

Forum CADFEM & ANSYS à l'EPFL

Retro conception d'un coupleur à réseau en a-Si pour un circuit photonique à faibles pertes en Niobate de Lithium

J. Gamet



Avantage du circuit photonique en Niobate de Lithium

Le niobate de lithium (LN) possède d'excellentes propriétés électro-optiques (r33) et optiques non linéaires (d33), avec une très faible absorption optique dans une large gamme de longueurs d'onde. Son indice de réfraction (~2,2) permet de former des guides d'ondes fortement confinés.

De nouvelles technologies, notamment le découpage ionique et le collage de tranches, permettent la production de couches minces de LN sur substrats isolants (LNOI) pour la fabrication de guide d'ondes avec des valeurs de perte de propagation de moins de 0,03 dB/cm [1] et des microcavités à haut facteur de qualité avec un facteur Q dépassant 10⁶ [2].

Le guide d'ondes de taille submicronique est d'un ordre de grandeur plus petit que le guides d'ondes LN de type diffusion conventionnels, permettant des modulateurs de Mach-Zehnder hautes performances (MZM) avec une faible tension de commande et une bande passante ultra-large jusqu'à 100 GHz [3].



M. Zhang, C. Wang, R. Cheng, A. Shams-Ansari, and M. Lončar, "Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator," Optica 4(12), 1536–1537 (2017)
 R. Wolf, I. Breunig, H. Zappe, and K. Buse, "Cascaded second-order optical nonlinearities in on-chip micro rings," Opt. Express 25(24), 29927–29933 (2017)
 C. Wang, M. Zhang, X. Chen, M. Bertrand, A. Shams-Ansari, S. Chandrasekhar, P. Winzer, and M. Lončar, "100-GHz Low Voltage Integrated Lithium Niobate Modulators," in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), SM3B.4



Le Niobate de Lithium pour des applications non linéaires

Les champs optiques sont fortement confinés dans ces guides d'ondes et structures submicroniques, ce qui facilite l'augmentation de l'intensité du champ optique et un faible niveau de seuil pour les applications d'optique non linéaire telle que la conversion de longueur d'onde optique basée sur des effets non linéaires de second ordre, comme par exemple, des générations de fréquence de seconde harmonique.

Cette plate-forme LNOI a également créé de vastes opportunités d'applications et de solutions intégrées pour l'amplification paramétrique optique et les effets non linéaires non classique, tels que la conversion descendante paramétrique spontanée pour l'optique quantique (SPDC) optique [4] qui sont les principaux sujets de développement à Miraex.



Le challenge du couplage entre une fibre optique et le guide d'onde

Comme on l'a vu, le fort confinement optique des guides d'ondes LNOI réduit considérablement la taille du dispositif et améliore les interactions optiques non linéaires. Il présente cependant un défi significatif dans l'assemblage optique du guides d'ondes et des fibres optiques standards.

Afin de créer une interface efficace entre les fibres optiques et la puce, deux schémas communs ont été largement étudiés, à savoir le couplage bout à bout et le couplage par réseau.

Le couplage bout à bout peut être effectué en alignant une fibre lentillée sur une face découpée / polie ou gravée du guide d'onde. Cette approche est à large bande et peut fonctionner pour n'importe quelle polarisation.

Cependant, en raison du décalage entre la taille du spot de la fibre optique ($\sim 2 \mu m$ de diamètre) et la taille du mode du guide d'ondes ($\sim 1 \mu m$), l'efficacité typique de couplage entre la fibre et la puce est compris entre –4 et –6 dB.

Pour pallier ce problème, un adaptateur de mode sous la forme d'un « taper » inversé peut être utilisé pour étendre le mode de guide d'ondes à la facette. Cependant la tolérance de positionnement est critique et ce particulièrement pour des applications cryogéniques (3K) dû à la différence de coefficients de dilatation thermique.

En utilisant cette approche, une perte de couplage fibre à puce de 1,7 dB a été atteinte [5].



[5] L. He, M. Zhang, A. Shams-Ansari, R. Zhu, C. Wang, and M. Loncar, "Low-loss fiber-to-chip interface for lithium niobate photonic integrated circuits," Opt. Lett. 44, 2314–2317 (2019).



Le challenge du couplage entre une fibre optique et le guide d'onde

Les coupleurs par réseau, sans processus de découpe, de clivage et de polissage, sont favorables pour le couplage entre une fibre SMF et un guide d'ondes de taille submicronique. Les coupleurs par réseau permettent un couplage vertical à des positions arbitraires de la puce avec une tolérance d'alignement relativement grande. Cependant, leur bande passante de fonctionnement est étroite et ils sont sensibles à la polarisation.

Il y a eu un certain nombre de rapports sur les coupleurs de réseau LNOI avec <u>une efficacité de couplage de −3.5 dB par coupleur [6]</u>.

