



Compromis gain-pertes dans les performances des filtres de Bragg à forte modulation d'indice

(Gain-loss tradeoff in the performance of high index modulation Bragg filters)

Abdelaziz Ouariach, Kamal Ghoumid¹, Jamal Zaidouni¹, Abdelkrim Nougouai²

¹ *Department of Electronics, Informatics and Telecommunication, Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Oujda (ENSAO), Oujda, Morocco*

² *Department of Physics, University of Mohamed Premier Oujda, Morocco*

Received 28 October 2021, Revised 22 November 2021, Accepted 24 November 2021

Abstract

In this article we explain the gain-loss trade-off by studying the effect of the etching depth l on the reflectivity R and the losses related to optical filters based on Bragg grating (BG). This study has demonstrated that from an optimal modulation depth the desired transfer function of the filter can be the most appropriate in terms of performance. We were also able to experimentally calculate this optimal engraving depth on several realizations. This made it possible to show that once the reflectivity reaches its maximum value, it is useless to exceed this depth value because it does not improve the reflection gain but it only increases the losses related to the BG. This increase in losses leads to the degradation of the quality of the transmission by increasing the probability of error and decreasing the bit rate.

Keywords : Bragg grating; Gain/loss; Reflectivity; index modulation; Performance degradation Réseau de Bragg; Gain/perte; Réflectivité; modulation d'indice ; Dégradation des performances

Résumé

Dans le présent article nous expliquons le compromis gain-pertes en étudiant l'effet de la profondeur de gravure l sur la réflectivité R et les pertes liées aux filtres optiques à base de réseau de Bragg (BG). Cette étude a permis de démontrer qu'à partir d'une profondeur de modulation optimale la fonction de transfert souhaitée du filtre peut être la plus appropriée en termes de performances. Nous avons pu également calculer expérimentalement cette profondeur de gravure optimale sur plusieurs réalisations. Cela a permis de montrer qu'une fois que la réflectivité atteint sa valeur maximale, il est inutile de dépasser cette valeur de profondeur car cela n'améliore pas le gain de réflexion mais il n'augmente que les pertes liées au BG. Cet accroissement de pertes conduit à la dégradation de la qualité de la transmission en augmentant la probabilité d'erreur et en diminuant le débit binaire.

Mots clés : Réseau de Bragg; Gain/perte; Réflectivité; modulation d'indice ; Dégradation des performances .

Adresse mail: ouariach.abdelaziz@gmail.com // a_nougouai@yahoo

1. Introduction

Les hétérostructures périodiques ayant servi à la réalisation des cristaux photoniques et des métamatériaux, ont suscité un grand intérêt depuis plusieurs années du fait de leur capacité à contrôler la lumière sur de très courtes distances [1, 2]. Des variantes multiples sont attendues à partir de cette réalisation concernant en particulier les domaines de l'optoélectronique et des télécommunications. Du point de vue des matériaux, il est important de noter que, jusqu'à présent, les cristaux photoniques ont été

