



HAL
open science

Optimisation de guides optiques à absorption linéaire

Vincent Magnin, Joseph Harari

► **To cite this version:**

Vincent Magnin, Joseph Harari. Optimisation de guides optiques à absorption linéaire. IEMN UMR CNRS 8520. 2018. <hal-04546133>

HAL Id: hal-04546133

<https://hal.science/hal-04546133v1>

Submitted on 15 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Copyright - All rights reserved

Optimisation de guides optiques à absorption linéaire

Projet ANR PHENIX

Vincent MAGNIN, Joe HARARI

8 juin 2018



Table des matières

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 1 | Présentation | 2 |
| 1.1 | Introduction | 2 |
| 1.2 | Outils de modélisation | 2 |
| 1.2.1 | Paramètres de modélisation | 2 |
| 1.2.2 | Indices optiques | 3 |
| 1.2.3 | Algorithme génétique | 3 |
| 2 | Optimisation par AG | 4 |
| 2.1 | Géométrie du guide optique | 4 |
| 2.2 | Espace de recherche | 5 |
| 2.3 | Fonction d'adaptation | 5 |
| 2.4 | Première optimisation | 6 |
| 2.4.1 | Guides de longueur 0,5 mm | 6 |
| 2.4.2 | Guides de longueur 1,0 mm | 8 |
| 2.5 | Seconde optimisation | 9 |
| 2.5.1 | Guides de longueur 0,5 mm | 10 |
| 2.5.2 | Guides de longueur 1,0 mm | 11 |
| 3 | Conception analytique | 13 |
| 3.1 | Guides de longueur 0,5 mm | 13 |
| 3.2 | Guides de longueur 1 mm | 15 |
| 4 | Conclusion | 17 |

Chapitre 1

Présentation

1.1 Introduction

Ce rapport fait suite aux travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet PIC-3D PHOTOWATHz [Magnin and Harari, 2014].

1.2 Outils de modélisation

Les modélisations optiques sont effectuées à l'aide de notre BPM 3D (*3D finite difference beam propagation method*), qui permet de travailler soit en TE soit en TM [Deng et al., 1998]. Les optimisations sont réalisées en couplant cette BPM à un algorithme génétique (AG) [Magnin, 1998, Magnin et al., 2002].

1.2.1 Paramètres de modélisation

Nous nous limitons au mode TE¹, car le guide d'entrée optique est alimenté par un coupleur à la fibre de type réseau (*grating coupler*) fournissant un tel mode [Doerr et al., 2010].

La fenêtre de calcul fait $W_x = 6 \mu\text{m}$ de large et $W_y = 4 \mu\text{m}$ de haut. Sauf précision contraire, les pas de calculs sont $\delta x = 0,005 \mu\text{m}$ ou $\delta x = 0,010 \mu\text{m}$ suivant les cas, $\delta y = 0,02 \mu\text{m}$ et $\delta z = 0,05 \mu\text{m}$. Nous travaillons à la longueur d'onde $\lambda = 0,780 \mu\text{m}$.

Le faisceau optique injecté a un profil elliptique défini horizontalement par une gaussienne de largeur à $1/e$ en amplitude du champ électrique de $1 \mu\text{m}$ et horizontalement par une gaussienne de largeur $0,5 \mu\text{m}$. Nous appelons $P_{opt}(z)$ la puissance optique dans la fenêtre de calcul à l'abscisse z et nous posons $P_{opt}(0) = 1$, la BPM fonctionnant en unités arbitraires.

1. Le champ \mathbf{E} est orthogonal au plan contenant l'axe de propagation du guide et l'axe vertical.

1.2.2 Indices optiques

Concernant les matériaux du guide optique, sauf indication contraire, l'indice du SiO_2 est $n_{\text{SiO}_2} = 1,475$. L'indice du Si_3N_4 est $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1,9$.

L'indice du LT-GaAs composant la membrane est $n_{\text{GaAs}} = 3,644 + 0,095i$ [Kokubo and Ohta, 1997, Dankowski et al., 1997]. La partie imaginaire correspond à un coefficient d'absorption $15\,000\text{ cm}^{-1}$.

1.2.3 Algorithme génétique

La durée de calcul par BPM d'un guide de $0,5\text{ mm}$ est d'environ deux minutes avec les paramètres indiqués plus haut. Pour une population de seulement 24 individus (dont environ la moitié est recalculée à chaque génération), il faut environ deux jours pour calculer une centaine de générations.

Chapitre 2

Optimisation par AG

2.1 Géométrie du guide optique

On considère un guide optique diélectrique infiniment large déposé sur une membrane d'un micron de GaAs basse température (Fig. 2.1). Le cœur a une épaisseur de 200 nm et une largeur $w \leq 500$ nm. Les épaisseurs de SiO_2 sont de 795 nm sous la base du cœur et 520 nm au-delà.

