



N° d'ordre



THESE DE DOCTORAT

Présentée devant l'Université Djillali
Liabès de Sidi-Bel-Abbès Faculté de
Génie Électrique
Département de Télécommunications

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat LMD en
télécommunications
Spécialité : Systèmes De Télécommunications

Par

Mr KOUDDAD Elhachemi

Formation doctorale : Systèmes de
Télécommunications
Laboratoire : Télécommunications et Traitement
Numérique du Signal

Titre de la thèse :

Contribution à la conception de différents modèles de portes logiques optiques à base de cristaux photoniques

Soutenue le :

Devant le jury composé de :

Président :	Mme. DRIZ SAMIA	MCA	UDL de Sidi-Bel-Abbès
Examineurs :	Mr. BOUKLI-HACENE NOUREDDINE	Pr	Université de Tlemcen
	Mme. DEKKICHE LEILA	MCA	UDL de Sidi-Bel-Abbès
Directeur de thèse :	Mr. NAOUM RAFAH	Pr	UDL de Sidi-Bel-Abbès

Année Universitaire :2021-2022

Résumé :

En raison de notre dépendance croissante à l'égard de la technologie informatique, des ordinateurs performants sont nécessaires. Par conséquent, l'optique est la meilleure solution par rapport à l'électronique, car elle peut traiter des données en parallèle jusqu'à 10 000 fois plus rapidement que les ordinateurs électroniques au moindre coût. Les portes logiques optiques sont des éléments de base dans la conception d'ordinateurs optiques qui répondent aux besoins des utilisateurs, ainsi qu'à l'utilisation accrue d'internet représentée par les ultra-hauts débits et les larges bandes passantes. Notre travail, dans cette thèse, comprend une étude, une contribution, une optimisation, et une modélisation par simulation de différents types de portes logiques optiques à base de cristaux photoniques en exploitant la linéarité et la non-linéarité optique. Différentes techniques et paramètres de performances ont été utilisés pour construire et examiner ces portes logiques optiques, tels que le rapport de contraste, la taille du dispositif, le débit binaire, le temps de réponse, et l'énergie consommée. La conception des portes logiques présentée dans cette thèse a été réalisée par le logiciel « RSoft CAD » disponible au niveau du laboratoire TTNS, les résultats obtenus sont comparés et très performants à d'autres travaux récents.

Mots clé : Optique linéaire, Optique non-linéaire, Cristaux photoniques, Portes logiques optiques, Effet Pockels, Effet Kerr, FullWAVE, BandSOLVE.

Abstract:

Because of our increasing dependence on computer technology, powerful computers are needed. Therefore, optics is the better solution compared to electronics, as it can process data in parallel up to 10,000 times faster than electronic computers at the lowest cost. Optical logic gates are basic elements in the design of optical computers that meet the needs of users, as well as the increased use of the internet represented by ultra-high speed and high bandwidth. Our work in this thesis includes a study, contribution, optimization, and simulation modeling of different types of photonic crystal-based optical logic gates exploiting optical linearity and non-linearity. Different techniques and performance parameters were used to construct and examine these optical logic gates, such as contrast ratio, device size, bit rate, response time, and power consumption. The design of the logic gates presented in this thesis was carried out using the "RSoft CAD" software available at the TTNS laboratory, and the results obtained are compared and found to be very good in comparison with other recent works.

Key words: Linear optics, Non-linear optics, Photonic crystals, Optical logic gates, Pockels effect, Kerr effect, FullWAVE, BandSOLVE.

ملخص:

نظرا لإعتمادنا المتزايد على تكنولوجيا الحاسوب ، هناك حاجة إلى أجهزة الحواسيب عالية الأداء. لذلك ، فإن الحواسيب البصرية هي الحل الأفضل مقارنة بالحواسيب الإلكترونية ، حيث يمكنها معالجة البيانات بسرعة تصل إلى 10000 مرة أسرع من أجهزة الحواسيب الإلكترونية و بأقل تكلفة. تعد الدوائر المنطقية البصرية عناصر أساسية في تصميم أجهزة الحواسيب الضوئية التي تلبي إحتياجات المستخدمين ، بالإضافة إلى الإستخدام المتزايد للإنترنت المتمثل في سرعات التدفق و النطاق الترددي العالي. يتضمن عملنا ، في هذه الأطروحة ، دراسة ومساهمة وتحسين ومحاكاة لأنواع مختلفة من الدوائر المنطقية البصرية القائمة على البلورات الفوتونية من خلال إستغلال الظواهر البصرية الخطية منها وغير الخطية. تم استخدام مختلف التقنيات وضوابط الأداء لبناء وفحص هذه الدوائر المنطقية البصرية ، مثل نسبة التباین وحجم الجهاز ومعدل التدفق ووقت الإستجابة والطاقة المستهلكة. تم تصميم الدوائر المنطقية المقدمة في هذه الأطروحة بواسطة برنامج «RSOFT CAD» والمتواجد في مختبر البحث TTNS ، وأثبتت النتائج المتحصل عليها أنها متطورة و ذات فعالية و جودة عالية مقارنة مع نتائج أخرى حديثة النشر في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: البصريات الخطية ، البصريات غير الخطية ، البلورات الفوتونية ، البوابات المنطقية البصرية ، تأثير ظاهرة Pockels ، تأثير ظاهرة Kerr ، FullWAVE ، BandSOLVE.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale.....	1
I. Chapitre : L'évolution de l'optique linéaire à l'optique non-linéaire.....	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Concepts de base de l'optique linéaire.....	4
I.2.1 Modèle simplifié de la susceptibilité linéaire pour un milieu diélectrique	5
I.2.2 Modèle physique de l'indice de réfraction et l'absorption pour l'optique linéaire	7
I.2.3 La polarisation linéaire.....	8
I.3 Différents processus non-linéaires du deuxième ordre	10
I.3.1 Doublage de fréquence (Génération de seconde harmonique).....	11
I.3.2 Equation de propagation dans un régime de faible conversion.....	12
I.3.3 Accord de phase ($\Delta k = 0$)	14
I.3.4 Autre processus non-linéaire du 2eme ordre : Effet électro-optique (Effet pockels).....	14
I.4 Processus non-linéaire du troisième ordre (Effet Kerr optique).....	15
I.4.1 Equation de propagation non-linéaire	16
I.4.2 L'indice non-linéaire n_2	18
I.4.3 Auto focalisation et lentille de Kerr	18
I.5 Conclusion	20
I.6 Références.....	21
II. Chapitre II : Historique et principes de performance des portes logiques à base des cristaux photoniques	22
II.1 : Introduction	22
II.2 : Histoire des cristaux photoniques.....	23
II.3 : Vue générale sur les propriétés des cristaux photoniques et méthodes de simulation.....	23
II.3.1 : Méthodes de simulation numérique.....	26

II.3.2 : Bande interdite photonique.....	27
II.3.3 : Défauts dans les cristaux photoniques	29
II.4 : Histoire des portes logiques à base des cristaux photoniques	30
II.5 : Différents concepts des portes logiques basées sur les cristaux photoniques.....	32
II.5.1 : Portes logiques basées sur les interférences	32
II.5.2 : Portes logiques basées sur la résonance.....	32
II.5.3 : Portes logiques basées sur l’auto-collimation.....	33
II.6 : Portes logiques tout-optiques à base de cristaux photoniques. Etat de l'art.....	35
II.6.1 : Portes logiques tout-optique basées sur les interférences	35
II.6.2 : Portes logiques tout-optique basée sur la résonance.....	39
II.6.3 : Portes logiques tout-optique basées sur l’auto-collimation	44
II.7: Conclusion	46
II.7 : Références	47
III. Chapitre III : Les portes logiques tout-optique à base cristaux photoniques linéaires	52
III.1 Introduction :	52
III.2 Description de la structure initiale.....	53
III.3 Résultats et discussion.....	55
III.3.1 Résultats de la simulation de la porte logique ‘NOT’	55
III.3.2 Résultats de la simulation de la porte logique ‘XOR’	58
III.3.3 Résultats de la simulation de ‘XNOR’	62
III.4 Conclusion.....	66
III.5 Références	67
IV. Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires	70
IV.1 Introduction	70
IV.2 Les portes logiques électro-optiques à base cristaux photoniques non-linéaire du second ordre (Effet Pockels).....	70
IV.2.1 Introduction	70
IV.2.2 Structure physique et photonique de la bande interdite	71
IV.2.3 Simulation des dispositifs électro-optiques à base des cristaux photoniques.....	72

IV.2.4 Conclusion.....	86
IV.3 Portes logiques tout-optique à base des cristaux photoniques non-linéaires du troisième ordre (Effet Kerr).....	86
IV.3.1 Portes logiques tout-optique ‘NOT’ et ‘OR’ en utilisant un commutateur basé sur l’effet Kerr non linéaire et un résonateur en anneau	86
IV.3.2 Évaluation des performances des portes logiques tout-optiques NOT, XOR, NOR et XNOR basées sur des cristaux photoniques non linéaires à cavité résonante en 2D.....	96
IV.4 Références	111
Conclusion Générale et perspectives	120

Dédicace

Avant tout je remercie mon Dieu tout puissant, qui m'a donné, la volonté, le courage et la patience et qui a guidé mes pas vers le droit chemin durant mes années d'étude.

Je dédie ce travail à :

Aux êtres les plus chers : Mes parents,

A ma mère : Pour son affection, sa patience, sa compréhension, sa disponibilité, son écoute permanente et son soutien sans égal dans les moments les plus difficiles de ma vie.

J'espère que ce mémoire sera à la hauteur de tes attentes et qu'elle Soit l'accomplissement de tous tes efforts.

A mon père : Mon plus haut exemple et mon modèle de persévérance pour aller toujours de l'avant et ne jamais baisser les bras. Pour son enseignement continu à m'inculquer les vraies valeurs de la vie et pour ses précieux conseils.

A, mes chères soeurs et mon cher frère.

Je Didier ce travaille à la mémoire de ibrahim hafeci paix a son ame. Qui avait un rôle important de me soutenir et de me guide vert le bon chemin.

A mon cher frère Ahmed Belkèbir, mon oncle mustapha dahou, zhor mouhous, en particulier.

A amies, Nouioua Nadhir, Farah Mahdi, Mezoua Oussama.

A ma grande famille, mes amis et mes collègues.