principalement réalisés dans des matériaux semiconducteurs et que très peu d'équipes à travers le monde avaient réussi la transposition de ces procédés sur des cristaux diélectriques. Dans le cadre de cette transposition, nous avons opté pour l'utilisation d'un matériau qui n'a pas manqué de susciter l'intérêt des chercheurs par son importance et sa fiabilité pour les fonctions requises : c'est le niobate de lithium (LiNbO_3). En effet, dans ce travail, nous avons souligné les différents enjeux provenant de l'utilisation de ce matériau (niobate de lithium) comme cristal avec un impact certes, très favorable en pratique pour la photonique et pour les télécommunications optiques. La structuration d'un tel matériau constitue actuellement un sujet qui incite à de nombreuses recherches en raison du grand nombre de ses propriétés dont nous citons à Congrès International sur les Technologies de l'Information et les Systèmes de Production Intégrée. TISPI'2016, Mai 26-28, 2016- EHEI Oujda – Maroc titre d'exemple : non-linéarité, piézoélectricité, forts coefficients électro-optiques ou acousto-optiques etc...; très attractives pour l'optique intégrée. Au départ, ce sont surtout les structures ridges qui ont motivé les développements technologiques [3], car ces structures en crête, confinant latéralement le mode optique par une gravure du substrat de part et d'autre du guide (Fig.1), offrent de nombreux intérêts comme l'amélioration de l'effet électro-optique dans les modulateurs et dans d'autres dispositifs. Plus récemment encore, les Réseaux de Bragg réalisés à partir de cristaux photoniques 2D ont également fait l'objet de recherches plus fines sur le niobate de lithium en se portant à des échelles micrométriques et nanométriques [4]. Dans ce même sens, la fabrication et le perfectionnement de ces réseaux viennent d'acquiescer un intérêt particulier surtout pour des fonctions spécifiques comme la réalisation des filtres, des miroirs ou coupleur à spectre étroits [5, 6, 7]. Bien que le sujet de filtrage soit abordé depuis plus d'une décennie, il est resté tout de même un enjeu d'actualité car le matériau est très résistant aux usinages traditionnels, et la réalisation de structures peu rugueuses à haut facteur de forme est toujours très difficile à obtenir. Parmi les réalisations les plus marquantes démontrées récemment, on peut citer la gravure humide suivie d'une diffusion pour lisser les flans [8], le faisceau ionique focalisé FIB (Focused Ion Beam) [9, 10], ou la gravure sèche précédée d'une préparation du cristal par exemple par échange protonique [11, 12]. Dans ce travail, nous avons proposé un modèle théorique basé sur la théorie de mode couplée adapté à l'approche de la matrice de transfert [13, 14, 15]. Ce modèle a porté sur l'influence des paramètres physiques et géométrique en particulier la profondeur de gravure l sur le coefficient de couplage K , la réflectivité R , et sur les pertes. En effet une augmentation de la profondeur de gravure l conduit à une augmentation de coefficient de couplage de modes K et par conséquent la réflectivité R . Cette augmentation se fait au détriment sur les pertes qui augmente en fonction de la profondeur de gravure l , par conséquent une dégradation de performance de la structure (Fig.1) en particulier : la diminution de débit binaire et la portée, et l'augmentation de puissance d'entrée...etc.

2. Description de modèle :

A. Principe

Sur la figure 1, nous avons schématisé la structure de base constituant le guide d'onde comme une répétition périodique de cellules élémentaires, formées d'une couche du matériau d'indice n_2 (LiNbO_3 : Ti) superposée à une couche d'air d'une même épaisseur et d'indice n_3 . Ce qui donne à ce réseau le caractère de modulation périodique d'indice différentielle $\Delta n = (n_2 - n_3)$. Les autres données de la structure sont : le matériau constituant de substrat est le LiNbO_3 d'indice de réfraction n_1 , l profondeur de gravure et $L = \Lambda * N$ la longueur totale de réseau de Bragg (où Λ est la période du réseau et N est le nombre de période).

Il s'agit d'un guide en forme de réseau de Bragg qui fonctionne sur une bande de fréquence centrée autour de la longueur d'onde de Bragg λ_B [16] conformément à la relation :

$$2n_{\text{eff}} \Lambda = m\lambda_B \tag{1}$$

Où n_{eff} est l'indice effectif du mode de propagation, m est l'ordre de Bragg, Λ et λ_B sont définis avant.

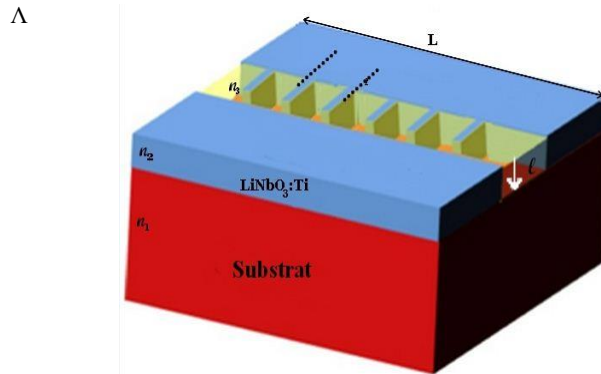


Figure. 1 : Schéma de base d'un réseau de Bragg gravé dans un guide LiNbO₃ : Ti

Théorie :

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la détermination du coefficient de couplage K entre modes de propagation, qui est déjà cité dans la référence [17]. C'est un moyen qui nous permis d'aborder facilement l'étude de l'effet de profondeur de gravure l sur la réflectivité R . Pour cela, nous nous sommes basés sur la résolution des équations de Maxwell adaptées à la théorie des modes couplés [13, 18, 19].