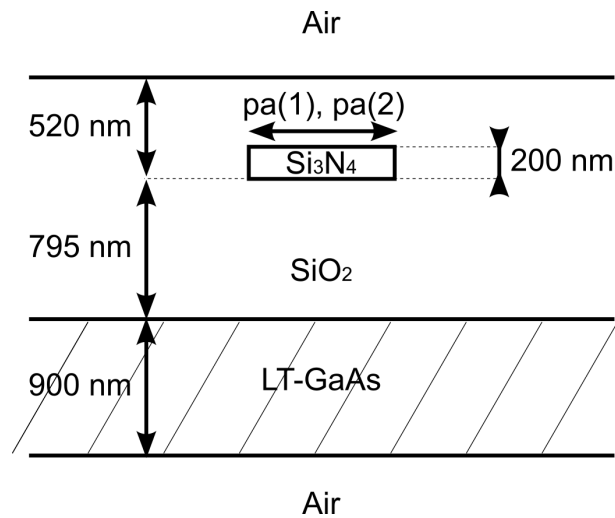


FIGURE 2.1 – Géométrie du guide optique. Les paramètres $pa(1)$ et $pa(2)$ sont les largeurs du cœur à l'entrée et à la sortie.

Les longueurs des guides étudiés sont de $L_g = 500 \mu m$ et $L_g = 1000 \mu m$. Rappelons que nous injectons un faisceau optique et non pas un mode et qu'il lui faut une certaine longueur pour s'adapter au guide optique.

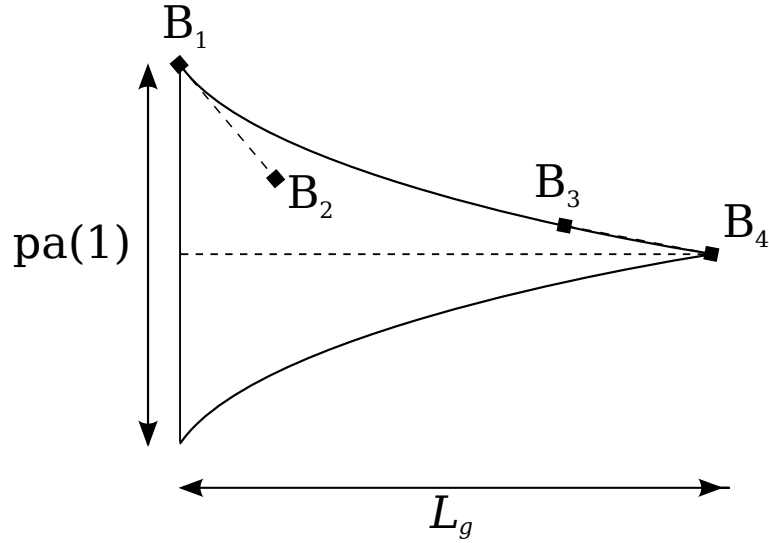


FIGURE 2.2 – Définition de la géométrie du cœur vu de dessus.

La largeur du cœur est définie à l'aide de courbes de Bézier. Le bord gauche du cœur (figure 2.2) est ainsi défini par le polynôme complexe :

$$\mathbf{Q}(t) = (1 - t)^3 \cdot \mathbf{B}_1 + 3t(1 - t)^2 \cdot \mathbf{B}_2 + 3t^2(1 - t) \cdot \mathbf{B}_3 + t^3 \cdot \mathbf{B}_4 \quad (2.1)$$

où $t \in [0, 1]$ est le paramètre et les \mathbf{B}_i les points de contrôle de la courbe de Bézier. \mathbf{B}_1 et \mathbf{B}_4 sont les points de départ et d'arrivée de la courbe et \mathbf{B}_2 et \mathbf{B}_3 définissent les tangentes en ces points.

2.2 Espace de recherche

Les paramètres d'optimisation de l'algorithme génétique sont (Fig. 2.1) :

- $pa(1)$, la largeur du cœur à l'entrée,
- $pa(2)$, la largeur du cœur à la sortie,
- $pa(3)$, l'épaisseur du cœur,
- $pa(4)$, $pa(5)$, la position de B_2 relativement à B_1 ,
- $pa(6)$, $pa(7)$, la position de B_3 relativement à B_4 .

Notons que dans la pratique nous avons en fait fixé l'épaisseur du cœur $pa(3) = 200$ nm.