Toute la promotion Télécommunications 2018.

elhachemi

Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier **dieu** de m'avoir aidé à achever ma thèse.*

*J'exprime ici mes vifs remerciements à tous les membres d'équipe de « optiques et micro-onde », particulièrement, à monsieur **faouzi salah BELKHODJA**, Professeur à l'université « Djillali LIABES » de Sidi Bel Abbés, membre de cette équipe et responsable de projet de recherche.*

*Je ne pourrais jamais assez remercier mon directeur de thèse, Monsieur **Rafah NAOUM**, d'avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité et surtout pour sa patience dont il a fait preuve pendant la préparation de ce présent fascicule.*

*Je tiens à témoigner mes très grandes reconnaissances à Madame **LEILA DEKKICHE**, Maitre conférence à U.D.L de sidi bel Abbés, qui m'a aidé par son soutien et ses encouragements.*

*Je remercie également Madame **DASSI LEILA**, l'ingénieur du laboratoire TTNS, pour son ambiance et sa bonne humeur, son soutien et ses encouragements.*

Mes remerciements vont également à l'honorable jury :

- ***Mme DRIZ SAMIA**, Maitre de conférence à l'université de « Djillali LIABES » de Sidi Bel Abbés, présidente*
- ***Mr. BOUKLI-HACENE NOUREDDINE**, Professor à l'université de « Abou Bekr Belkaid » de Tlemcen.*
- ***Mme DEKKICHE LEILA**, Maitre de conférence à l'université de « Djillali LIABES » de Sidi Bel Abbés, examinatrice.*

Enfin, je remercie tous les lecteurs d'avoir pensé à portée cette thèse.

Liste des figures

Figure I.1 : Représentation schématique du mouvement des particules chargées dans un milieu diélectrique soumis à un champ électrique oscillant de fréquence optique. (a) Cristal constitué d'atomes (N oscillateurs par unité de volume). (b) Un oscillateur soumis à un champ E . [2].....	6
Figure I.2 : Illustration de la dispersion et de l'absorption de l'indice de réfraction. Les deux caractéristiques résonantes montrent des régions de dispersion anormale, ces régions sont accompagnées de fortes pertes [2]......	8
Figure I.3 : La polarisation en fonction de champ E en régime linéaire (faible régime). Oscillateur harmonique (a) amorti, (b) forcé.[2].....	9
Figure I.4 : La polarisation en fonction de champ E en régime non-linéaire. Oscillateur anharmonique (a) amorti, (b) forcé.[2].....	9
Figure I.5 : Dispersion d'un faisceau blanc par un prisme [2].	10
Figure I.6 : Représentation des différents processus non-linéaires du second ordre en fonction de (ω_1, ω_2) [2]......	11
Figure I.7 : Phénomène de doublage de fréquence [4].	12
Figure I.8 : une plaque photographique pour l'observation (Figure I.7) [4]	12
Figure I.9 : Phénomène de génération de seconde harmonique. [2].....	13
Figure I.10 : La densité de puissance produite varie comme le carré de la densité de la puissance incidente, la puissance produite varie comme le carré de l'épaisseur du cristal (z) [2].	14
Figure I.11 : L'effet Pockels peut être décrit comme un χ^2 une interaction optique non-linéaire avec $E^2 \rightarrow E\omega E\omega = 0$. La somme de fréquence $\omega + 0 = \omega$ (mais le champ E n'est pas nul !)	15
Figure I.12 : Déplacement de l'enveloppe $\mathcal{A}r, t$ dans le plan complexe [2].....	17
Figure I.13 : Un matériau non-linéaire du troisième ordre qui agit comme une lentille sphérique, permet de réaliser l'auto focalisation en fonction de l'intensité de l'onde incidente.[2].....	19
Figure II.1 : Exemple de cristaux naturels : (A) Pierre opale, (B) Plume de Paon, et (C) Aile de papillon [11].	24
Figure II.2 : Interférence, (A) Constructive, (B) Destructive pour les ondes réfléchies par un réseau régulier de diffractions d'ondes [11].	25
Figure II.3 : Réflexion de Bragg d'une onde plane qui entre en collision oblique avec les plaques d'un cristal ou d'un cristal photonique [11].....	25
Figure II.4 : Mode TE et TM dans le plan XYZ. [13]	27
Figure II.5 : Cristal photonique bidimensionnel : (a) Structure déconnectée, (b) Structure connectée [13]	28
Figure II.6 : Bande interdite pour la polarisation : (a) TM, (b) TE [14].....	28

Figure II.7 : Défauts dans la structure photoniques : (a) et (b) Défauts linéaires, (c) Défaut ponctuel. [17]	29
Figure II.8 : Guide à base de cristaux photoniques (défaut linéaire) : Présence du mode guidé (en rouge) dans la BIP (en jaune) [17].	30
Figure II.9 : Impact du changement du rayon des défauts sur la fréquence de résonance dans la BIP.[18]	30
Figure II.10 : Interférence destructive et constructive entre les ondes. [36]	32
Figure II.11 : (a) Résonateur en anneau à cristaux photoniques, (b) Spectre de transmission [41].	33
Figure II.12 : Illustration schématisée du phénomène d'auto-collimation, (B) avec le cas de divergence (A1), et de convergence (A2). Chaque cas correspond, respectivement, au collimateur (B), à la lentille concave (A1) et à la lentille convexe (A2) en optique conventionnelle. Les flèches au-dessus de la surface de dispersion indiquent les vecteurs d'onde incidents dans l'espace réciproque. Les flèches sous la surface de dispersion indiquent le flux d'énergie dans l'espace réel [42].	35
Figure II.13 : Schéma des portes AND et XOR basées sur l'interférence multimode (MMI) [44].	37
Figure II.14 : Structure schématisée des portes XOR, XNOR, NAND et OR utilisant un réseau de géométrie triangulaire [45].	38
Figure II.15 : Structure des portes XNOR, XOR, OR et NAND [46].	39
Figure II.16 : Structure d'une porte OR avec A et B comme ports d'entrée et O comme port de sortie [47].	40
Figure II.17 : Schéma d'une porte OR utilisant un matériau non linéaire d'origine Kerr [48].	41
Figure II.18 : Schéma des portes logiques AND/OR [49].	42
Figure II.19 : (a) Schéma de la porte NOT et (b) schéma de la porte AND [50].	43
Figure II.20 : Structure d'une porte NAND utilisant un matériau non-linéaire à effet Kerr [51].	44
Figure II.21 : (a) La structure pour les portes logiques OR et XOR avec déphaseur (b) lorsque la différence de phase est $\pi/2$, (c) lorsque la différence de phase est $-\pi/2$. [52]	45
Figure III.1 : Structure initiale.	53
Figure III.2 : Diagramme de bande.	53
Figure III.3 : Schéma de principe de la porte logique 'NOT'.	54
Figure III.4 : Conception finale de notre proposition de porte logique NOT tout-optique.	54
Figure III.5 : Spectre de transmission linéaire de la cavité résonante.	55
Figure III.6 : Plages de niveaux de transmission.	55
Figure III.7 : Distribution du champ optique pour différents états de la porte NOT proposée pour : (a) Bias=1, Input=0. (b) Bias=1, Input=1.	57
Figure III.8 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte logique 'NOT' proposée pour:(a) Bias=1, Input=0. (b) Bias=1, Input=1.	57

Figure III.9 : Schéma de principe de la porte logique XOR proposée.	58
Figure III.10 : La conception finale de la porte logique XOR tout-optique proposée.....	58
Figure III.11 : Distribution du champ optique pour les 4 états de la porte ‘XOR’ proposée : (a) Input 1 = Input 2 = 0. (b) Input 1 = 0, Input 2 =1. (c) Input 1 =1, Input 2 =0. (d) Input 1= Input 2 =1.	60
Figure III.12 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte XOR proposée pour :(a) Input 1 = Input 2 = 0. (b) Input 1 = 0, Input 2 =1. (c) Input 1 =1, Input 2 =0. (d) Input 1= Input 2 =1.....	61
Figure III.13 : Schéma de principe de la porte XNOR.....	62
Figure III.14 : Conception finale de la porte logique XNOR proposée.....	63
Figure III.15 : Distribution du champ optique pour les 4 états de la porte ‘XNOR’ proposée pour :Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 0. (b) Bias =1, Input 1 = 0, Input 2 = 1. (c) Bias =1, Input 1 = 1, Input 2 = 0. (d) Bias = 1, Input 1= Input 2 = 1.	64
Figure III.16 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte ‘XNOR’ proposée pour :(a) Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 0. (b) Bias = 1, Input 1 = 0, Input 2 =1. (c) Bias = 1, Input 1 = 1, Input 2 = 0. (d) Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 1.	64
Figure IV.1 : Structure de bande fondamentale du cristal photonique en mode TE.....	72
Figure IV.2 : Structure du commutateur électro-optique proposé.....	73
Figure IV.3 : Spectre de transmission et la distribution du champ électrique de notre commutateur proposé pour : (a-c) commutateur à l'état ON, (b-d) commutateur à l'état OFF.	74
Figure IV.4 : Structure proposée pour les portes logiques NOT et BUFFER simultanément.....	75
Figure IV.5 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques NOT et BUFFER simultanément.	76
Figure IV.6 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour des portes logiques NOT et BUFFER simultanément.	76
Figure IV.7 : La structure proposée pour les portes logiques AND et NAND simultanées.....	77
Figure IV.8 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques AND et NAND simultanément.	78
Figure IV.9 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour les portes logiques AND et NAND simultanément.	78
Figure IV.10 : Structure proposée des portes logiques XNOR et XOR simultanément.....	80
Figure IV.11 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques XNOR et XOR simultanément.	80
Figure IV.12 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour les portes logiques XNOR et XOR simultanément.	81
Figure IV.13 : Structure proposée des portes logiques NOR et OR simultanément.	82

Figure IV.14 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques NOR et OR simultanément.	82
Figure IV.15 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour des portes logiques NOR et OR simultanément.	83
Figure IV.16 : Structure proposée de la porte logique AND.	84
Figure IV.17 : Distribution du champ électrique pour la porte logique AND.	85
Figure IV.18 : Puissance de sortie normalisée et le temps de réponse de la porte logique AND.	85
Figure IV.19 : (a) Structure initiale. (b) Diagramme de bande.	88
Figure IV.20 : Conception finale du commutateur tout optique proposé.	88
Figure IV.21 : Spectre de transmission normalisé.	89
Figure IV.22 : Distribution du champ magnétique d'un commutateur tout-optique à 1550 nm (a) faible puissance, (b) très forte puissance.	89
Figure IV.23 : Courbe de transmission en fonction de la puissance d'entrée.	90
Figure IV.24 : Conception finale de notre proposition de commutateur tout optique.	91
Figure IV.25 : Gamme de niveaux de la puissance logique.	91
Figure IV.26 : Distribution du champ magnétique d'une porte logique tout-optique « OR » pour différents.	92
Figure IV.27 : Courbe d'évolution du temps de la porte « NOT » proposée pour différents états.	92
Figure IV.28 : Distribution du champ magnétique d'une porte logique tout-optique « OR » pour différents états.	93
Figure IV.29 : Courbe d'évolution du temps de la porte « OR » proposée pour différents états.	94
Figure IV.30 : (a) Structure initiale proposée, (b) Diagramme bande en mode TE.	97
Figure IV.31 : Structure 'NOT' conçue.	98
Figure IV.32 : Réponse temporelle de la sortie de la porte 'NOT' proposée.	99
Figure IV.33 : Comportement optique de la porte 'NOT' : (a) : 'Bias'=1 (410 mW) et 'Input'=0 ; (b) : 'Bias'='Input'=1 (410 mW).	99
Figure IV.34 : Structure 'XOR' conçue.	100
Figure IV.35 : Réponse temporelle de sortie de la porte 'XOR' proposée.	101
Figure IV.36 : Le comportement optique de la porte 'XOR' : (a) : 'Input 1' = 'Input 2'=0 ; (b) : 'Input 1'=0, 'Input 2'=1 (410 mW) ; (c) : 'Input 1'=1 (410 mW) et 'Input 2'=0 ; (d) : 'Input 1' = 'Input 2'=1 (410 mW).	102
Figure IV.37 : Conception de la structure 'NOR'.	104
Figure IV.38 : Réponse temporelle de la sortie de la porte 'NOR' proposée.	105
Figure IV.39 : Comportement optique de la porte 'NOR' : (a): 'Bias' = 1 (610 mW) and 'Input 1' = 'Input 2' = 0; (b): 'Bias' = 1 (610 mW), 'Input 1'=0, and 'Input 2'=1 (305 mW); (c): 'Bias' = 1 (610	