Nous rappelons l'expression de ce coefficient de couplage :

$$K = \frac{k_0^2(n_2^2 - n_3^2)}{2\pi m \beta N^2} \sin(m\pi \frac{w}{\Lambda}) \left\{ \begin{array}{l} l_2 + \frac{\sin(2l_2 h)}{2h} + \frac{q}{h^2} [1 - \cos(2l_2 h)] \\ + \frac{q^2}{h^2} [l_2 + \frac{\sin(2l_2 h)}{2h}] + \frac{1}{q} [1 - e^{-2ql}] \end{array} \right\} \tag{2}$$

With:

$$l_1 = \frac{w}{\Lambda} l \quad \text{And} \quad l_2 = (1 - \frac{w}{\Lambda}) l \tag{3}$$

And,

- l : la profondeur de gravure.
- m : L'ordre de Bragg.
- N : Nombre de période.

Dans le concept de la théorie des modes couplés, une des conditions qui doit être nécessairement satisfaite est que le produit du coefficient de couplage K par la longueur totale de perturbation L doit être de l'ordre de quelques unités [17, 20]. Pour étudier l'effet de profondeur de gravure l , des simulations ont été mises on œuvre pour tracer des courbes représentant le coefficient de couplage K en fonction de la profondeur de gravure l . A chaque valeur de m nous avons fait le tracé correspondant à côté de la courbe de réflectivité en fonction de cette même profondeur d'ondulation. Ces courbes sont représentées sur les figures 2 et 3.

Il est clair que d'après l'équation (2), le coefficient de couplage dépend de la profondeur de gravure l , par conséquent de la Réflectivité R et de la largeur spectrale $\Delta\lambda$ [17].

Lors de l'examen de ces résultats présentés ci-dessus, il semble que l'augmentation du coefficient de couplage K induit une augmentation de la profondeur de gravure.

En ce qui concernant l'effet de la profondeur de gravure l sur la réflectivité R , il est clair qu'à partir de l'équation (2) et les résultats présentés sur les figures 2, 3 et 4, on peut dire que l'augmentation de produit $K \cdot L$ conduit nécessairement à l'obtention d'un facteur de Réflexion maximal (Transmission minimal). Cette augmentation peut être obtenue en augmentant la profondeur de gravure l . A partir de la Fig. 3 et 4 nous pouvons constater que : $R(l=1\mu\text{m}) < R(l=2\mu\text{m}) < R(l=3\mu\text{m})$.

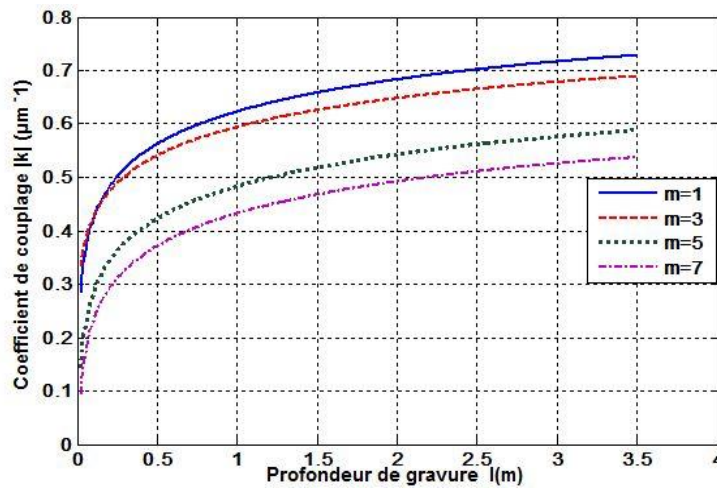


Figure. 2 : Coefficient de couplage K en fonction de la profondeur d'ondulation l pour différentes valeurs d'ordre de Bragg m .