2.3 Fonction d'adaptation

L'algorithme génétique optimise la valeur de la fonction d'adaptation f (*fitness function*). Notre objectif est de tendre vers un guide idéal où la puissance optique

décroîttrait linéairement de 1 u.a. à l'entrée à 0 u.a. à la sortie :

$$P_{opt}(z) = a \cdot z + b \quad (2.2)$$

où

$$a = \frac{-1}{L_g}, \quad b = 1 \quad (2.3)$$

La fonction d'adaptation est définie par :

$$f = \frac{1}{S} \quad (2.4)$$

où

$$S = \sum_{m=1}^{m_{max}} ((a \cdot m \cdot \delta z + b) - P_{opt}(m \cdot \delta z))^2 \quad (2.5)$$

m étant le numéro du pas courant dans la BPM. Nous utilisons ainsi une méthode des moindres carrés : S est une mesure de l'écart entre le $P_{opt}(z)$ obtenu et le segment de droite d'extrémités $(0, 1)$ et $(L_g, 0)$. Un guide optique idéal a une valeur $S = 0$ et donc une fonction d'adaptation infinie. Notons que cette somme dépend du nombre de pas de calcul utilisé et ne permettra donc de comparer que des guides de longueurs identiques.

2.4 Première optimisation

L'espace de recherche est donné tableau 2.1. Les meilleurs guides obtenus lors de cette campagne d'optimisation sont présentés dans les pages suivantes.

| | pa(1) | pa(2) | pa(3) | pa(4) | pa(5) | pa(6) | pa(7) |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | μm | μm | μm | μm | μm | μm | μm |
| min | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | -1.000 | -100.00 | 0.000 |
| max | 0.50 | 0.50 | 0.20 | 100.00 | +1.000 | 0.00 | +1.000 |

TABLE 2.1 – Espace de recherche de l'algorithme génétique.

2.4.1 Guides de longueur 0,5 mm

La meilleure solution obtenue par algorithme génétique est décrite tableau 2.2 [page suivante](#) et visualisée figure 2.3 [page suivante](#). Les points de contrôle de la courbe de Bézier sont :

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_1 + (56,121 + 0,006i) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{B}_4 + (-7,965 + 0,057i) \quad (2.7)$$

On peut noter que l'algorithme a convergé vers une largeur finale du cœur nulle, et que sa section au départ est presque carrée.

| pa(1) | pa(2) | pa(3) | pa(4) | pa(5) | pa(6) | pa(7) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| μm | μm | μm | μm | μm | μm | μm |
| 0.230 | 0.000 | 0.200 | 56.121 | 0.006 | -7.965 | 0.057 |

TABLE 2.2 – Meilleure solution obtenue pour un guide de 0,5 mm de long.



FIGURE 2.3 – Vue de dessus en BPM3D pour une longueur de 500 μm . L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

On voit figure [2.4 page suivante](#) que l'on a une assez bonne linéarité ($S = 0,288$) et que 94,4 % de la lumière est absorbée.

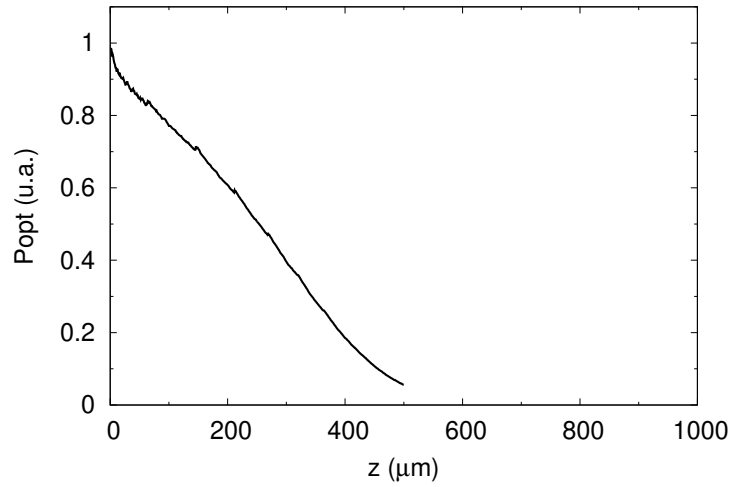


FIGURE 2.4 – Évolution de la puissance optique de la fenêtre de calcul le long du guide.

2.4.2 Guides de longueur 1,0 mm

La meilleure solution obtenue par algorithme génétique est décrite tableau 2.3 et visualisée figure 2.5 page suivante. Les points de contrôle de la courbe de Bézier sont :

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_1 + (0,140 - 0,137i) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{B}_4 + (-97,514 + 0,106i) \quad (2.9)$$

| pa(1) μm | pa(2) μm | pa(3) μm | pa(4) μm | pa(5) μm | pa(6) μm | pa(7) μm |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.400 | 0.060 | 0.200 | 0.140 | -0.137 | -97.514 | 0.106 |

TABLE 2.3 – Meilleure solution obtenue pour un guide de 1 mm de long.