mW), 'Input 1'=1 (305 mW) and 'Input2'=0; (d): 'Bias' = 1 (610 mW), 'Input 1'='Input 2'=1 (305 mW).....	105
Figure IV.40 : Structure 'XNOR' conçue.	107
Figure IV.41 : Réponse temporelle de sortie de la porte 'XNOR' proposée.....	108
Figure IV.42 : Comportement optique de la porte 'XNOR': (a): 'Bias' = 1 (470 mW) and 'Input 1'='Input 2' = 0; (b): 'Bias' = 1 (470 mW), 'Input 1'=0, and 'Input 2'=1 (470 mW); (c): 'Bias' = 1 (470 mW), 'Input 1'=1 (470 mW) and 'Input2'=0; (d): 'Bias' = 1 (470 mW), 'Input 1'='Input 2'=1 (470 mW).....	109

Liste des tableaux

Table II-1 : Fonctions de la porte logique AND. ϕ est la phase du signal sur chaque port d'entrée.	36
Table II-2 : Fonctions de la porte logique XOR, ϕ est la phase du signal sur chaque port d'entrée.....	36
Table II-3 : Table de vérité des portes logiques AND/OR proposées correspondant aux longueurs d'onde de 1,52 μm	41
Table III-1 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour la porte logique 'NOT' tout optique.	56
Table III-2 : Comparaison des résultats de la porte NOT proposée avec ceux des travaux de recherches précédents.....	57
Table III-3 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour la porte logique XOR.....	59
Table III-4 : Comparaison des résultats de la porte XOR proposée avec ceux des travaux de recherches précédents.....	61
Table III-5 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour une porte logique 'XNOR' tout optique.	65
Table III-6 : Tableau comparatif pour la porte 'XNOR'.	65
Table IV-1 : Table de vérité des portes logiques NOT et BUFFER simultanément.	76
Table IV-2 : Table de vérité des portes logiques AND et NAND simultanément.	79
Table IV-3 : Table de vérité des portes logiques XNOR et XOR simultanément.....	81
Table IV-4 : Table de vérité des portes logiques NOR et OR simultanément.	83
Table IV-5 : Table de vérité de la porte logique AND.....	86
Table IV-6 : Table de vérité des portes logiques « NOT ».....	92
Table IV-7 : Table de vérité des portes logiques « NOT ».....	94
Table IV-8 : Tableau de comparaison Porte « OR ».	95
Table IV-9 : Niveaux de puissance et table de vérité pour la porte 'NOT'.	99
Table IV-10 : Comparaison entre notre structure et les structures des travaux de recherches précédemment étudiées de la porte 'NOT'.....	100
Table IV-11 : Niveaux de puissance et table de vérité et pour les portes logiques 'XOR'.	102
Table IV-12 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte logique 'XOR'.....	103
Table IV-13 : Niveaux de puissance et table de vérité de la porte 'NOR'.	106
Table IV-14 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte 'NOR'.....	106
Table IV-15 : Niveaux de puissance et table de vérité de la porte 'XNOR'.	109

Table IV-16 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte 'XNOR'.....	110
--	-----

Introduction générale

Introduction générale

L'optique est la science de la lumière, dont l'histoire remonte à l'aube de l'humanité. Dans le monde moderne des Technologies de l'Information et des Communications (TIC), l'optique et la photonique sont utilisées dans des applications de télécommunications optiques telles que les lasers émetteurs, les supports de transmission par fibre optique et les circuits d'optique intégrée.

Dans les années passées, les coûts élevés constituaient des obstacles à l'utilisation des composants optiques dans les ordinateurs et les processeurs. Cependant, avec la modernisation de la technologie optique, les prix ont baissé et la miniaturisation requise s'est concrétisée. L'industrie informatique réévalue la situation et introduit des alternatives optiques dans les systèmes informatiques. En revanche, l'utilisation de tous les types d'interconnexions optiques dans les réseaux de communication et les ordinateurs accélèrent le progrès dans l'industrie des télécommunications.

Aujourd'hui, l'application la plus courante de la technologie optique dans les réseaux de télécommunication à fibres optiques concerne les connexions à haut débit telles que les serveurs, les connexions de terminaux, les réseaux étendus, etc.

Il est nécessaire de signaler que le contrôle de la lumière dans des milieux diélectriques était impossible et la seule façon d'utiliser les propriétés de la lumière était à l'état réfléchi sur les différents matériaux. Les cristaux photoniques sont des structures très efficaces pour fabriquer de nouveaux matériaux artificiels présentant des caractéristiques lumineuses commandées pour des fonctions bien précises.

Par exemple, s'il était impossible de produire et de contrôler les caractéristiques de dispersion positive ou négative de la lumière, c'est désormais possible grâce aux cristaux photoniques. En utilisant les cristaux photoniques, il est possible de contrôler la vitesse de la lumière, voir de l'arrêter et de la stocker, d'amplifier et de supprimer des modes lumineux particuliers, etc. Cette nouvelle structure peut être utilisée dans différents domaines comme les diodes électroluminescentes, les lasers, les équipements électro-optiques, les composants tout-optiques, les différents types de capteurs (biomédicaux, chimiques, mécaniques et physiques), le traitement des signaux lumineux et les dispositifs d'optiques intégrées.

Les cristaux photoniques peuvent être utilisés dans des dispositifs photoniques pour différentes applications telles que le contrôle, la production, l'amplification, la conduite, la

combinaison, la séparation, la mesure et la détection de la lumière à des échelles micro et nanométriques. Pour chaque application, la structure doit être conçue. Pour fabriquer ces structures pour la nano-optique dans le domaine de la photonique. Ces techniques sont celles utilisées dans le processus d'une intégration à très grande échelle en microélectronique.

La question principale est de chercher le design adéquat de la porte logique optique à concevoir. Celle-ci est basée sur les structures à base de cristaux photoniques. L'étude qui sera envisagée dans cette thèse comportera une partie théorique et une partie conception. En premier lieu, une recherche bibliographique permettant la compréhension des phénomènes optiques présents dans les structures linéaires et non linéaires.

La thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le chapitre I est une introduction aux concepts de base de l'optique. Nous illustrons les propriétés des matériaux linéaires et non-linéaires, nous introduisons la relation entre la polarisation du milieu et le champ électrique auquel il est soumis, faisant intervenir la notion de susceptibilité optique linéaire et non-linéaire. Nous nous intéresserons, plus particulièrement, au processus linéaire, et non-linéaire du second ordre (Effet pockel) et non-linéaire du troisième ordre (Effet Kerr).

Dans le chapitre II, nous exposons l'histoire des cristaux photoniques, leurs différents types, les diagrammes de bande et les types de défauts dans les cristaux photoniques. Les méthodes de calculs, utilisées par le logiciel, à savoir la méthode des ondes planes (PWE) et la méthode FDTD seront présentées. À la fin de ce chapitre, nous présenterons quelques travaux de recherches [1-9] effectués sur les portes logiques optiques à base des cristaux photoniques.

Dans le troisième et le quatrième chapitre, présentent la conception de nos portes logiques optiques, grâce au logiciel de simulation RSoft CAD [10] et ses outils « FullWAVE » et « BandSOLVE » acheté par notre laboratoire de recherche TTNS et qui s'avère être un simulateur approprié pour nos calculs. Cette conception nécessite l'utilisation des éléments de base tels que : micro guide, résonateur en anneau, cavité résonnante, en présence d'un milieu linéaire, et non-linéaire du second et troisième ordre, respectivement.

Références

- [1] Ishizaka, Y., Kawaguchi, Y., Saitoh, K., & Koshihara, M. (2011). Design of ultra compact all-optical XOR and AND logic gates with low power consumption. *Optics Communications*, 284(14), 3528-3533.
- [2] Liu, W., Yang, D., Shen, G., Tian, H., & Ji, Y. (2013). Design of ultra-compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides. *Optics & Laser Technology*, 50, 55-64.
- [3] Rangaswamy, N. (2017). Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio. *Photonic Network Communications*, 34(1), 140-148.
- [4] D'souza, N. M., & Mathew, V. (2016). Interference based square lattice photonic crystal logic gates working with different wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 80, 214-219.
- [5] Pashamehr, A., Zavvari, M., & Alipour-Banaei, H. (2016). All-optical AND/OR/NOT logic gates based on photonic crystal ring resonators. *Frontiers of Optoelectronics*, 9(4), 578-584.
- [6] Mostafa, T. S., Mohammed, N. A., & El-Rabaie, E. S. M. (2019). Ultra-high bit rate all-optical AND/OR logic gates based on photonic crystal with multi-wavelength simultaneous operation. *Journal of Modern Optics*, 66(9), 1005-1016.
- [7] Alipour-Banaei, H., Serajmohammadi, S., & Mehdizadeh, F. (2017). All optical NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Optik*, 130, 1214-1221.
- [8] Serajmohammadi, S., & Absalan, H. (2016). All optical NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonator. *Information processing in Agriculture*, 3(2), 119-123.
- [9] Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, B. (2007). Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals. *Optics Express*, 15(15), 9287-9292.
- [10] In this paper, fullwave commercial software developed by Rsoft design group (<http://www.rsoftdesign.com>) is used for linear and nonlinear FDTD simulations, v. 2014, 09, license-16849450.

Chapitre I

L'évolution de l'optique linéaire à
l'optique non-linéaire

I. Chapitre : L'évolution de l'optique linéaire à l'optique non-linéaire

I.1 Introduction

L'optique, est une branche de l'électromagnétisme ou physique qui consiste en la réponse d'un matériau en fonction de l'intensité de la lumière au quelle il est susceptible. En général, le domaine de l'optique linéaire joue un rôle très important pour déterminer et évaluer les caractéristiques et les performances des systèmes optiques non-linéaires. Parmi les propriétés linéaires qui ont une forte influence sur le comportement non linéaire il s'agit de la focalisation, la dispersion du matériau et la biréfringence. L'objet de ce chapitre est de comprendre les principes de base de chacune de ces propriétés, les points communs et les points distincts entre les systèmes utilisant l'optique linéaire et ceux qui utilisent l'optique non linéaire. [1].