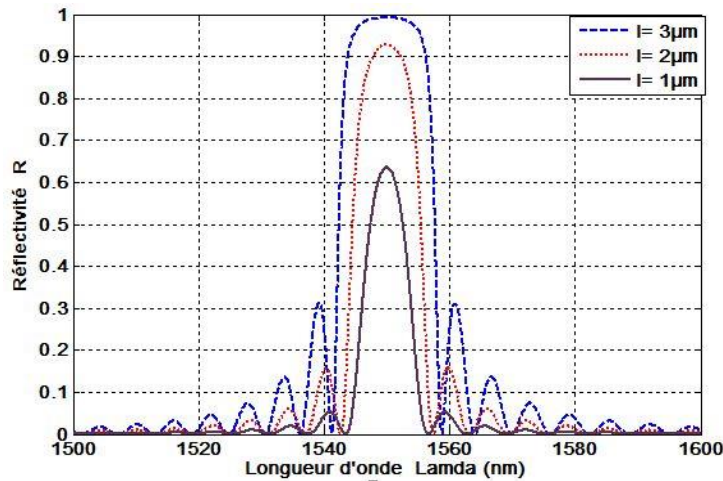


Figure. 3 : Réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de l .

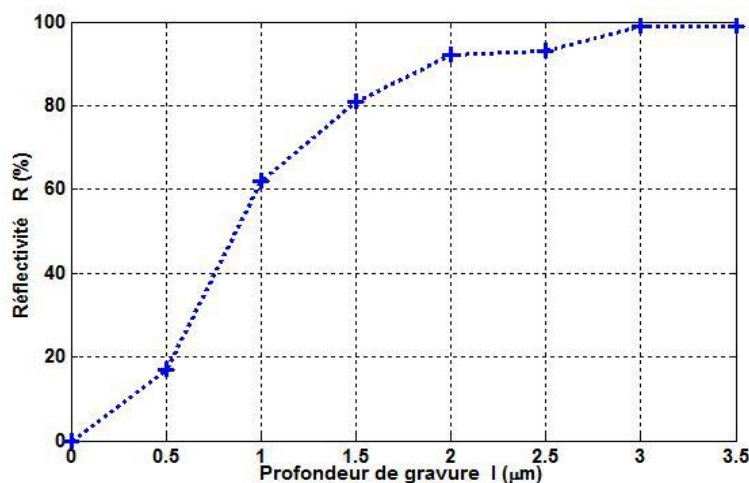


Figure. 4 : Réflectivité mesurée en fonction de la profondeur de gravure l (pour $N = 60$ périodes).

1. Pertes dues à la profondeur de gravure :

La caractérisation d'un guide d'onde est essentielle en tant qu'étape préliminaire pour optimiser un processus de fabrication de guide d'ondes en vue de la fabrication de composants optique intégrés. Un des

caractéristiques les plus importantes d'un dispositif de guidage est sa faible atténuation, ainsi la détermination des pertes optiques est d'un intérêt majeur lors de l'évaluation et l'optimisation d'un processus de fabrication. Il existe différents types de pertes [21, 22], tels que :

- Le processus d'injection et d'alignement.
- L'absorption du Matériau.
- l'inhomogénéité de la structure.

Dans ce travail, le type de perte que nous avons examiné lié à la profondeur de gravure l , en injectant le signal dans le guide. Des mesures expérimentales réalisées sur un guide d'onde à base de niobate de lithium LiNbO_3 : Ti diffusés est mise en œuvre par gravure avec une forte ondulation d'indice de période $\Lambda=1.8 \mu\text{m}$, $m=5$, $N=60$, dont le but d'évaluer les pertes en fonction de la profondeur de gravure l . La Fig. 5 montre les pertes mesurées en fonction de la profondeur de gravure l pour un nombre de période $N=60$. Lors de l'examen de ce résultat présenté ci-dessous il semble qu'en absence d'ondulation d'indice les pertes sont de l'ordre de 2.7 dB, mais au cours du processus de gravure, il apparaît clairement que les pertes augmentent en fonction de la profondeur de gravure l de 3.1 dB pour $l=0.5 \mu\text{m}$ à 5.3 dB pour $l=4 \mu\text{m}$.