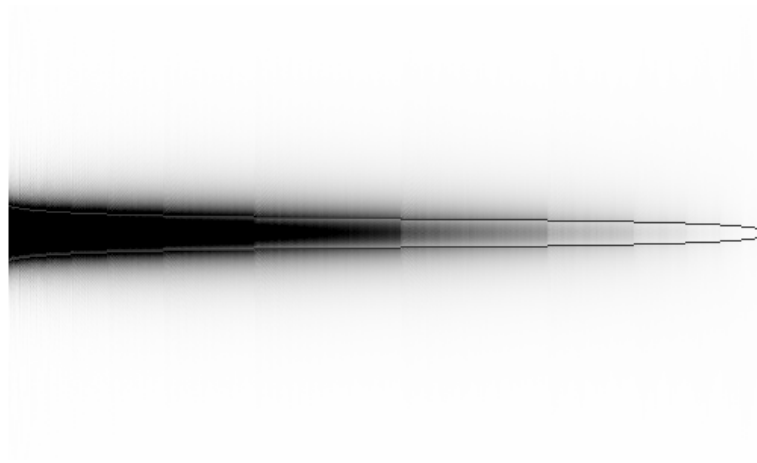


FIGURE 2.5 – Vue de dessus en BPM3D pour une longueur de 1 mm. L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

On voit figure 2.6 que l'on a une assez bonne linéarité ($S = 0,402$) et que 95,1 % de la lumière est absorbée.

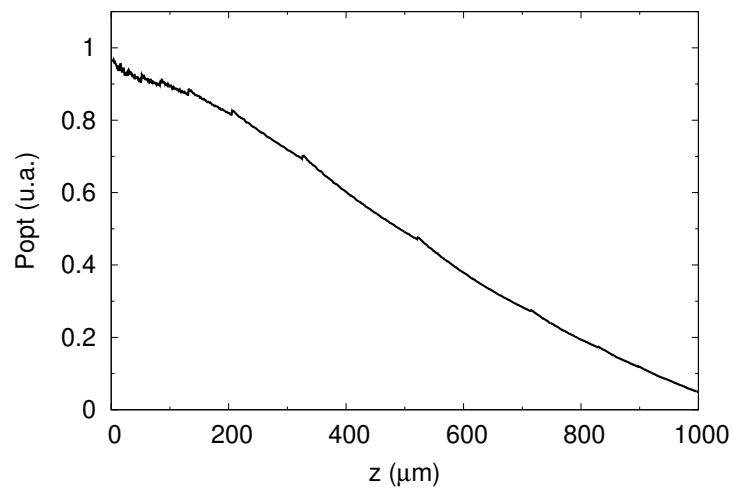


FIGURE 2.6 – Évolution de la puissance optique de la fenêtre de calcul le long du guide.

2.5 Seconde optimisation

L'espace de recherche est donné tableau 2.4. Il diffère du précédent par le fait que $pa(4)$ peut désormais aller jusqu'à $500\ \mu\text{m}$, afin de faciliter une convergence

vers des solutions similaires à celles qui seront présentées dans le chapitre suivant (conception analytique).

Les meilleurs guides obtenus lors de cette campagne d'optimisation sont présentés dans les pages suivantes.

| | pa(1) μm | pa(2) μm | pa(3) μm | pa(4) μm | pa(5) μm | pa(6) μm | pa(7) μm |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| min | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | -1.000 | -100.00 | 0.000 |
| max | 0.50 | 0.50 | 0.20 | 500.00 | +1.000 | 0.00 | +1.000 |

TABLE 2.4 – Espace de recherche n° 2.

2.5.1 Guides de longueur 0,5 mm

La meilleure solution obtenue par algorithme génétique est décrite tableau 2.5 et visualisée figure 2.7. Les points de contrôle de la courbe de Bézier sont :

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_1 + (401,479 - 0,139i) \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{B}_4 + (-27,895 + 0,135i) \quad (2.11)$$

| pa(1) μm | pa(2) μm | pa(3) μm | pa(4) μm | pa(5) μm | pa(6) μm | pa(7) μm |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.280 | 0.010 | 0.200 | 401.479 | -0.139 | -27.895 | 0.135 |

TABLE 2.5 – Meilleure solution obtenue pour un guide de 0,5 mm de long.

