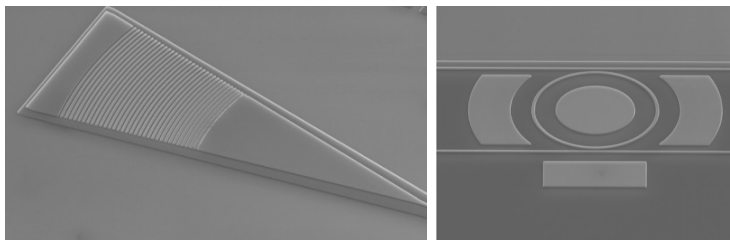


Figure 1: Deux exemples de dispositifs nano-photoniques. (gauche) un réseau de couplage (droite) un anneau résonnant. Images provenant de [6].

répartition des matériaux à l'intérieur du dispositif, il est possible de traiter la lumière, par exemple, afin de la rediriger, de la moduler, de la trier selon la longueur d'onde (démultiplexeur) ou encore de partager la puissance incidente entre plusieurs sorties.

Classiquement les dispositifs nanophotoniques, tels que ceux qui sont présentés sur la Figure 1, sont composés de formes géométriquement simples et ont des tailles caractéristiques de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines de micromètres. Les récents progrès en photolithographie sur silicium rendent désormais possible la production de dispositifs de l'ordre du micromètre, constitués de formes arbitrairement complexes, ce qui ouvre de nouvelles opportunités aux algorithmes d'optimisation de forme. La taille minimale réalisable au terme du processus de lithographie-gravure est aujourd'hui de l'ordre de la dizaine de nanomètres. A cette échelle les approximations de l'optique géométrique ne sont pas applicables pour décrire la propagation de la lumière et il est nécessaire de la considérer lumière comme une onde électromagnétique, dont le comportement est décrit mathématiquement par les équations de Maxwell. Dans nos études où les ondes considérées sont monochromatiques et où les matériaux sont supposés être amagnétiques, linéaires et isotropes, la physique est décrite par l'équation portant sur le champ électrique \mathbf{E} .

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - k^2 n(\mathbf{x})^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

avec k le nombre d'onde, $n(\mathbf{x})$ l'indice optique des matériaux dont on cherche à optimiser la répartition et $\mathbf{E} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{C}^3$ le champ électrique.

L'optimisation des dispositifs nano-photoniques revient alors à déterminer la répartition optimale $n(\mathbf{x})$ des matériaux afin de maximiser un certain critère \mathcal{J} . Les dispositifs présentés ici, produits sur une plateforme Silicon On Insulator, n'ont recours qu'à trois matériaux : une fine couche (entre 220 et 300 nm) de silicium ($n_{\text{silicium}} \simeq 3.5$) déposée sur un substrat de silice ($n_{\text{silice}} \simeq 1.5$) et entouré d'air ($n_{\text{air}} \simeq 1$). Notre unique degré de liberté est alors le choix de la répartition du silicium, que l'on représentera par l'ensemble $\Omega \subset \mathcal{C} = \mathbb{R}^2 \times [0, 220\text{nm}]$ (le reste de la couche \mathcal{C} étant alors rempli d'air). La Figure 2 représente une vue 3D d'un tel empilement.

Afin de maximiser l'objectif \mathcal{J} de nombreuses méthodes sont disponibles. Dans le cadre de la nanophotonique on citera principalement la méthode SIMP [3] ou la méthode très prometteuse développée par l'équipe de Stanford [1], inversant objectif et contraintes, qui a été reprise par d'autres équipes de recherche [2].

Nous avons, pour notre part, eu recours à la méthode des dérivées de forme d’Hadamard (voir par exemple [4, Chapitre 6]) qui permet, pour une forme Ω donnée, de définir un champs de vecteurs θ_{opt} tel que $\mathcal{J}((\text{Id} + \theta_{\text{opt}})(\Omega)) > \mathcal{J}(\Omega)$. Plus précisément on recherche un développement limité de la forme

$$\mathcal{J}((\text{Id} + \theta)(\Omega)) = \mathcal{J}(\Omega) + \langle \theta, \mathbf{g}\mathbf{n} \rangle_{L^2(\partial\Omega)} + o(\|\theta\|) \quad (2)$$

Le calcul du champs $\theta_{\text{opt}} = \mathbf{g}\mathbf{n}$ donnant une variation de performance optimale passe alors par la résolution d’un problème adjoint. En modifiant itérativement la forme selon ce champs de vecteur optimal on trouve alors un optimum local de l’objectif. Un exemple de résultat obtenu en appliquant cet algorithme se trouve en Figures 2 et 3.

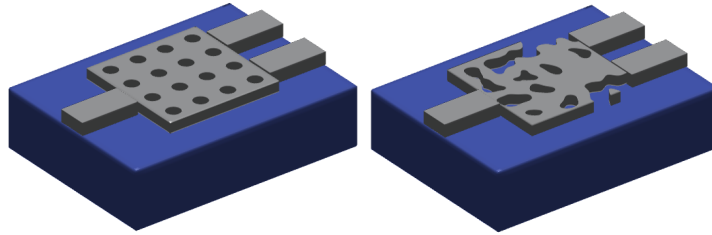


Figure 2: Optimisation d’un duplexeur à deux longueurs d’onde ($1.3\mu\text{m}$ et $1.55\mu\text{m}$). (gauche) forme initiale. (droite) forme optimale après n itérations.