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les principes de base de chacune de ces propriétés, les points communs et les points distincts entre les systèmes utilisant l'optique linéaire et ceux qui utilisent l'optique non linéaire

I.2 Concepts de base de l'optique linéaire

Dans un système basé sur l'optique linéaire, les différents faisceaux lumineux ne s'échangent pas entre eux si les entrées optiques sont indépendantes contrairement aux systèmes optiques non linéaires. La polarisation du milieu optique considéré comme le véhicule de cet échange et toutes les interactions décrites qui distingue les deux systèmes optiques linéaires et non linéaires. Cet échange, qui est gouverné par l'électromagnétisme dans les milieux matériels, est décrit par les équations de maxwell ((I.1), (I.2), (I.3) et (I.4)) pour les champs macroscopiques en précisant le vecteur de déplacement électrique $\vec{D}$ qui va nous intéresser pour la caractérisation de leur réponse [1-3] :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (I.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (I.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (I.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (I.4)$$

$\vec{E}(\vec{r}, t)$ Champ électrique (Volt/m) au point $\vec{r}$ à l'instant t

$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t)$ Déplacement électrique (Coulomb/m²)

$\vec{P}(\vec{r}, t)$ Polarisation induite

$\vec{H}(\vec{r}, t)$ Champ magnétique (Ampère/m)

$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t)$ Induction magnétique (Webber/m²)

ϵ_0 : La permittivité dans l'espace libre (8.854×10^{-12} Farad/m).

μ_0 : la perméabilité magnétique du vide

Pour calculer la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu matériel en optique linéaire, on aura, évidemment, besoin de résoudre les équations de Maxwell et de déterminer l'expression de la polarisation induite $\vec{P}(\vec{r}, t)$. Cette réponse linéaire consiste à supposer que la polarisation induite est déterminée par une relation simplement proportionnelle au champ électrique avec une constante de proportionnalité qu'on appelle la susceptibilité du matériau (χ) selon l'équation (I.5) [1,2] :

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \chi \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (\text{I.5})$$

χ : La susceptibilité du matériau (Sans dimension).

I.2.1 Modèle simplifié de la susceptibilité linéaire pour un milieu diélectrique

L'expression de la susceptibilité est déterminée en considérant que le système est un ensemble de molécules diatomiques qui sont arrangées de manière régulière comme dans un cristal ; chacune de ces molécules est indépendante et va pouvoir vibrer. On suppose que l'une de ces molécules diatomiques (oscillateurs) possède une charge partielle positive $+\delta q$ (en vert) et l'atome a une charge négative $-\delta q$ (en rouge), ℓ est la longueur d'équilibre de la liaison moléculaire (figure (I.1)) [2].

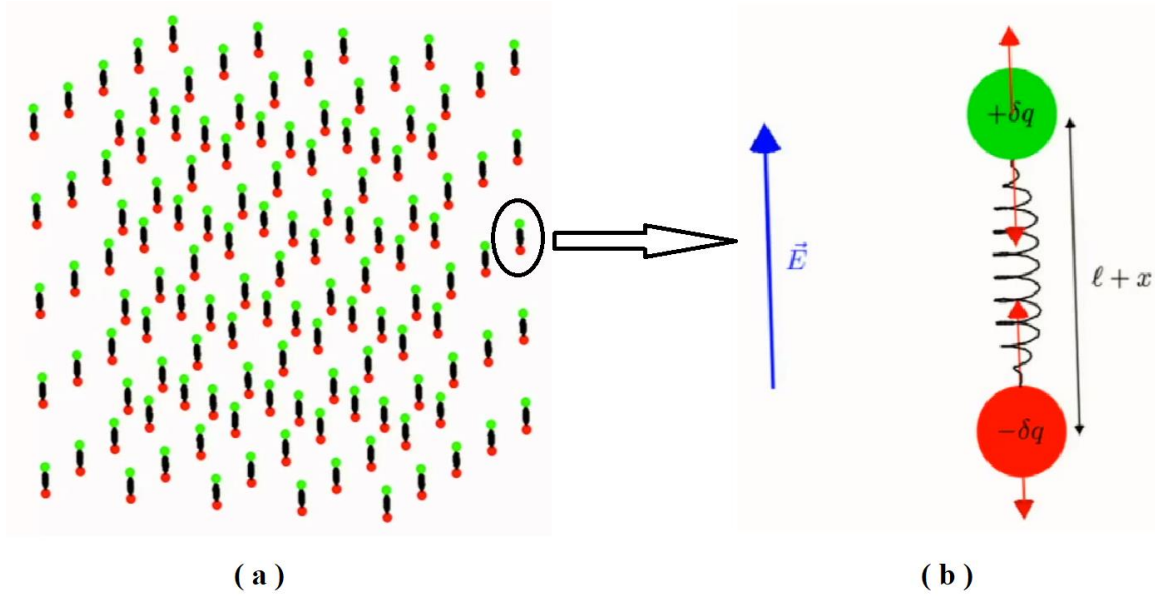


Figure I.1 : Représentation schématique du mouvement des particules chargées dans un milieu diélectrique soumis à un champ électrique oscillant de fréquence optique. (a) Cristal constitué d'atomes (N oscillateurs par unité de volume). (b) Un oscillateur soumis à un champ $\vec{E}$. [2]

Si on applique un champ $\vec{E}$ au système d'un milieu diélectrique de la figure (I.1), dans ce cas, le dipôle induit à l'équation (I.6) :

$$\delta qx = \delta q \frac{(x)}{2} - \delta q \frac{(-x)}{2} \quad (I.6)$$

x : Allongement de la liaison moléculaire (les deux atomes se déplaceront de $\frac{\delta qx}{2}$).

Donc, la polarisation P qui est représentée par la densité volumique du dipôle va simplement s'écrire selon l'équation (I.7) :

$$P = N \delta qx \quad (I.7)$$

L'équilibre des forces permet d'écrire l'équation (I.8)

$$\delta qE - kx = 0 \quad (I.8)$$

Où k est la raideur du ressort

La valeur de x en fonction de E est donnée par l'équation (I.9)

$$x = \frac{\delta qE}{k} \quad (I.9)$$

On substitue l'expression (I.9) dans (I.7), on obtient l'équation (I.10) :

$$P = N \delta qx = N \frac{\delta q^2}{k} E \quad (I.10)$$

Finalement, la polarisation P est proportionnelle au champ électrique E avec un coefficient de proportionnalité donné par l'équation (I.11) :

$$\chi = N \frac{\delta q^2}{k \epsilon_0} E \quad (\text{I. 11})$$

I.2.2 Modèle physique de l'indice de réfraction et l'absorption pour l'optique linéaire

En général, l'indice de réfraction joue un rôle très important dans la théorie du système optique. En effet, la variation de l'indice de réfraction réel en fonction de la fréquence optique est appelée « dispersion » et la variation de l'indice de réfraction complexe en fonction de la fréquence optique est appelée « absorption ». Pour une onde plane monochromatique qui se propage dans un milieu diélectrique [2] :

$$\mathcal{E}(z, t) = \mathcal{E} \exp(i(kz - \omega t)) \quad (\text{I. 12})$$

$$k = \tilde{n} \frac{\omega}{c} \text{ Avec } \tilde{n} = \sqrt{1 + \chi} = n' + jn''$$

k : vecteur d'onde

n' : Partie réelle de l'indice

n'' : Partie imaginaire de l'indice

$$\mathcal{E}(z, t) = \mathcal{E} \exp\left(i\left(n' \frac{\omega}{c} z - \omega t\right)\right) \exp\left(-n'' \frac{\omega}{c} z\right) \quad (\text{I. 13})$$

La partie réelle n' correspond à la variation de la phase de l'onde plane chromatique qui nous permet tout simplement de définir l'indice de réfraction $n(\omega)$ selon l'équation (I.14) :

$$n(\omega) = \text{Re} \sqrt{1 + \chi(\omega)} \quad (\text{I. 14})$$

Pour la partie imaginaire n'' , on considère que l'équation (I.15) :

$$|\mathcal{E}(z, t)|^2 = |\mathcal{E}|^2 \exp(-2n'' \frac{\omega}{c} z) = |\mathcal{E}|^2 \exp(-\alpha z) \quad (\text{I. 15})$$

À partir de l'équation (I.15), le coefficient d'absorption dans le milieu est défini selon l'équation (I.16) :

$$\alpha(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{1 + \chi(\omega)} \quad (\text{I. 16})$$

Donc, la partie imaginaire de la polarisation de ce modèle physique est responsable de l'atténuation du faisceau transmis qui se traduit par une décroissance exponentielle de

l'amplitude de l'onde décrite par l'équation (I.15). Par contre, la partie réelle de la polarisation est responsable du déphasage décrit par l'équation (I.14) [1,2].

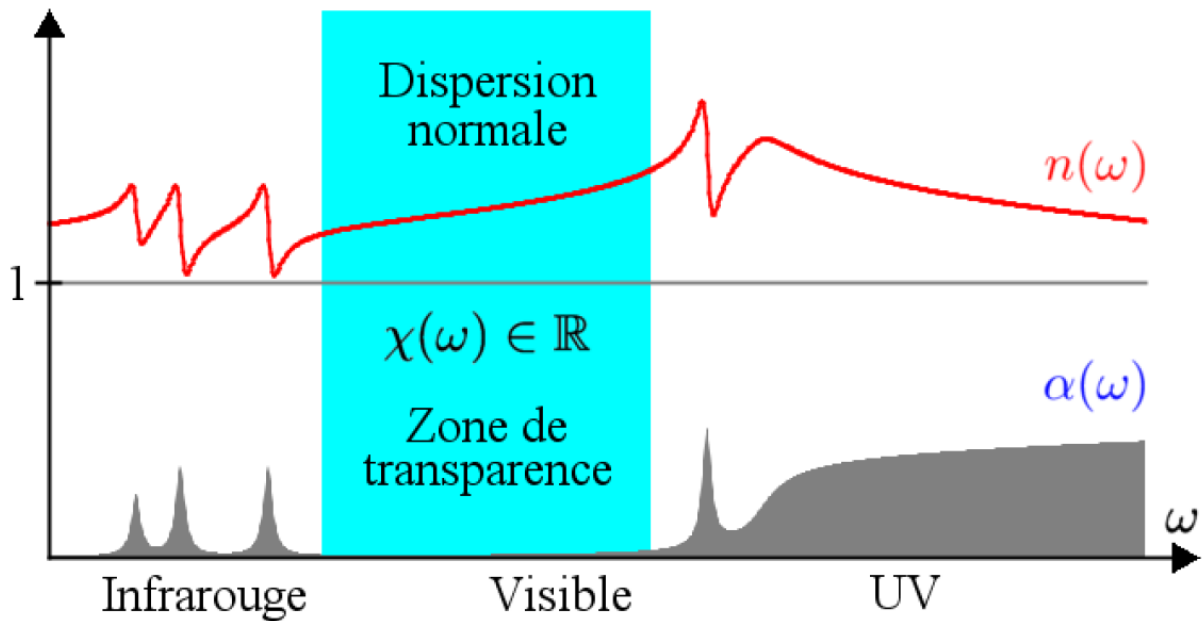


Figure I.2 : Illustration de la dispersion et de l'absorption de l'indice de réfraction. Les deux caractéristiques résonantes montrent des régions de dispersion anormale, ces régions sont accompagnées de fortes pertes [2].