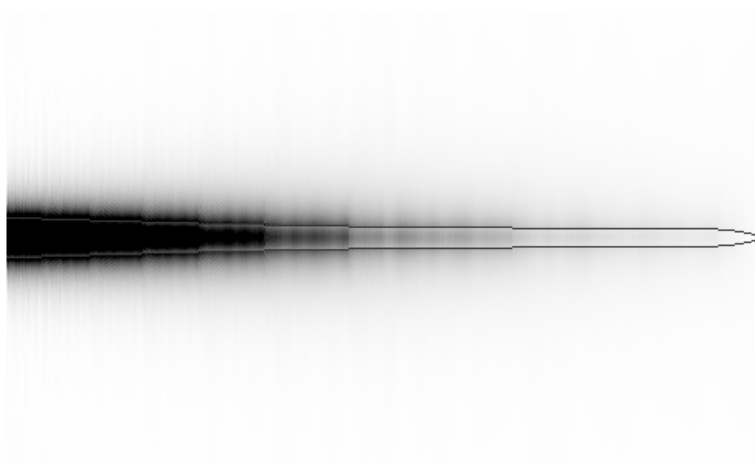


FIGURE 2.7 – Vue de dessus en BPM3D pour une longueur de 500 μm. L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

On voit figure 2.8 que 91,5 % de la lumière est absorbée mais que l'on a un point d'inflexion ($S = 0,499$). Le résultat est moins bon que celui obtenu page 7 avec le premier espace de recherche, mais la largeur finale du cœur n'est cette fois pas nulle.

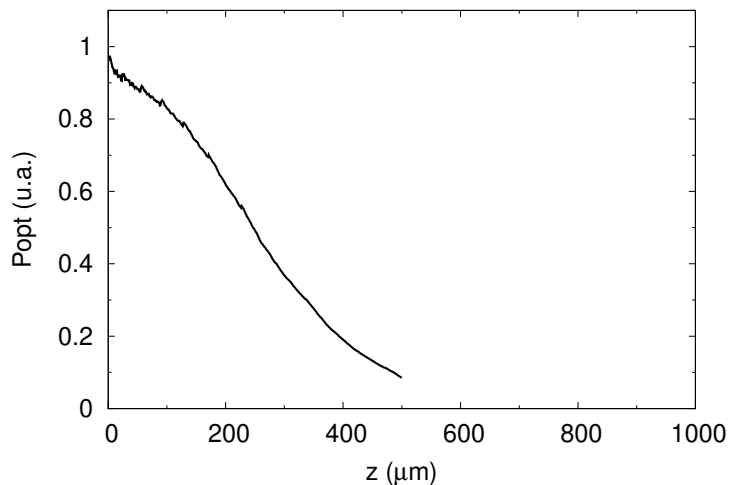


FIGURE 2.8 – Évolution de la puissance optique de la fenêtre de calcul le long du guide.

2.5.2 Guides de longueur 1,0 mm

La meilleure solution obtenue par algorithme génétique est décrite tableau 2.6 et visualisée figure 2.9 page suivante. Les points de contrôle de la courbe de Bézier sont :

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_1 + (313,67 - 0,046i) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{B}_4 + (-92,575 + 0,049i) \quad (2.13)$$

| pa(1) μm | pa(2) μm | pa(3) μm | pa(4) μm | pa(5) μm | pa(6) μm | pa(7) μm |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.290 | 0.09 | 0.200 | 313.670 | -0.046 | -92.575 | 0.049 |

TABLE 2.6 – Meilleure solution obtenue pour un guide de 1 mm de long.



FIGURE 2.9 – Vue de dessus en BPM3D pour une longueur de 1 mm. L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

On voit figure 2.10 que l'on a une assez bonne linéarité ($S = 0,532$) et que 94,6 % de la lumière est absorbée.

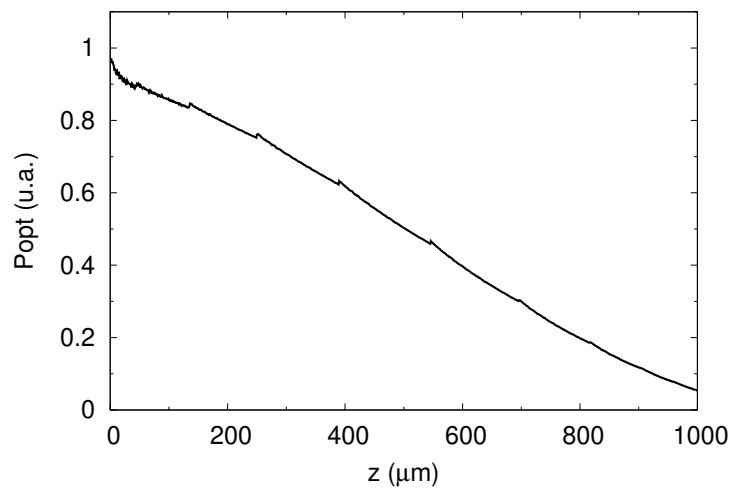


FIGURE 2.10 – Évolution de la puissance optique de la fenêtre de calcul le long du guide.

