

# INSENSIBILITE DE L'ACCORD DE PHASE EN OPTIQUE INTEGREE NON LINEAIRE ET FORME DU PROFIL D'INDICE

**Maxim Neradovskiy, Elizaveta Neradovskaya, Pierre Aschiéri,  
Hervé Tronche, Florent Doutre, Tommaso Lunghi, Pascal Baldi, Marc De Micheli,**

*INPHYNI, Université Côte d'Azur - CNRS, Av. Joseph Vallot, 06100 Nice, France*

[marc.de-michele@inphyni.cnrs.fr](mailto:marc.de-michele@inphyni.cnrs.fr)

## RÉSUMÉ

La sensibilité de l'accord de phase aux différents paramètres du profil d'indice d'un guide d'onde dans un matériau non linéaire limite sévèrement l'efficacité de conversion de ces composants. Cette étude montre que l'utilisation d'un quasi accord de phase modal et de certaines formes de profil d'indice permet de contourner cette difficulté.

**MOTS-CLEFS :** *Optique non linéaire intégrée, Accord de phase, Profil d'indice*

## 1. INTRODUCTION

Jusqu'à un passé très récent, il était largement admis que pour réaliser un composant non linéaire efficace, l'idéal était de disposer d'un guide présentant un plan de symétrie en largeur comme en profondeur et de favoriser l'utilisation des modes fondamentaux aux différentes longueurs d'onde en interaction [1]. Cela a permis de réaliser de nombreux composants [2,3] mais l'expérience montre qu'ils souffrent d'une extrême sensibilité de l'accord de phase aux variations des paramètres qui définissent le profil d'indice du guide [4]. Quelques publications anciennes mentionnent ces problèmes [5,6,7] et de très rares décrivent un accord de phase non critique observé dans des conditions très restrictives [8].

Cela nous a conduit à remettre en cause l'utilisation exclusive des modes fondamentaux, et nous montrons ici que certaines formes de profil d'indice combinées à l'utilisation de la dispersion modale, permettent d'obtenir des accords de phase très robustes et donc d'envisager de réaliser des composants dont l'efficacité de conversion normalisée, exprimée en  $\%/W \cdot \text{cm}^2$ , ne décroît pas avec la longueur de celui-ci.

## 2. ÉVOLUTION DE L'ACCORD DE PHASE DANS LES GUIDES SPE

Pour mener cette étude, nous sommes partis d'un cas concret, celui des guides réalisés par Échange Protonique Doux (Soft Proton Exchange : SPE) dans le niobate de lithium congruent polarisé périodiquement (Periodically Poled Lithium Niobate : PPLN).

La longue expérience que nous avons avec ce type de guide, [9] nous permet de disposer d'un profil d'indice très réaliste [10] donné par :

$$n(x, y, \lambda) = n_{LN}(\lambda) + \delta n_0(\lambda) * f(x) * g(y) \quad (1)$$

Avec 
$$\delta n_0(\lambda) = 0.0458 + 0.241 * e^{-6.0543\lambda} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{x}{0.7289} - \left(\frac{\text{MaskWidth}}{2} + 2.2244\right)\right)}} \quad (3)$$

$$g(y) = e^{-\left(\frac{y}{0.572}\right)^{0.672}} \quad (4)$$

Pour étudier la sensibilité de l'accord de phase, nous avons choisi le processus de génération d'harmonique 2, partant d'une onde fondamentale entre 1,4 et 1,6  $\mu\text{m}$ , longueurs d'ondes pour lesquelles le guide est monomode et étudié la conversion vers tous les modes que supporte le guide à la longueur d'onde harmonique. Le premier paramètre que nous avons fait varier est la largeur du guide (MaskWidth dans l'équation 3) et le résultat est présenté dans la figure 1. Cette figure représente

le désaccord de phase ou plus exactement la période de PPLN qu'il est nécessaire de choisir pour compenser ce désaccord de phase entre une onde fondamentale à  $1,45\mu\text{m}$  portée par le mode  $\text{TM}_{00}$  du guide et son harmonique portée par un des modes  $\text{TM}_{ij}$  du guide à  $0,725\mu\text{m}$ . Cette figure montre clairement que quelle que soit la combinaison modale choisie, cette période change plus ou moins avec la largeur du guide, sauf dans le cas où l'harmonique est portée par le mode  $\text{TM}_{01}$  dont le profil d'intensité est donné dans la figure 2. Ce résultat a été vérifié expérimentalement [10] et il a été également prouvé que dans ce cas, la conversion non linéaire était 4 à 5 fois plus efficace qu'en utilisant le mode  $\text{TM}_{00}$ .