Pour décrire un modèle satisfaisant de la réponse linéaire de ce système, nous allons nous intéresser à une zone du spectre, de la figure (I.2), dans laquelle le milieu considéré est transparent c'est-à-dire entre l'infrarouge et le visible. Dans ce milieu, l'absorption $\alpha(\omega)$ va être quasiment nulle en raison de l'absence de transition vibrationnelle et de transition électronique entre les niveaux d'énergies de cette zone, et l'indice de réfraction $n(\omega)$ est une fonction croissante en fonction de la fréquence où la susceptibilité $\chi(\omega)$ est une fonction réelle et suffisamment faible [2].

I.2.3 La polarisation linéaire

Le régime d'optique linéaire suppose que la polarisation P change linéairement avec le champ électrique E , selon l'équation (I.5). Ce régime est valable pour de faibles valeurs du champ électrique comme le montre la figure (I. 3) [2].

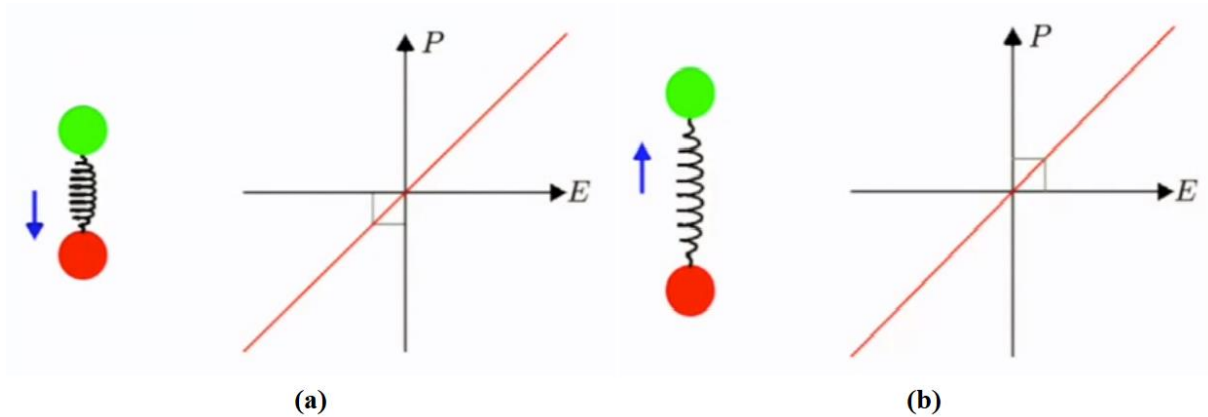


Figure I.3 : La polarisation en fonction de champ E en régime linéaire (faible régime). Oscillateur harmonique (a) amorti, (b) forcé [2].

Lorsqu'on applique des champs électriques très intenses, la polarisation en fonction du champ électrique va être représentée par une courbe non-linéaire comme le montre la figure (I. 4) [2].

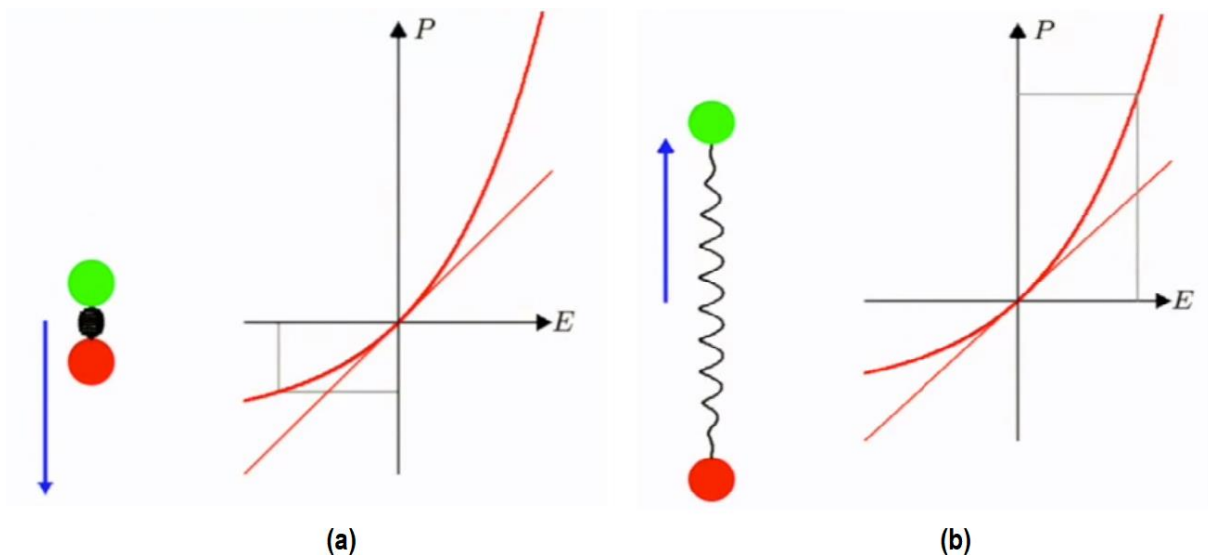


Figure I.4 : La polarisation en fonction de champ E en régime non-linéaire. Oscillateur anharmonique (a) amorti, (b) forcé [2].

En résumé, on peut dire que le régime de l'optique linéaire avec un modèle très simplifié de réponse de la matière permet de rendre compte de l'absorption de la matière, la dispersion normale dans une zone de transparence qui est représenté l'augmentation de l'indice de réfraction en fonction de la fréquence, cette représentation explique les différents composantes spectrales sont dispersées du 400 nm (bleu) jusqu'au 800 nm (rouge) en excitant un prisme par un faisceau blanc comme illustre la figure 4 [2].

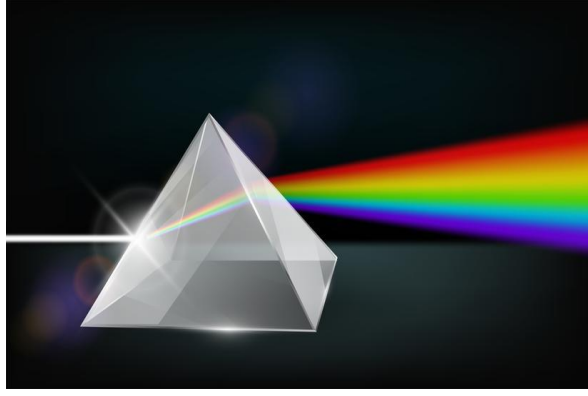


Figure I.5 : Dispersion d'un faisceau blanc par un prisme [2].

I.3 Différents processus non-linéaires du deuxième ordre

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la polarisation induite P dans un matériau excité par un champ lumineux est essentielle pour comprendre et décrire les propriétés optiques linéaires. Ceci s'applique aussi en optique non-linéaire.

Dans cette section, nous allons présenter le doublage de fréquence (génération de second harmonique) qui représente le premier effet optique non-linéaire ayant été observé seulement un an après l'invention du laser [4]. Le terme non-linéaire d'ordre deux, qui résulte de la polarisation est proportionnel au carré du champ électrique selon l'équation (I.17) :

$$P^{(2)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} E(t)^2 \quad (I.17)$$

Cette polarisation est spécifique que pour les matériaux possédant un tenseur de susceptibilité d'ordre deux $\chi^{(2)} \neq 0$, c'est-à-dire des milieux qui sont non centrosymétriques (des milieux qui ne possèdent pas de centre d'inversion). Pour illustrer ces différents effets, on va supposer que le champ d'entrée global, dans notre matériau, est une superposition de deux ondes planes monochromatiques de fréquence (ω_1, ω_2) selon l'équation (I.18) [2] :

$$E(t) = \frac{\epsilon_1 e^{-i\omega_1 t} + \epsilon_1^* e^{i\omega_1 t}}{2} + \frac{\epsilon_2 e^{-i\omega_2 t} + \epsilon_2^* e^{i\omega_2 t}}{2} \quad (I.18)$$

L'équation (I.17) est réécrite en termes de processus de mélange de deux champs monochromatiques :

$$P^{(2)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} \left[\begin{array}{lll} \frac{\epsilon_1^2}{4} e^{-i2\omega_1 t} & \text{Doublage de fréquences} & SHG \\ \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{2} e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} & \text{Addition de fréquences} & SFG \\ \frac{\epsilon_1 \epsilon_2^*}{2} e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} & \text{Différences de fréquences} & DFG \end{array} \right] \quad (I.19)$$

Donc,

- Doublage de fréquences : $\omega_1 + \omega_2 \rightarrow 2\omega$
- Effet électro-optique : $\omega + 0 \rightarrow \omega$
- Redressement optique : $\omega - \omega \rightarrow 0$
- Addition de fréquences : $\omega_1 + \omega_2 \rightarrow \omega = \omega_1 + \omega_2$
- Différences de fréquences : $\omega_1 - |\omega_2| \rightarrow \omega = \omega_1 - |\omega_2|$

Finalement, on peut collecter tous les processus non-linéaires du second ordre dans un seul axe comme le montre sur la figure I.6 :

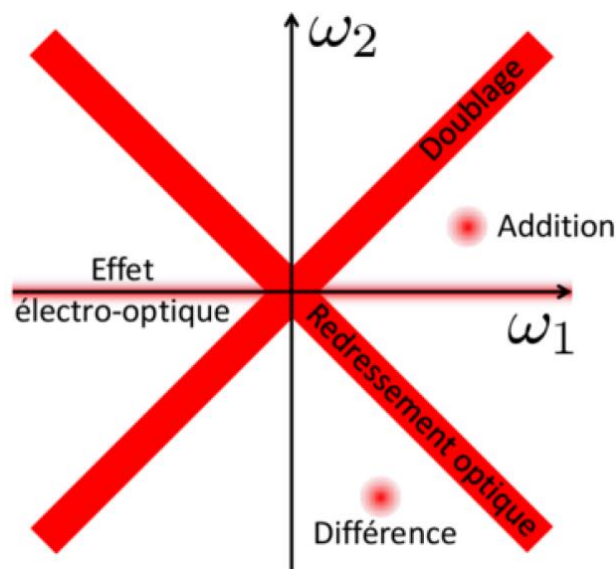


Figure I.6 : Représentation des différents processus non-linéaires du second ordre en fonction de (ω_1, ω_2) [2].

I.3.1 Doublage de fréquence (Génération de seconde harmonique)

La figure I.7 illustre expérimentalement le phénomène de génération de seconde harmonique (SHG). En effet, un laser est dirigé vers un cristal de quartz (milieu non centrosymétrique), en sortie du cristal on observe la superposition de deux faisceaux. Un faisceau fondamental (rouge) et un autre faisceau de faible intensité (bleu) caractérisé par une fréquence double (demi- longueur d'onde). Pour séparer les deux faisceaux en cause, Franken [4] a utilisé un prisme qui permet de dissocier les deux composantes sur une plaque photographique afin d'enregistrer l'image produite (figure (I.8)).