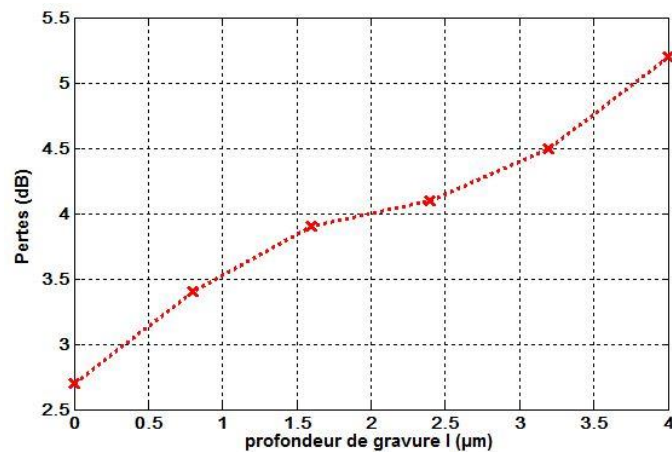


Figure. 5 : Pertes mesurées en fonction de la corrugation à $N = 60$ périodes.

La figure 6 montre le résultat de l'ensemble Réflectivité-Pertes en fonction de la profondeur de gravure l pour un nombre de période $N=160$. Il apparaît clairement à travers cette figure que dès lors que nous avons une profondeur de $2 \mu\text{m}$, la réflectivité atteint son niveau optimal 99%.

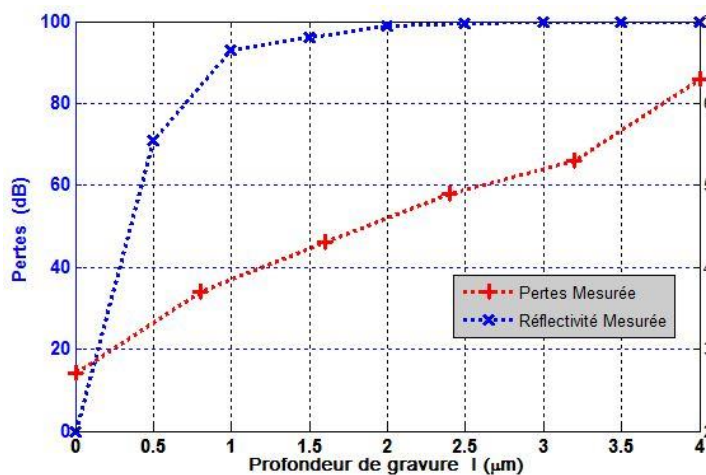


Figure. 6 : Réflectivité et pertes mesurées en fonction de la corrugation à $N = 140$ périodes.

Par ailleurs, nous constatons également, qu'avoir une profondeur de gravure dépassant les 2 μm n'améliore pas la performance de réflectivité, mais elle augmente la valeur de perte. En effet, entre 2 μm et 4 μm la réflectivité n'évolue pas alors que les pertes subissent une variation à la hausse de 1,9 dB.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté l'étude de l'influence de la profondeur de gravure l sur la réflectivité R , le coefficient de couplage K et les pertes. Nous avons montré expérimentalement qu'il y a une profondeur de gravure optimale qui peut résoudre le compromis gain-pertes en termes de performances exigées. L'étude présentée a été basée sur les mesurés et les réalisations expérimentales et elle est en cours d'être complétée par un modèle théorique, elle ouvre la possibilité à d'autres futures applications en particulier les modulateurs électro-optique et le codage CDMA.