Chapitre 3

Conception analytique

Dans ce chapitre nous étudions par BPM 3D des guides optiques conçus par Émilien PEYTAVIT à l'aide d'un calcul analytique faisant intervenir un coefficient d'absorption variable en fonction de z et une étude par FDTD-2D des pertes du nanoguide en fonction de sa largeur (cf. exposé mai 2018).

La largeur du nanoguide en z est alors définie par :

$$w(z) = A \cdot \left(1 - \frac{z}{L_g}\right)^{\frac{10 \cdot \log(e)}{t1 \cdot z}} + A_0 \quad (3.1)$$

avec $A_0 = 156,5 \text{ nm}$, $A = 272,5 \text{ nm}$ et $t1 = 7,5 \text{ dB mm}^{-1}$. On notera que la largeur finale A_0 du guide est fixée mais que la largeur à l'entrée dépend de la longueur L_g du guide.

3.1 Guides de longueur 0,5 mm

En BPM 3D, ce guide (figure [3.1 page suivante](#)) offre une décroissance optique relativement linéaire (figure [3.2 page suivante](#)), mais il reste 35 % de puissance optique non absorbée au bout de 500 nm ($S = 20,9$). On notera également sur cette courbe la présence de dents dues au rétrécissement progressif du nanoguide de $2\delta x = 0,01 \mu m$ à chaque fois. La décroissance rapide dans les cinquante premiers microns du guide est probablement due au fait que le faisceau injecté s'adapte au guide, et ne devrait pas exister dans le cas où le guide est précédé d'une portion droite.

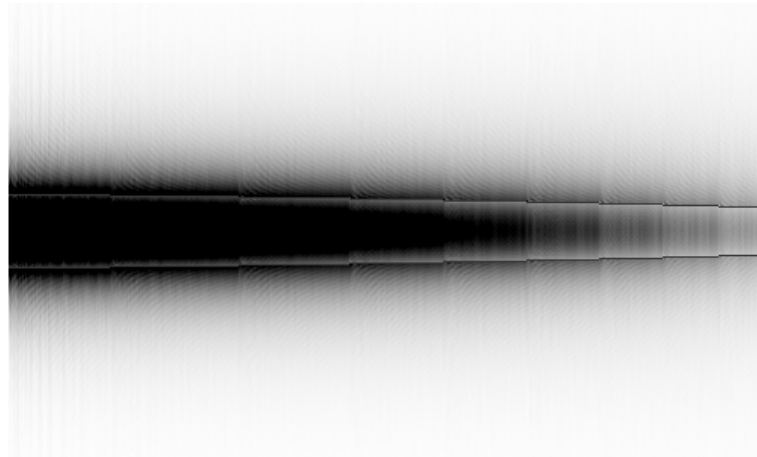


FIGURE 3.1 – Vue de dessus en BPM-3D pour une longueur de 500 μm . L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

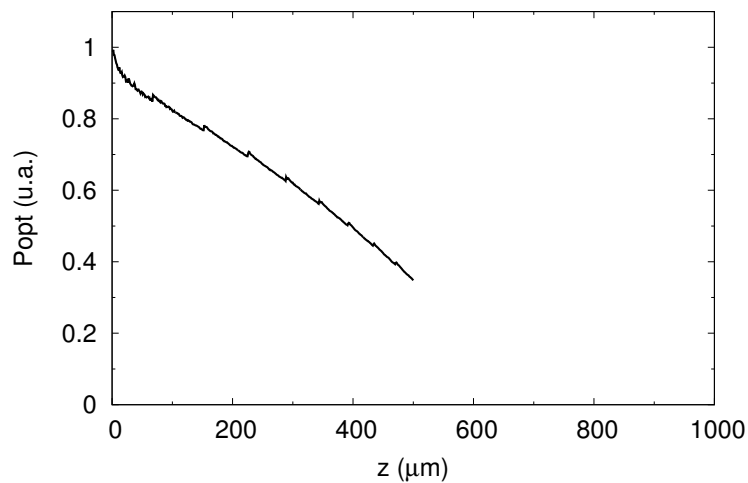


FIGURE 3.2 – Évolution de la puissance optique contenue dans la fenêtre de calcul le long du guide.

Réduire la valeur de A_0 de 45 nm permet d'améliorer le résultat (figure 3.3 page suivante) : il ne reste alors plus que 10,6% de lumière non absorbée et l'évolution de la puissance optique reste intéressante ($S = 2,34$). Au-delà de 45 nm, l'allure en exponentielle décroissante de la courbe s'accroît rapidement (le paramètre S se dégrade).