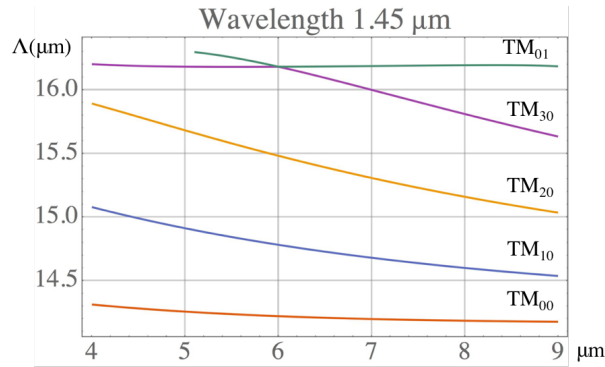


Figure 1. Calcul de la période de polarisation périodique nécessaire pour compenser le désaccord de phase entre un mode de pompe à  $1,45\mu\text{m}$  se propageant dans le mode  $\text{TM}_{00}$  et un mode harmonique se propageant suivant un des modes  $\text{TM}_{ij}$  supportés par le guide, en fonction de la largeur du guide. Les autres paramètres (Profondeur, forme du profil, augmentation d'indice, dispersion ...) sont fixés.

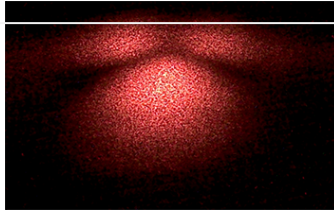


Figure 2 : Distribution du champ pour le mode  $\text{TM}_{01}$  du guides SPE à la fréquence harmonique. L'interface air Niobate de Lithium est indiquée par la ligne blanche.

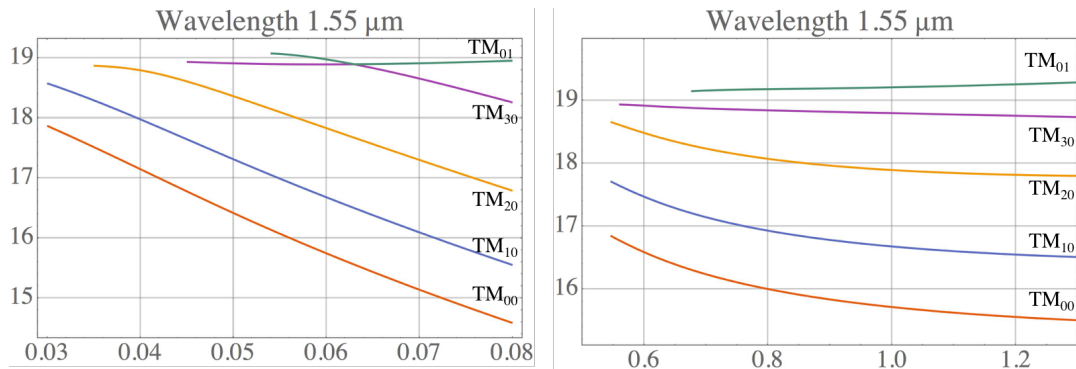


Figure 3. Calcul de la période de polarisation périodique nécessaire pour compenser le désaccord de phase entre un mode de pompe à  $1,55\mu\text{m}$  se propageant dans le mode  $\text{TM}_{00}$  et un mode harmonique se propageant suivant un des modes  $\text{TM}_{ij}$  supportés par le guide, en fonction de l'amplitude de la variation d'indice (à gauche) ou de la profondeur (à droite) du guide.

Si l'on fait varier l'amplitude de la variation d'indice, on obtient un résultat similaire, comme le montre la figure 3, mais si l'on fait varier la profondeur, une légère sensibilité persiste même quand l'harmonique est porté par le mode  $\text{TM}_{01}$ .

### 3. FORME DU PROFIL D'INDICE ET SENSIBILITE DE L'ACCORD DE PHASE

Pour compléter l'étude et comprendre l'origine de la nature non critique de l'accord de phase entre le mode  $TM_{00}$  pour le fondamental et le mode  $TM_{01}$  pour l'harmonique dans les guides SPE, nous avons fait varier numériquement tous les autres paramètres et en particulier la forme du profil d'indice suivant la profondeur. Pour les guides SPE, cette forme est caractérisée par l'exposant  $\alpha=0,672$  dans l'équation (4). L'étude a montré que pourvu que l'on maintienne cette forme le caractère non critique de l'accord de phase est préservé même si l'amplitude de variation de l'indice est prise égale à 0,4 (elle est de l'ordre de 0,04 pour les guides SPE). Il suffit d'ajuster la valeur de  $\alpha$  à celle de  $\delta n_0(\lambda)$ , pour que l'accord de phase garde son caractère non critique (Figure 4).