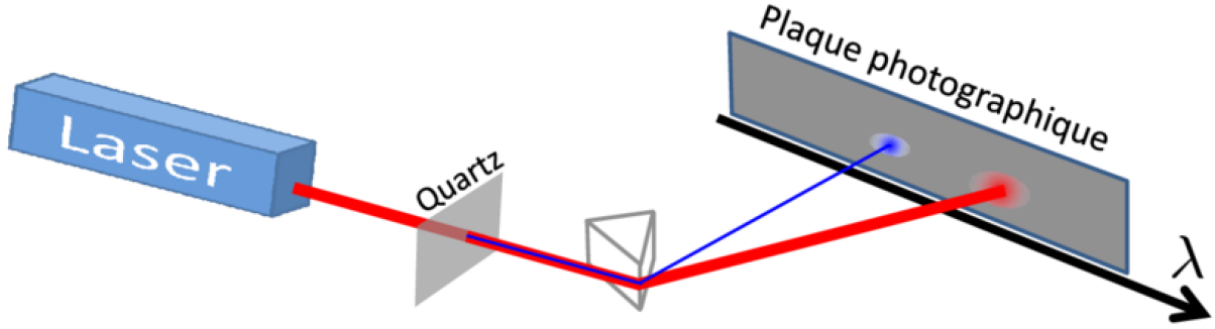


Figure I.7 : Phénomène de doublage de fréquence [4].

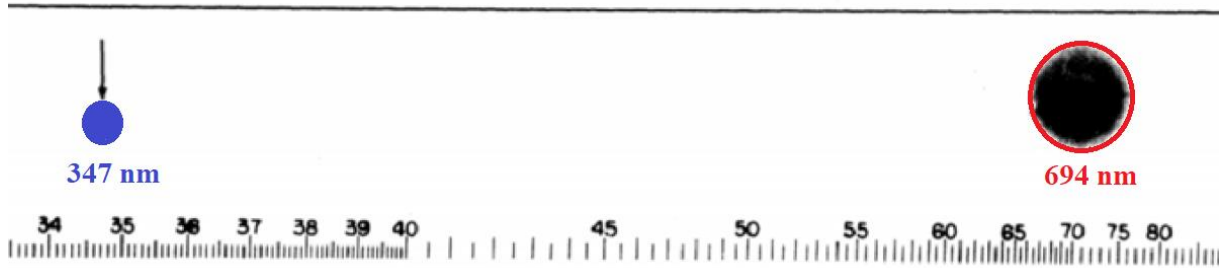


Figure I.8 : une plaque photographique pour l'observation (Figure I.7) [4]

I.3.2 Equation de propagation dans un régime de faible conversion

Pour décrire la théorie du phénomène de génération de seconde harmonique (figure I.9) [2], on va supposer que le faisceau fondamental incident dans le matériau s'écrit selon l'équation (I.20) :

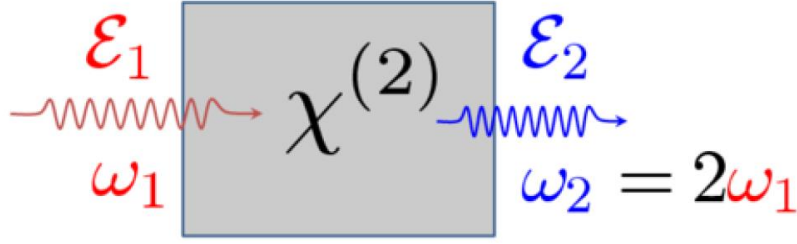
$$\mathcal{E}_1(\mathbf{z}) = \mathcal{A}_1(\mathbf{z})e^{ik_1z} \quad (\text{I.20})$$

$\mathcal{A}_1(\mathbf{z})$: l'enveloppe du signal optique.

e^{ik_1z} : la porteuse du signal.

Le faisceau incident va induire une polarisation $P^{(2)}(t)$ qui va rayonner un faisceau $\mathcal{E}_2(\mathbf{z})$ à une fréquence double ω_2 avec un vecteur d'onde k_2 correspondant à l'indice de réfraction n_2 à la fréquence ω_2 (l'équation (I.21)) :

$$\mathcal{E}_2(\mathbf{z}) = \mathcal{A}_2(\mathbf{z})e^{ik_2z} \quad (\text{I.21})$$



$$\mathcal{E}_1(z) = \mathcal{A}_1(z)e^{ik_1z} \quad \mathcal{E}_2(z) = \mathcal{A}_2(z)e^{ik_2z}$$

Figure I.9 : Phénomène de génération de seconde harmonique. [2]

Donc, si on se place dans un régime de faible conversion, on prend $|\mathcal{A}_2| \ll |\mathcal{A}_1|$, on trouve alors l'équation (I.22) que :

$$P^{(2)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} \left(\frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_1^*}{2} \right)^2 = \frac{\epsilon_0 \chi^{(2)}}{4} \left(\underbrace{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_1^{*2}}_{SHG} + \underbrace{2\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_1^*}_{\text{Redressment optique}} \right) = \frac{\mathcal{P}^{(2)} + \mathcal{P}^{(2)*}}{2} \quad (I.22)$$

Nous nous intéresserons uniquement au terme qui correspond au processus de génération de seconde harmonique (SHG). On sait que la polarisation non-linéaire de second ordre, est une polarisation réelle, en utilisant le terme complexe $\mathcal{E}_1$ correspondant à des fréquences positives, on peut écrire la polarisation selon l'équation (I.23) :

$$\mathcal{P}^{(2)} = \frac{\epsilon_0 \chi^{(2)}}{2} \mathcal{E}_1^2 \quad (I.23)$$

L'équation de propagation qu'on établit dans le cas d'une onde plane monochromatique :

$$\frac{d\mathcal{A}_2}{dz} = \frac{i\omega_2 \chi^{(2)}(z)}{2n_2 \epsilon_0 c} \exp(-ik_2 z) \quad (I.24)$$

On remplace les équation (I.19) et (I.23) dans l'équation (I.24) on trouve l'équation (I.25) :

$$\frac{d\mathcal{A}_2}{dz} = \frac{i\omega_2 \chi^{(2)}}{4n_2 c} \mathcal{A}_1^2 \exp(-i(k_2 - 2k_1)z) \quad (I.25)$$

On a aussi :

$$k_2 = n_2 \frac{\omega_2}{c} \text{ et } k_1 = n_1 \frac{\omega_1}{c} \rightarrow 2k_1 = n_2 \frac{2\omega_1}{c}, \text{ avec } \omega_2 = 2\omega_1 \quad (I.26)$$

Enfin :

$$\Delta k = (n_2 - n_1) \frac{\omega_2}{c} \quad (\text{I.27})$$

Donc, l'équation de propagation dans un régime de faible conversion est donnée par l'équation (I.28) :

$$\frac{d\mathcal{A}_2}{dz} = \frac{i\omega_2\chi^{(2)}}{4n_2c} \mathcal{A}_1^2 \exp(-i\Delta kz) \quad (\text{I.28})$$

I.3.3 Accord de phase ($\Delta k = 0$)

Pour réaliser l'accord de phase, on va supposer que [2] :

$$(n_1 = n_2) \rightarrow \Delta k = k_2 - 2k_1 = 0 \quad (\text{I.29})$$

On trouve que :

$$\mathcal{A}_2(z) = \frac{i\omega_2\chi^{(2)}}{4n_2c} \mathcal{A}_1^2 z \quad (\text{I.30})$$



Figure I.10 : La densité de puissance produite varie comme le carré de la densité de la puissance incidente, la puissance produite varie comme le carré de l'épaisseur du cristal (z) [2].

Dans ce cas, on conclut que la génération de seconde harmonique est un effet non-linéaire. Car, la puissance produite $|\mathcal{A}_2(z)|^2$ est proportionnelle à la puissance quatre du champ incident $\mathcal{A}_1^4$. Par ailleurs, le phénomène SHG est un processus cohérent vu que, $\mathcal{A}_2(z)$ varie linéairement en fonction de z ce qui signifie que la puissance produite varie en fonction du carré de l'épaisseur du cristal.

I.3.4 Autre processus non-linéaire du 2eme ordre : Effet électro-optique (Effet pockels)

L'effet électro-optique linéaire, également connu sous le nom de l'effet Pockels (figure I.11), utilise une terminologie et un formalisme différent. Cet effet est le mélange d'un champ statique (ou à variation lente) avec un champ optique, entraînant un changement de l'indice de réfraction du matériau proportionnellement au champ électrique appliqué. L'indice de réfraction

est lié à ϵ_{ij} , il est donc naturel d'étudier les perturbations de ϵ_{ij} dues à un champ statique appliqué. Cette étude entre dans le cadre de l'interaction de deux ondes ω_1 et ω_2 avec $\omega_2 = 0$, car on utilise un champ électrique statique [1,2,5-9] :

$$P^{(2)}(\omega) = \epsilon_0 \chi^{(2)}(\omega_1) E(\omega_1) E(0) \quad (I.31)$$

$$D(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega_1) E(\omega_1) + \epsilon_0 \chi^{(2)}(\omega_1) E(\omega_1) E(0) \quad (I.32)$$

$$D(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r^{total}(\omega_1) E(\omega_1) \quad (I.33)$$

$$\text{Avec : } \epsilon_r^{total} = \epsilon_r(\omega_1) + \chi^{(2)} E(\omega_1) E(0) \quad (I.34)$$

$$\epsilon_r^{total} = \epsilon_r(\omega_1) + \Delta\epsilon_r \text{ Avec } \Delta\epsilon_r = \chi^{(2)} E(\omega_1) * E(0) \quad (I.35)$$

Donc, il y a variation de la permittivité ϵ_r due au champ statique qui entraîne la variation de l'indice de réfraction ($\epsilon_r = n^2$) : D'où une modification de l'ellipsoïde des indices dont on détermine la nouvelle équation (I.36) où "r" est le tenseur électro-optique :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = r E(0) \quad (I.36)$$

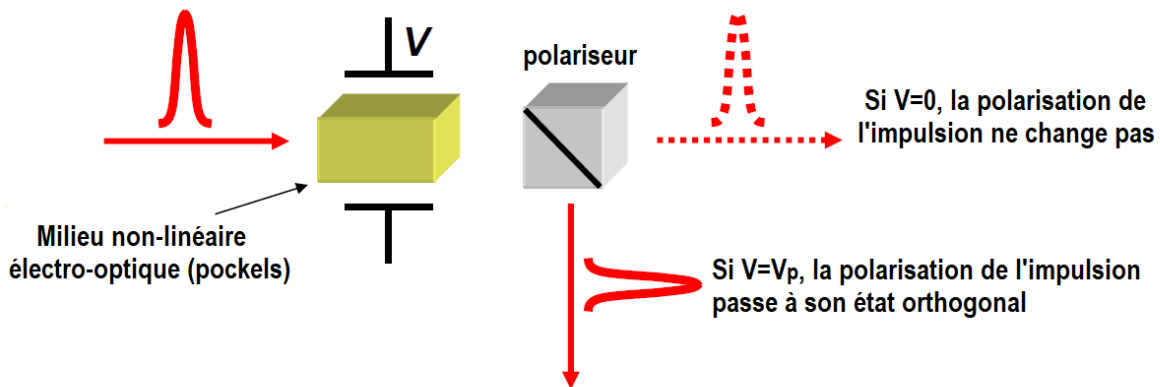


Figure I.11 : L'effet Pockels peut être décrit comme un $\chi^{(2)}$ une interaction optique non-linéaire avec $E^2 \rightarrow E(\omega)E(\omega = 0)$. La somme de fréquence $\omega + 0 = \omega$ (mais le champ E n'est pas nul !)