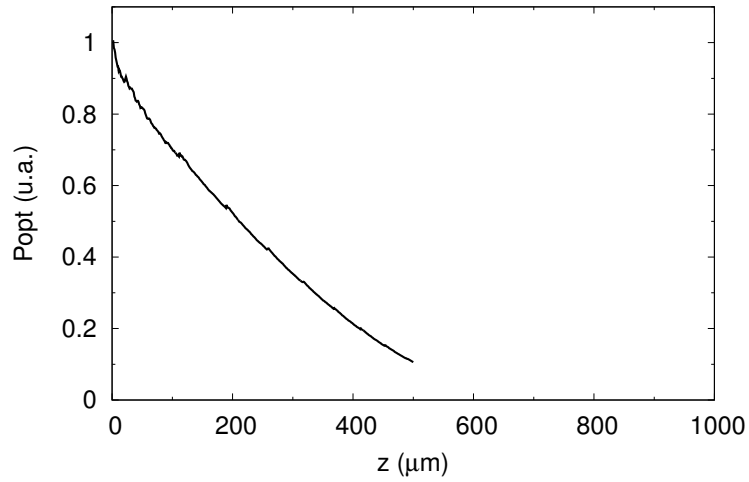


FIGURE 3.3 – Évolution de la puissance optique contenue dans la fenêtre de calcul le long du guide, pour une valeur de A_0 réduite de 45 nm.

3.2 Guides de longueur 1 mm

Avec ce guide, il reste 48 % de puissance optique non absorbée au bout de 1000 nm ($S = 86$).

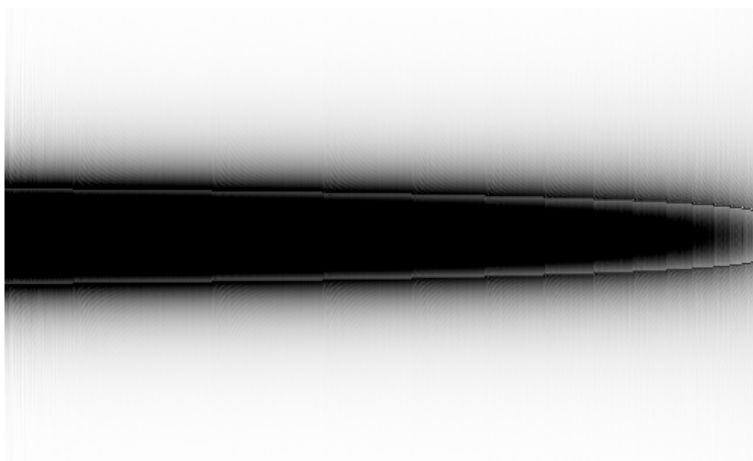


FIGURE 3.4 – Vue de dessus en BPM-3D pour une longueur de 1000 μm. L'échelle verticale est fortement dilatée afin que la forme du guide soit visible.

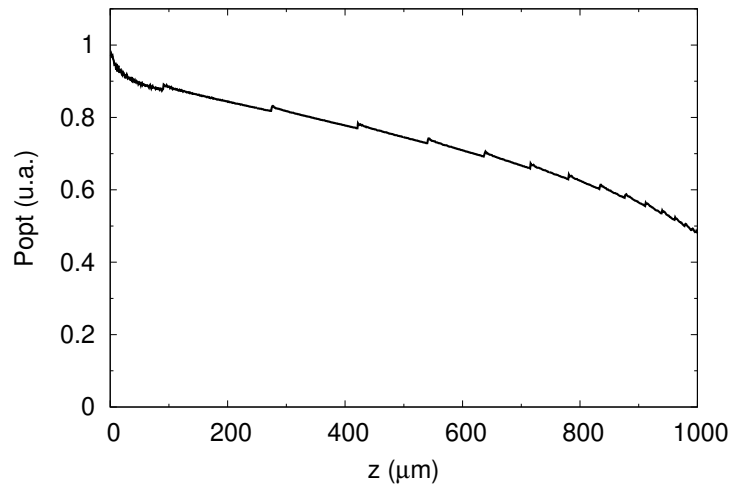


FIGURE 3.5 – Évolution de la puissance optique contenue dans la fenêtre de calcul le long du guide.

Réduire la valeur de A_0 de 70 nm permet d'obtenir un résultat très intéressant (figure 3.6) : il ne reste alors plus que 8% de lumière non absorbée et la courbe de puissance optique a une très bonne linéarité. La somme des moindres carrés S vaut désormais 2,74 contre 86 sans cette correction.