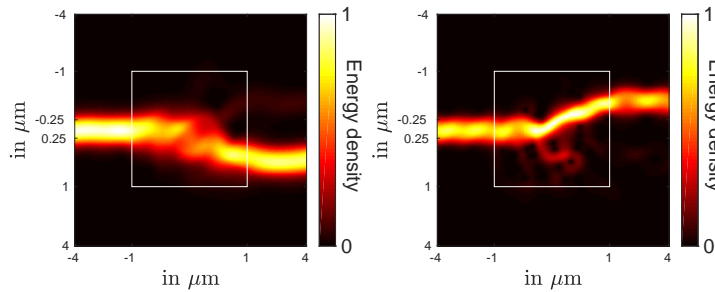


Figure 3: Simulation du champs électrique. (gauche) pour $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ (droite) pour $1.55\mu\text{m}$.

Afin de nous prémunir des incertitudes de fabrication, une partie de notre travail a été orientée vers l’étude de l’optimisation robuste au pire cas. Autrement dit on cherche non plus à maximiser \mathcal{J} mais plutôt

$$\mathcal{J}_{\text{rob}}(\Omega) = \inf_{\|\delta\| \leq m} \mathcal{J}(\Omega, \delta) \quad (3)$$

dans lequel δ représente le paramètre incertain. L’optimisation robuste de forme a été étudiée à maintes reprises dans la littérature. On peut notamment citer la méthode de [5] qui propose de linéariser l’objectif $\mathcal{J}(\Omega, \delta)$ en $\delta = 0$ dans (3) afin de calculer aisément l’inf. A contrario nous avons développé un algorithme d’optimisation multi-objectif en discrétisant l’espace des perturbations $\{\delta, \|\delta\| \leq m\}$ qui se trouve être de petite dimension permettant ainsi à un sampling de ces perturbations d’être représentatif. L’équation (3) se simplifie alors en

$$\mathcal{J}_{\text{rob}}(\Omega) = \min_{i=1, \dots, n} \mathcal{J}(\Omega, \delta_i). \quad (4)$$

Chaque étape de l'algorithme détermine alors une direction commune permettant de maximiser simultanément les n fonctionnelles $\Omega \mapsto \mathcal{J}(\Omega, \delta_i)$. Cette heuristique s'est avérée très convaincante dans le cas d'une incertitude par érosion ou dilatation sur la dimension des motifs réalisés. Les premiers résultats, qui peuvent être observés Figure 4, démontrent une nette amélioration de la robustesse d'un dispositif de type duplexeur triant la lumière entre les deux canaux de longueur d'onde utilisés dans le domaine de télécommunications optiques.

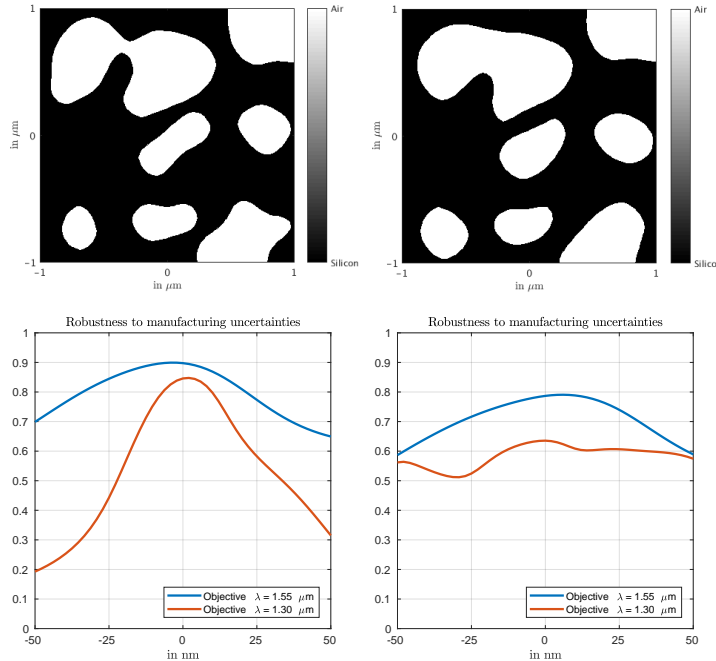


Figure 4: Optimisation non robuste (gauche) et optimisation robuste géométriquement en cas de dilatation ou érosion de plus ou moins 50 nm (gauche)

Références

- [1] A. Y. PIGGOTT AND OTHERS. *Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer*. Nature photonics, 2015.
- [2] F. CALLEWAERT, S. BUTUN, Z. LI AND K. AYDIN. *Inverse design of an ultra-compact broadband optical diode based on asymmetric spatial mode conversion*. Nature scientific reports, 2016.
- [3] J. S. JENSEN AND O. SIGMUND. *Topology optimization for nano-photonics*. Laser & Photonics reviews, 2011.
- [4] G. ALLAIRE. *Conception optimale de structures*. Springer.
- [5] G. ALLAIRE AND C. DAPOGNY. *A linearized approach to worst-case design in parametric and geometric shape optimization*. World Scientific, 2014.
- [6] B. SZELAG AND OTHERS. *Multiple wavelength silicon photonic 200 mm R+ D platform for 25Gb/s and above applications*. SPIE Photonics Europe.