Une limitation des coupleurs par réseau LNOI est l'angle de paroi latérale non vertical dans la gravure sèche qui limite la taille de pas minimale et facteur de remplissage des dents du réseau.



A noter également que le procédé de fabrication du LNOI a l'avantage de pouvoir enterrer des couches métalliques, qui peuvent servir de réflecteur optique efficace pour minimiser le couplage vers le bas et améliorer l'efficacité du couplage.

[6] I. Krasnokutska, R. J. Chapman, J.-L. J. Tambasco, and A. Peruzzo, "High coupling efficiency grating couplers on lithium niobate on insulator," Opt. Express 27, 17681–17685 (2019).

• MIRAEX

Approche proposée pour minimiser le couplage

Dans le cas de nos applications fonctionnant dans une bande de longueur d'onde étroite avec une lumière polarisée et à des température cryogéniques, le coupleur par réseau nous semble être une bonne solution.

Nous allons nous attacher, ici, à optimiser un coupleur de réseau hybride sur une couche mince de niobate de lithium en utilisant du silicium amorphe (a-Si) pour réaliser le réseau. Cette approche basé sur un réseau non apodisé a démontré une efficacité de couplage de \sim - 3 dB/face avec une bande passante de 55 nm à 1 dB.

Le réseau en a-Si présente un double avantage dans l'obtention d'un couplage élevé:

- premièrement, a-Si a un indice de réfraction plus élevé;
- deuxièmement, le profil de gravure du a-Si est plus net que celui de la gravure LN.

Le réseau en a-Si est enterré dans les couches de recouvrement en oxide.

Nous utiliserons le logiciel LUMERICAL et son algorithme Inverse Design (lumopt). Comparé à d'autres méthodes, cet algorithme d'optimisation permet d'obtenir la meilleure solution en quelques itérations seulement.



Fig. 1. Schematics of amorphous silicon grating on LN thin film.

$\bigcirc \bullet$ MIRAEX

Étape 1 : Définir les paramètres de simulation de base

L'objectif de cette première étape est de trouver un bon point de départ pour l'optimisation.

À l'aide du solveur MODE FDE, nous déterminons un design initial du réseau apodisé linéairement en fonction des paramètres d'optimisation (longueur d'onde centrale, profondeur de gravure, angle de la fibre).

Vue d'ensemble: Etapes de simulation et résultats clés



MIRAEX Étape 1 : Définir les paramètres de simulation de base

L'idée principale est d'utiliser l'indice effectif local d'un réseau apodisé [8]. Plus précisément, pour chaque cellule unitaire, l'indice effectif est approximé à l'aide d'une interpolation linéaire comme suit :

Dù
$$n_{eff} = F n_0 + (1-F) n_E$$

F est la fraction de remplissage, nO et nE désignent les indices effectifs d'un mode se propageant dans le guide d'onde LN avec respectivement la couche de a-Si et sans la couche de a-Si.

Pour déterminer ces indices effectifs, nous utilisons le solveur MODE FDE. Le calcul est effectué pour un guide d'onde en LN de hauteur=600nm et une couche de a-Si de 220nm, en utilisant un indice de réfraction de 3.47668 pour le silicium, 2,1378 pour le LN et 1.44401 pour l'oxide entourant la structure guide d'onde.

On peut écrire la condition de Bragg pour un réseau de périodicité Λ comme:

 $\Lambda = rac{\lambda_c}{n_{eff} - n_{bg}\sin heta}$

Avec n_{bg} l'indice de réfraction de l'oxide,

[8] R. Marchetti, C. Lacava, A. Khokhar, X. Chen, I. Cristiani, D. J. Richardson, G. T. Reed, P. Petropoulos and P. Minzioni, "High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy," Scientific Reports 7, Article number: 16670, 2017

Étape 1 : Définir les paramètres de simulation de base

Pour un réseau apodisé linéairement, le facteur de remplissage varie avec la position le long du guide d'onde

$$F(x) = F_0 - R \cdot x$$

R est le facteur d'apodisation et Fo est la fraction de remplissage initiale.

Dans le cas idéal, il devrait être 1 car nous partons d'un guide d'onde solide, mais nous utiliserons Fo = 0,95 pour éviter les tranchées extrêmement petites. En utilisant de l'apodisation linéaire dans l'indice effectif interpolé :

$$n_{eff}(x)=F(x)n_0+(1-F(x))n_E=n_E+F(x)\Delta n$$

On obtient la période spatialement variable du réseau :

• $M \mid R \land E X$

$$\Lambda(x) = rac{\lambda_c}{(n_E - n_{bg}\sin heta) + F(x)\Delta n}$$

•• MIRAEX Étape 1 : Définir les paramètres de simulation de base

Pour trouver une bonne condition initiale, on discrétise la fraction de remplissage F et la périodicité A pour chaque période.