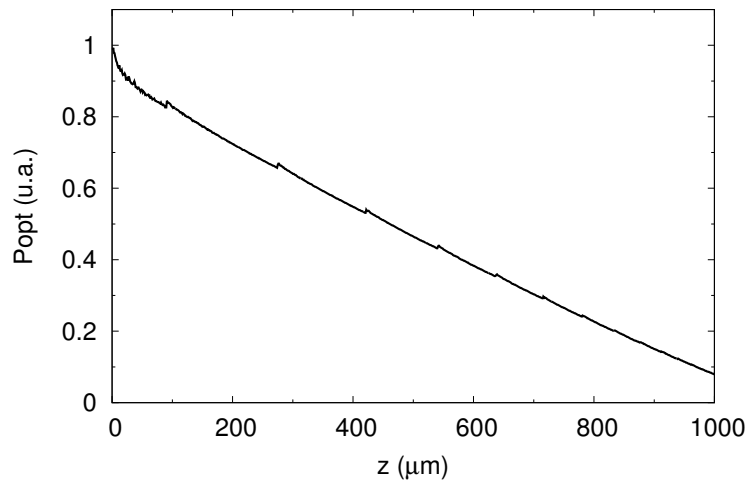


FIGURE 3.6 – Évolution de la puissance optique contenue dans la fenêtre de calcul le long du guide, pour une valeur de A_0 réduite de 70 nm.

Chapitre 4

Conclusion

Il est remarquable d'obtenir une absorption optique quasiment constante. Cela est rendu possible par l'utilisation de nano-guides optiques dont la largeur du cœur peut être réduite avec le profil voulu afin de déconfiner progressivement le mode optique.

Nous avons obtenu par deux méthodes différentes des structures intéressantes pour l'application visée. On peut noter que les solutions de 1 mm de long semblent globalement meilleures en terme de linéarité que celles de 500 μm .

Si ces résultats de modélisation sont confirmés par l'expérience, il serait intéressant de mettre à jour notre bibliographie pour voir si cela est encore publiable. Les résultats expérimentaux permettront bien sûr également d'affiner certains paramètres liés aux matériaux utilisés.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR PHENIX. Une grande partie des optimisations par AG a été réalisée sur les PC des salles informatiques de l'école d'ingénieurs Polytech Lille.

Bibliographie

- [Bååk, 1982] Bååk, T. (1982). Silicon oxynitride ; a material for grin optics. *Appl. Opt.*, 21(6) :1069–1072.
- [Dankowski et al., 1997] Dankowski, S., Kiesel, P., Ruff, M., Streb, D., Tautz, S., Keil, U., Sørensen, C., Knüpfer, B., Kneissl, M., and Döhler, G. (1997). Optical and electro-optical investigation of low-temperature grown gaas. *Materials Science and Engineering : B*, 44(1–3) :316 – 319. 3rd International Workshop on Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies.
- [Deng et al., 1998] Deng, H., Jin, G. H., Harari, J., Vilcot, J. P., and Decoster, D. (1998). Investigation of 3-d semivectorial finite-difference beam propagation method for bent waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 16(5) :915–922.
- [Doerr et al., 2010] Doerr, C., Chen, L., Chen, Y.-K., and Buhl, L. (2010). Wide bandwidth silicon nitride grating coupler. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(19) :1461–1463.
- [Green, 2008] Green, M. (2008). Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 k including temperature coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11) :1305–1310.
- [Kokubo and Ohta, 1997] Kokubo, Y. and Ohta, I. (1997). Refractive index as a function of photon energy for algaas between 1.2 and 1.8 ev. *Journal of Applied Physics*, 81(4) :2042–2043.
- [Magnin, 1998] Magnin, V. (1998). *Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille (Lille I).
- [Magnin et al., 2002] Magnin, V., Giraudet, L., Harari, J., Decobert, J., Pagnot, P., Boucherez, E., and Decoster, D. (2002). Design, optimization, and fabrication of side-illuminated p-i-n photodetectors with high responsivity and high alignment tolerance for 1.3-and 1.55- μm wavelength use. *J. Lightwave Technol.*, 20(3) :477.

- [Magnin and Harari, 2014] Magnin, V. and Harari, J. (2014). Optimisation of a dielectric optical waveguide on It-gaas for linear evanescent absorption. Rapport du projet PhotowaTHz.
- [Pagies, 2011] Pagies, A. (2011). *Nanophotointerrupteur avec optique intégrée pour échantillonnage hyperfréquence*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille (Lille I).
- [Palik, 2012] Palik, E. (2012). *Handbook of optical constants of solids*, volume 1.
- [Rakić et al., 1998] Rakić, A., Djurišić, A., Elazar, J., and Majewski, M. (1998). Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied Optics*, 37(22) :5271–5283.