I.4 Processus non-linéaire du troisième ordre (Effet Kerr optique)

Cette partie étend nos études sur les effets optiques ayant des susceptibilités du troisième ordre $\chi^{(3)}$. L'occurrence des processus $\chi^{(3)}$ est beaucoup moins restrictive que pour les processus $\chi^{(2)}$ abordés dans la partie précédente (I.3), et aussi apparaissent à un certain degré dans tous les matériaux. L'extension des processus $\chi^{(2)}$ aux processus paramétriques d'ordre supérieur est simple. Nous considérons le cas où la polarisation non linéaire est séparable [1,2,10] :

$$P^{(3)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} E(t)^3 \quad (I.37)$$

$$\text{Avec : } E(t) = \frac{\mathcal{E}(t) + \mathcal{E}^*(t)}{2} \quad (I.38)$$

$$P^{(3)}(t) = \frac{\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{8} (\mathcal{E}(t) + \mathcal{E}^*(t))(\mathcal{E}(t) + \mathcal{E}^*(t))(\mathcal{E}(t) + \mathcal{E}^*(t)) \quad (I.39)$$

$$\frac{\mathcal{P}(t) + \mathcal{P}^*(t)}{2} = \frac{\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{8} \left(\underbrace{\mathcal{E}(t)^3 + \mathcal{E}^*(t)^3}_{THG(3\omega)} + 3\mathcal{E}^*(t)\mathcal{E}(t)^2 + 3\mathcal{E}(t)\mathcal{E}^*(t)^2 \right) \quad (I.40)$$

Par identification on trouve l'équation (41) :

$$\mathcal{P}(t) = \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \mathcal{E}^*(t)\mathcal{E}(t)^2 = \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} |\mathcal{E}(t)|^2 \mathcal{E}(t) \quad (I.41)$$

En particulier, si on pose : $\mathcal{E}(t) = |\mathcal{E}(t)|e^{-i\varphi t}$, on aura l'équation (I.42) :

$$\mathcal{P}(t) = \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} |\mathcal{E}(t)|^2 |\mathcal{E}(t)| e^{-i\varphi t} \quad (I.42)$$

Les trois principales raisons pour lesquelles on utilise les effets d'ordre trois sont comme suit :

- Les effets non-linéaires d'ordre 3 correspondent au premier effet non-linéaire se manifestant dans tous les matériaux centrosymétriques ou non.
- Le terme de la polarisation pour l'effet non-linéaire d'ordre 3 $|\mathcal{E}(t)|^2 \mathcal{E}(t)$ qui est présente exactement la même phase que la polarisation linéaire, vérifient toujours la condition d'accord de phase (la même phase pour la polarisation non-linéaire d'ordre $3\mathcal{P}^{(3)}(t)$ et pour le champ incident) ce qui permet de s'accumuler de l'effet non-linéaire dans la conception de systèmes de télécommunications à grande distance par fibre optique transatlantique.
- Les effets non-linéaires d'ordre 3 affectent la propagation du faisceau fondamental (le champ rayonne à la même fréquence que le champ incident).

I.4.1 Equation de propagation non-linéaire

On considère la propagation du faisceau lumineux sous l'action d'une réponse non-linéaire d'ordre trois : On pose :

$$\mathcal{E}(\vec{r}, t) = \mathcal{A}(\vec{r}, t - k'_0 z) e^{i(k_0 z - \omega_0 t)} \quad (I.43)$$

et

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} |\mathcal{E}(\vec{r}, t)|^2 \mathcal{E}(\vec{r}, t) \quad (I.44)$$

$$\frac{\partial \mathcal{A}}{\partial z} = \underbrace{\left(-i \frac{k_0''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{k_0'''}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} + \frac{i}{2k_0} \right)}_{\hat{D}} \mathcal{A}(\vec{r}, t) + \underbrace{\frac{i\omega_0}{2\varepsilon_0 n_0 c} \mathcal{P}(\vec{r}, t + k_0' z) e^{i(\omega_0 t + \omega_0 k_0' z - k_0 z)}}_{\hat{N}} \quad (I.45)$$

$\hat{D}$: le terme qui représente la dispersion de l'impulsion $\left(-i \frac{k_0''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{k_0'''}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \right)$ et la diffraction du faisceau lumineux $\left(\frac{i}{2k_0} \right)$.

$\hat{N}$: Opérateur non-linéaire agissant sur $\mathcal{A}$

On remplace l'équation (I.43) dans l'équation (I.44) de la polarisation non-linéaire $\mathcal{P}(\vec{r}, t)$ on trouve que :

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \frac{3\varepsilon_0 \chi^{(3)}}{4} |\mathcal{A}(\vec{r}, t - k_0' z)|^2 \mathcal{A}(\vec{r}, t - k_0' z) e^{i(k_0 z - \omega_0 t)} \quad (I.46)$$

$$\hat{N} = i \frac{3\omega_0 \chi^{(3)}}{8n_0 c} |\mathcal{A}(\vec{r}, t)|^2 \mathcal{A}(\vec{r}, t) = i\gamma |\mathcal{A}(\vec{r}, t)|^2 \mathcal{A}(\vec{r}, t) \quad (I.47)$$

L'équation d'évolution de l'enveloppe sera :

$$\frac{\partial \mathcal{A}}{\partial z} = \hat{N} \mathcal{A}(\vec{r}, t) = i\gamma |\mathcal{A}(\vec{r}, t)|^2 \mathcal{A}(\vec{r}, t), \text{ avec } \gamma = \frac{3\omega_0 \chi^{(3)}}{8n_0 c} \quad (I.48)$$

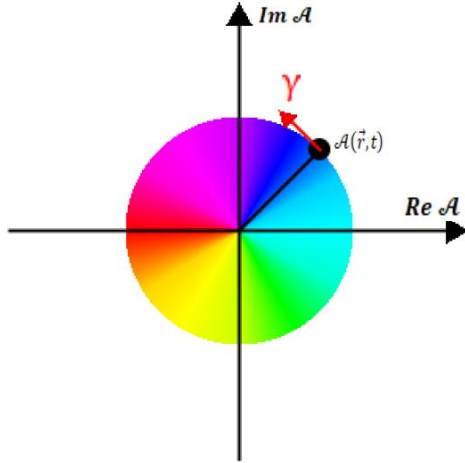


Figure I.12 : Déplacement de l'enveloppe $\mathcal{A}(\vec{r}, t)$ dans le plan complexe [2].

Pour comprendre la résolution de la contribution non-linéaire $\hat{N}$, on suppose que le faisceau transmis par un milieu non-linéaire est atténué par rapport au faisceau incident en raison d'un processus non-linéaire d'ordre trois. Dans ce cas, on peut conclure que la susceptibilité non-linéaire $\chi^{(3)}$ doit comporter une partie imaginaire positive (figure I.12).

En présence de l'effet Kerr, on s'intéresse à une situation où la susceptibilité $\chi^{(3)}$ est supposée réelle :

$$\chi^{(3)} \in \Re \rightarrow |\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}|^2_{z=0} \quad (\text{I.49})$$

Finalement, on peut écrire la solution de l'équation différentielle non-linéaire du premier ordre à coefficient constant :

$$\mathcal{A}(\vec{r}, t) = \exp(i\gamma |\mathcal{A}|^2_{z=0} z) \mathcal{A}(x, y, 0, t) \quad (\text{I.50})$$

I.4.2 L'indice non-linéaire n_2

Pour l'effet non linéaire, l'indice de réfraction peut s'écrire de la manière suivante :

$$\mathcal{A}(z, t) = \hat{U}_N(0, t) = \exp(i\gamma |\mathcal{A}(0, t)|^2 z) \mathcal{A}(0, t) \quad (\text{I.51})$$

$\hat{U}_N(z, 0)$: Opérateur qui correspond à la propagation entre l'origine 0 et le point de coordonnée z selon l'axe z , agissant sur $\mathcal{A}(0, t)$.

$$\mathcal{E}(z, t) = \mathcal{A}(z, t - k'_0 z) e^{i(k_0 z - \omega_0 t)} = \mathcal{A}(z, t - k'_0 z) \exp\left(i\left(\frac{k_0}{n_0 \frac{\omega_0}{c}} + \frac{\gamma |\mathcal{E}(z, t)|^2}{n_2 I \frac{\omega_0}{c}}\right) z - \omega_0 t\right) \quad (\text{I.52})$$

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad (\text{I.53})$$

L'indice non-linéaire n_2 est exprimé en m^2/W , et l'intensité 'I' en W/m^2 .

Donc, finalement on remarque que l'indice non-linéaire n_2 est proportionnel à γ qui est lui-même proportionnel à $\chi^{(3)}$. On conclut, qu'en présence de l'effet Kerr, il y a une dépendance de l'indice de réfraction non-linéaire n_2 avec l'intensité I .

I.4.3 Auto focalisation et lentille de Kerr

On considère un faisceau lumineux qui se propage à travers un milieu non-linéaire présentant un effet Kerr optique d'épaisseur "L" comme le montre la figure (13).