Jusqu'à présent, nous n'avons qu'une seule inconnue, le facteur R. Pour une optimisation un peu plus efficace, nous pouvons inclure 4 paramètres d'optimisation :

$$p = \left[x_0, R, a, b
ight]$$

avec

$$F_i = F_0 - R(x_{i-1} - x_0)$$

$$\Lambda_i = rac{\lambda_c}{a + F_i b}$$

 $a = n_E - n_{bg} \sin heta$

et

$$b = \Delta n$$

Noter xo et R sont à définir séparément. Nous fixerons xo à 2.5µm et nous utiliserons R=0,03µm⁻¹



Étape 1 : Définir les paramètres de simulation de base

De manière à évaluer la performance du réseau initial, nous devons d'abord trouver la position optimale pour la fibre. Un script développé par Lumerical chargera la conception initiale de l'étape 1 et exécutera un balayage de la position de la fibre pour déterminer la position pour un couplage optimal.

La position optimale se trouve à 7µm, avec une transmission supérieure à 71% soit une perte de couplage proche de 1.5dB/face.

Soit un gain d'un facteur 2 par rapport à un réseau non apodisé. A noter cependant que l'apodisation du réseau à ce stade génère des motifs d'environ 50nm de large qui sont très difficiles à fabriquer.





• MIRAEX

Étape 2 : Optimisation du réseau apodisé linéairement à l'aide de FDTD 2D

La deuxième étape consiste à optimiser le réseau à l'aide d'un ensemble limité de paramètres. Nous utilisons le réseau apodisé défini à l'étape 1 comme point de départ. Le nombre de réseaux est fixé à 25.

Un ensemble de 4 paramètres obtenus à l'étape 1, définissant la fonction d'apodisation du réseau, est utilisé pour extraire l'ensemble initial de paramètres pour maximiser la transmission/couplage.

A partir de la condition initiale trouvée à l'étape précédente, nous exécutons maintenant une optimisation en utilisant la coordonnée x de chaque position de paroi du réseau comme paramètre libre (2x 25 paramètres).

Plus précisément, les paramètres seront la position de départ du réseau, la largeur de la gravure et la largeur de la dent de chaque réseau.

Capacité à inclure les contraintes de fabrication:

Nous utilisons la contrainte de taille minimale dans cette étape en définissant une taille minimum de 100nm, ce qui garantira qu'aucune tranchée ne mesure moins de 100 nm de large et que le dispositif sera manufacturable,

Vue d'ensemble: Etapes de simulation et résultats clés



$\bigcirc \bullet$ MIRAEX

Étape 2 : Optimisation du réseau apodisé linéairement à l'aide de FDTD 2D



La transmission finale est de 79 % soit 1dB / coupleur ce qui permet d'atteindre les meilleurs valeurs d'efficacité de couplage reportées dans la littérature, en maintenant que le coupleur de réseau sera facilement fabricable.



Étape 2 : Optimisation du réseau apodisé linéairement à l'aide de FDTD 2D



On rappellera à cette étape que le procédé de fabrication du LNOI a l'avantage de pouvoir intégrer une couches métalliques, qui pourra servir de réflecteur optique efficace pour minimiser le couplage vers le bas et encore améliorer l'efficacité du couplage.



Étape 3 : Génération du modèle 3D et du fichier GDS

La forme optimisée du coupleur de réseau avec des réseaux incurvés sera exportée au format GDS II et dans un fichier de simulation 3D qui pourra être utilisé pour une simulation et/ou une fabrication ultérieure (conception de masque).



Vue d'ensemble: Etapes de simulation et résultats clés





Conclusion et remerciements

Cette étude nous a permis de comparer les différentes solutions pour coupler un guide d'onde en couche mince de Niobate de Lithium vers une fibre optique standard (SMF) et vice versa.

Les meilleurs efficacité de couplage ont été démontrées avec un couplage bout à bout de la fibre et du guide d'onde. Au travers d'un procédé assez contraignant en terme de fabrication et de tolérances d'assemblage des fibres, une perte de couplage de 1,7dB/face a été démontrée dans la littérature et ce sur une large bande passante avec une faible dépendance en polarisation.

Dans le cas de nos applications fonctionnant dans une bande de longueur d'onde étroite avec une lumière polarisée, une approche hybride a été optimisée en utilisant le logiciel LUMERICAL/Inverse Design (lumopt) pour atteindre une perte de couplage avoisinant 1dB/face ce qui ouvre la porte aux potentiels des applications quantiques basées sur un circuit photonique non linéaire en Niobate de Lithium.

Je tiens à remercier chaleureusement Aniko de l'équipe CADFEM et Greg de l'équipe ANSYS pour leur support pendant cette étude. Ainsi que Christophe de l'équipe CADFEM pour me permettre d'être présent aujourd'hui pour présenter ces résultats. Et merci à vous pour votre attention.