References

- [1] S. Combrié, P. Colman, C. Husko, Q. Tran, A. De Rossi, "Advances in III-V based photonic crystals for integrated optical processing," ptoc-SPIE 760815, san Francisco, Californie, USA, 2010.
- [2] R. Farha, K. Ghomid, Q. Zou, B.-E. Benkelfat, "Analysis of a novel photonic-crystal structure laterally over modulated Ti:Er:LiNbO₃ engraved in waveguide for 1.55 μm emission," *J. Opt. A, Pure Appl*, 14 (2012) 1-8.
- [3] K. Noguchi, O. Mitoni, H. Miyazawa, S. Seki, "A broadband Ti: LiNbO₃ modulator with a ridge structure," *J. Lightwave Technol*, 13 (1995) 1164.
- [4] R. Ferrière, B.-E. Benkelfat, J. Dudley and K. Ghomid, "Bragg mirror inscription on LiNbO₃ waveguides by index microstructuring," *J. Appl*, 45 (2006) 1-9.
- [5] F. A. Gutierrez, P. Perry, E.P. Martin, A. D. Ellis, F. Smyth and L. P. Barry, "All- Analogue Real-Time Broadband Filter Bank Multicarrier Optical Communications System," *IEEE, J. Lightwave Technology*, 33 (2015) 5073-5083.
- [6] K. Ghomid, I. Elhechmi, S. Mekaoui and T. Gharbi. "Multi-wavelength Filtering Wideband by Cascade Bragg Reflectors in Optical waveguides," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 3 (2013) 506-509.
- [7] K. Ghomid, B.-E. Benkelfat, R. Ferriere, G. Ulliac, and T. Gharbi, "Wavelength-Selective Ti:LiNbO₃ Multiple Y-Branch Coupler Based on Focused Ion Beam Milled Bragg Reflectors," *Journal of Lightwave Technology*, 29 (2011) 3536.
- [8] H. Hu, R. Ricken, W. Sohler, "Low loss ridge waveguides on lithium niobate fabricated by local diffusion doping with titanium," *Appl. Phys. B*, 98 (2010) 677.
- [9] K. Ghomid, S. Mekaoui, A. Ouariach, R. Cheikh, A. Nougouai, T. Gharbi, "Tunable filter based on cavity electro-optic modulation for DWDM applications," *Optics Communications*, 334 (2015) 332-335.
- [10] L. Pierno, M. Dispenza, A. Secchi, A. Fiorello, V. Foglietti, "A lithium niobate electro-optic tunable Bragg filter fabricated by electron beam lithography," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt*, 10 (2008) 1-6.
- [11] A. Ouariach, K. Ghomid, R. Malek, Ali El Moussati, A. Nougouai, T. Gharbi, "Multiband filter at adjustable free spectrale range by convolution of transfer functions according to the vernier effect," *IET Optoelectronics*., in press.
- [12] Z. Ren, P. J. Heard, J. M. Marshall, P. A. Thomas, S. Yu, "Etching characteristics of LiNbO₃ in reactive ion etching and inductively coupled plasma," *Journal of applied physics*, 103 (2008) 034109.
- [13] A. Hardy, W. Streifer, "Coupled mode theory of parallel waveguides," *IEEE. J. Lightwave Tech*, 3 (1985) 1135-1146.

- [14] J. Hong, W. Huang, T. Makino, "On the transfer matrix method for distributed-feedback waveguide devices," *IEEE J. Lightwave Technology*, 10 (1992) 1860-1868.
- [15] B. Kim, E. Garmie "Comparaison between the matrix method and the coupled-wave method in the analysis of Bragg reflector structures," *J. Opt. Soc.*, 9 (1992) 132-136.
- [16] K. O. Hill, K. G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, 15 (1997) 1263-1276.
- [17] K. Ghomid, I. Elhechmi, S. Mekaoui, C. Pieralli, T. Gharbi, "Analysis of optical filtering in waveguides with a high index modulation using the extended coupled mode theory by hybridation of a matrix method," *Optics Communications*, 283 (2013) 85-91.
- [18] K. Ghomid, R. Ferriere, B.-E. Benkelfat, B. Guizal, and T. Gharbi, "Optical performance of Bragg gratings fabricated in Ti: LiNbO₃ waveguides by focused ion beam milling," *J. Lightw. Technol.*, 28 (2010) 3488-3493.
- [19] W. Streifer, D. Scifres, and R. Burnham, "Coupling coefficients for distributed feedback single- and double-heterostructure diode lasers," *IEEE Quantum Electron*, vol. QE-11 (1975) 867-873.
- [20] K. Ghomid, R. Ferriere, B.-E. Benkelfat, S. Mekaoui, Ch. Benmouhoub, and T. Gharbi, "Technological Implementation Fabry-Perot Cavity in Ti:LiNbO₃ Waveguide by FIB," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 231-233, 2012.
- [21] H. Bookey, R. Thomson, N. Psaila, A. Kar, N. Chiodo, R. Osellame, and G. Cerullo, "Femtosecond laser inscription of low insertion loss waveguides in Z-cut lithium niobate," *IEEE photon. Technol. Lett.*, vol. 19, pp. 892-894, 2007.
- [22] F. Rottmann and E. Voges, "Low-insertion-loss tunable wavelength multiplexer on lithium niobate," *Electron. Lett.*, vol. 23, pp. 1007-1008, 1987.

(2021) ; <https://revues.imist.ma/index.php/ehei-jst/index>