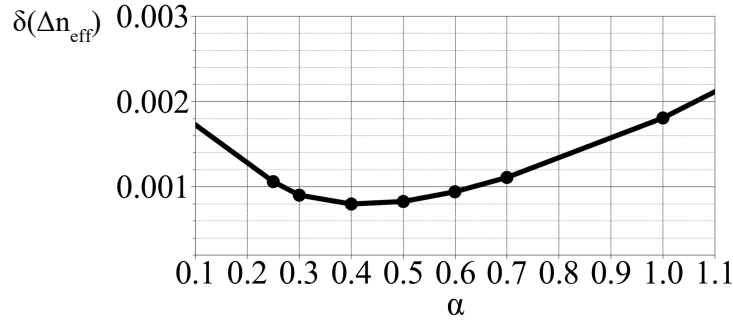


Figure 4. Amplitude de la variation de  $\Delta n_{eff} = n_{eff}(\lambda) - n_{eff}(\lambda/2)$  en fonction du paramètre  $\alpha$  de la forme du profil d'indice en profondeur. L'amplitude de variation  $\delta(\Delta n_{eff})$  est égale à  $\Delta n_{eff} \text{ max} - \Delta n_{eff} \text{ min}$  pour une variation de la largeur du guide comprise entre 0,5 et 1,0  $\mu\text{m}$ .

Nous recherchons actuellement quelles sont les autres associations entre combinaison modale et profil d'indice qui conduisent à cette situation d'accord de phase non critique, ce qui permettra de généraliser le concept à d'autres matériaux comme les semi-conducteurs (GaN), avec lesquels il est possible d'ajuster à volonté le profil d'indice et de disposer de contrastes d'indices très forts.

### 4. CONCLUSIONS

Nous avons montré numériquement et vérifié expérimentalement que dans le cas des guides SPE réalisés sur PPLN, il était possible en jouant avec l'accord de phase modal, de bénéficier de conditions d'accord de phase non critique sans sacrifier l'efficacité de conversion.

Remerciements : Les auteurs remercient Ulrich Kuhl pour les discussions et les conseils ainsi que le soutien financier de l'ANR-14-CE26-0036- 01.

### RÉFÉRENCES

- [1] K.R. Parameswaran, *et al.*, "Highly efficient second-harmonic generation in buried waveguides formed by annealed and reverse proton exchange in periodically poled lithium niobate", *Opt.Lett.* 27 179-181, 2002.
- [2] M. Bazzan and C. Sada, "Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications" *Appl. Phys. Rev.* 2, 040603, 2015
- [3] S. Tanzilli, *et al.*, "Highly Efficient Photon-Pair Source Using a PPLN Waveguide", *Electron. Lett.* 37, 26-28, 2001
- [4] <https://arxiv.org/pdf/1809.08802.pdf>
- [5] F.R. Nash, G.D. Boyd, M. Sargent III, and P.M. Bridenbaugh, "Effect of Optical Inhomogeneities on Phase Matching in Nonlinear Crystals", *J. Appl. Phys.* 41, 2564-2576, 1970
- [6] M.M. Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, and R.L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances", *IEEE J. Quantum. Electron.* 28, 2631-2653, 1992
- [7] S. Helmfrid, G. Arvidson, and J. Webjörn, "Influence of various imperfections on the conversion efficiency of SHG in quasi-phase-matching lithium niobate waveguides", *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 222-229, 1992
- [8] J. Lim, S. Matsumoto, and M.M. Fejer, *Appl. Phys.* "Noncritical phase matching for guidedwave frequency conversion", *Appl. Phys. Lett.* 57, 2294-2296, 1990
- [9] L. Chanvillard, *et al.*, "Soft Proton Exchange on PPLN: a simple waveguide fabrication process for highly efficient nonlinear interactions" *Appl. Phys. Lett.* 76, 1089, 2000
- [10] M. Neradovskiy *et al.* "Advantages of noncritical modal quasi-phase-matching in  $\chi^2$  based nonlinear integrated optics devices", *OSA Laser Congress*, 4-8 /11/18, Boston USA, <https://doi.org/10.1364/ASSL.2018.ATh4A.4>