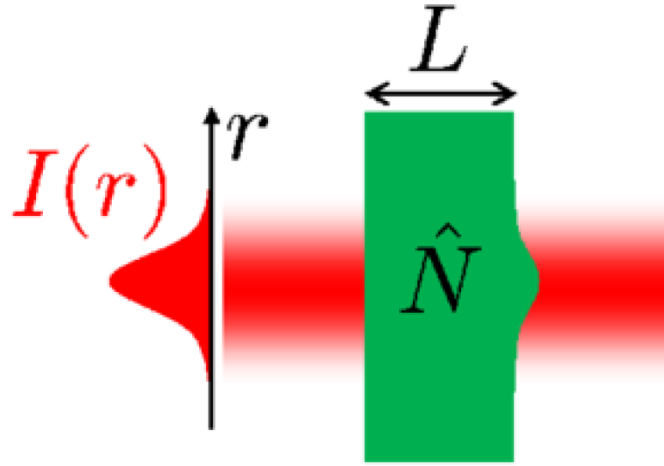


Figure I.13 : Un matériau non-linéaire du troisième ordre qui agit comme une lentille sphérique, permet de réaliser l'auto focalisation en fonction de l'intensité de l'onde incidente.[2]

En raison de l'épaisseur du matériau suffisamment faible, on pourra négliger l'effet de la diffraction et on va s'intéresser uniquement à l'opérateur non-linéaire $\hat{N}$. L'intégrale B de l'équation (I.55) est une grandeur qui correspond au déphasage non-linéaire maximal pouvant s'accumuler lors de la propagation au centre du faisceau lumineux là où l'intensité est la plus grande. Ceci va créer une déformation qui va jouer le rôle d'une lentille sphérique. Dans ce cas, le faisceau lumineux va converger sous l'action de cette lentille, c'est ce qu'on appelle l'auto-focalisation de l'effet Kerr optique.

$$\frac{\partial \mathcal{A}}{\partial z} = \underbrace{\widehat{D\mathcal{A}}}_{\text{Effet diffraction}} + \underbrace{\widehat{N\mathcal{A}}}_{\text{effet non-linéaire}} = \frac{i}{2k_0} \mathcal{A}(\vec{r}) + i\gamma |\mathcal{A}(\vec{r})|^2 \mathcal{A}(\vec{r}) \quad (\text{I.54})$$

$$B = \int_0^L \gamma |\mathcal{A}(0,0,z)|^2 dz = \frac{\omega_0}{c} \int_0^L n_2 I(0,0,z) dz = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 IL \quad (\text{I.55})$$

I.5 Conclusion

Généralement, le domaine d'optique est l'étude des phénomènes qui se produisent à la suite de la modification des propriétés optiques d'un système matériel par la présence de la lumière. Dans ce chapitre, nous avons exposé les notions de base de la linéarité et la non-linéarité optique dont les propriétés peuvent être exploitées concrètement créant ainsi, de nouvelles ondes de fréquences différentes de celle de l'onde incidente. Bien évidemment, les cristaux photoniques qui sont considérés comme la maille de base pour les effets d'optiques tels que : linéaire, non-linéaire second et troisième ordre dans le chapitre qui suit de cette thèse.

I.6 Références

- [1] Powers, P.E., & Haus, J.W. (2017). Fundamentals of Nonlinear Optics (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315116433>.
- [2] Certificat de formation en 'optique non-linéaire'(verify/CourseraTPLP9SU87CM4/9 novembre 2021) autorisé par École Polytechnique de Paris (France)Départementde physique / Laboratoire d'Optique et Biosciences et proposé parl'intermédiaire de Coursera.
- [3] Griffiths, D. J. 1999. Introduction to Electrodynamics (3rd edition). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- [4] Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. E., & Weinreich, G. (1961). Generation of optical harmonics. Physical Review Letters, 7(4), 118.
- [5] Dmitriev, V. G., & Gurzadyan, G. G. (1997). D. N. Nikogosyan. Handbook of nonlinear optical crystals, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [6] Miller, R. C. (1964). Optical second harmonic generation in piezoelectric crystals. Applied Physics Letters, 5(1), 17-19.
- [7] Sutherland, R. L. (2003). Handbook of nonlinear optics. CRC press.
- [8] Wu, Q., Litz, M., & Zhang, X. C. (1996). Broadband detection capability of ZnTe electro-optic field detectors. Applied Physics Letters, 68(21), 2924-2926.
- [9] Zernike, F., & Midwinter, J. E. (2006). Applied nonlinear optics. Courier Corporation.
- [10] Sheik-Bahae, M., Said, A. A., Wei, T. H., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (1990). Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. IEEE journal of quantum electronics, 26(4), 760-769.

Chapitre II

Historique et Principes de
Performance des Portes Logiques à
Base Cristaux Photoniques

II. Chapitre II : Historique et principes de performance des portes logiques à base des cristaux photoniques

II.1 : Introduction

L'un des objectifs du développement de la technologie optique intégrée est de réaliser un traitement ultra-rapide de l'information et du calcul tout optique à base des dispositifs optiques intégrés à l'échelle du micro-nanomètre. Le besoin de nouveaux matériaux pour contrôler le flux de photons a été l'idée principale de la conception des cristaux photoniques. Les mécanismes traditionnels utilisés pour contrôler le flux de photons sont généralement basés sur des phénomènes d'absorption ou de réflexion interne, mais les cristaux photoniques utilisent un mécanisme tout à fait différent pour contrôler la propagation de l'onde lumineuse. Comparé aux matériaux semi-conducteurs, les cristaux photoniques, avec des structures de bandes optiques uniques, comprennent des bandes transitoires et des modes de défaut qui contrôlent le comportement des photons. Les cristaux photoniques sont constitués de structures régulières à une, deux ou trois dimensions avec des périodes spatiales de l'ordre de plusieurs centaines de nanomètres, c'est-à-dire plusieurs fois plus petites que la longueur d'onde de la lumière se propageant dans la structure. Pour chacune de ces structures alternées, des bandes interdites (plages de fréquences 'interdites') sont définies. La propagation de la lumière dans ces structures est fortement influencée par les bandes interdites photoniques, car la propagation de la lumière dans une bande interdite photonique est impossible. [1,2]

La fabrication de dispositifs optiques intégrés à l'échelle nanométrique fait partie des principales applications des cristaux photoniques. Ces dernières années, parallèlement aux grandes avancées dans la fabrication d'échantillons de cristaux photoniques de haute qualité, divers dispositifs optiques intégrés ont été mis en œuvre, notamment la conception et la fabrication de portes logiques basées sur des cristaux photoniques. [3]

Les dispositifs logiques sont l'un des composants essentiels pour des systèmes informatiques optiques et du traitement ultra-rapide de l'information. Les portes logiques peuvent être construites sur les effets de la bande interdite photonique, des guides d'ondes et des limitations sévères de la lumière dans les microcavités de cristaux photoniques. Les paramètres importants dans la conception des portes logiques en cristal photonique sont la constante de réseau de la structure (a), le type de matériau (la valeur de l'indice de réfraction correspondant) utilisé pour les tiges diélectriques et le substrat, le type de modes et la bande interdite de la structure en fonction des dimensions et la géométrie, la forme du modèle, le rayon des tiges diélectriques, et les dimensions des défauts, etc. [3]

II.2 : Histoire des cristaux photoniques

Avant d'étudier les portes logiques à base cristaux photoniques, il convient de réfléchir et d'examiner l'histoire des cristaux photoniques. Bien que l'on pense que les cristaux photoniques ne soient au centre de l'attention que depuis quelques décennies, les premières hypothèses concernant la possibilité de propagation de la lumière au moyen de structures alternées datent de 1887. Cette année-là, Lord Rayleigh est devenu l'initiateur de l'étude des cristaux optiques en introduisant une bande interdite optique dans des structures alternées unidimensionnelles [1]. Par la suite, en 1928, Felix Bloch a étudié la propagation des ondes dans des environnements alternatifs tridimensionnels [2]. Selon la théorie de Bloch, le champ dans les milieux périodiques peut être remplacé par une onde plane dont le coefficient est alternatif. Cette théorie est utilisée pour décrire les structures de bandes optiques. En 1972, Vladimir Bykov a étudié théoriquement une structure unidimensionnelle dans son livre : « Reversible Crystal Plasticity » pour étudier la possibilité d'utiliser les structures alternées et les effets de bande interdite photonique sur les émissions spontanées des molécules et des atomes [4]. Vladimir Bykov a également mené des études sur l'utilisation de ces structures en deux et trois dimensions. Par la suite, Ohtaka (1979) a introduit le concept général des cristaux photoniques tridimensionnels [5]. Cependant, les premières recherches considérées comme le point de départ des développements majeurs des cristaux photoniques sont les travaux de « E.I. Yablonovitch » [6] et de « John. S », [7] en 1987. Cette année-là, deux études ont été menées simultanément par ces deux chercheurs scientifiques. Yablonovitch a étudié l'émission spontanée inhibée dans le domaine de la physique et de l'électronique à l'état solide, et John, dans son étude, a examiné le pouvoir de localisation des photons dans les cristaux photoniques. Après la publication de leurs articles, Ho et Soukoulis ont publié, en 1990, un article sur la théorie des cristaux photoniques [8]. Un an plus tard, Gruning (1995) a étudié expérimentalement la théorie de ces structures. En 1995, les cristaux photoniques à grande échelle [9], et en 1998, les cristaux photoniques à petite échelle Gruning [10] sont apparus. En 1999, les premiers dispositifs optiques basés sur les cristaux photoniques ont été produits.

II.3 : Vue générale sur les propriétés des cristaux photoniques et méthodes de simulation

Les cristaux photoniques sont des milieux optiques dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans l'espace, ce qui permet de contrôler la direction de la lumière. La structure des cristaux naturels inspire les cristaux photoniques. Avec le développement des instruments d'observation et de mesure des petites structures, en particulier toutes sortes de microscopes électroniques, on a découvert que des cristaux photoniques naturels existent dans la structure

Chapitre II : Historique et principes de performance des portes logiques à base des cristaux photoniques

de nombreuses espèces naturelles. On peut citer les ailes de papillon, les roches minérales, les opales, les moules et de nombreuses créatures marines. La figure (II.1) montre un exemple de cristaux naturels dans lesquels la structure périodique est clairement reconnaissable.

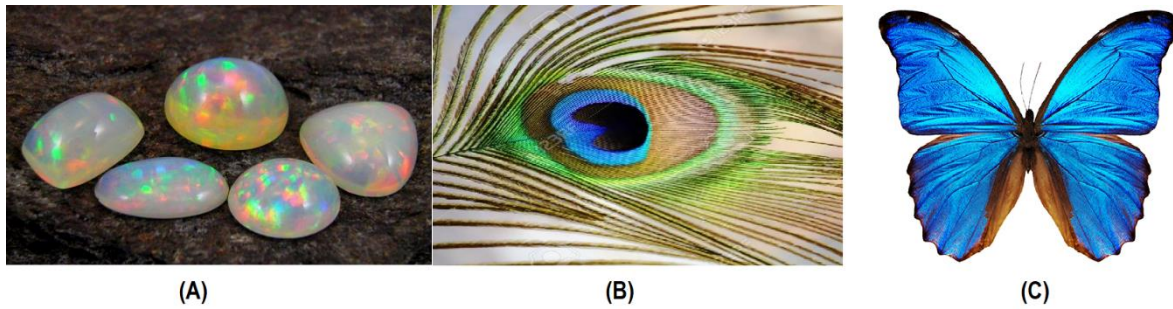


Figure II.1 : Exemple de cristaux naturels : (A) Pierre opale, (B) Plume de Paon, et (C) Aile de papillon [11].

La base des cristaux photoniques est la même que celle de tout autre cristal : la diffraction de Bragg est un effet décentralisé, dans lequel l'onde entrante est diffusée par chacun des éléments constitutifs d'un cristal, et ces diffractions dans certaines directions s'amplifient mutuellement de manière constructive, tandis que dans d'autres directions, elles s'atténuent mutuellement par interférence destructive.

La figure (II.2) montre l'interférence destructive et constructive de l'onde réfléchiée par un réseau de réflecteurs d'ondes. Ces réflecteurs d'ondes représentent à l'intérieur du cristal photonique, les régions remplies d'un matériau ayant une valeur donnée de l'indice de réfraction. Chacune de ces plaques périodiquement ordonnées agit comme un miroir semi-transparent (Elle réfléchit une partie de l'onde selon la loi de Snell-Descartes et laisse passer une partie) Ohtaka (1979) [11].

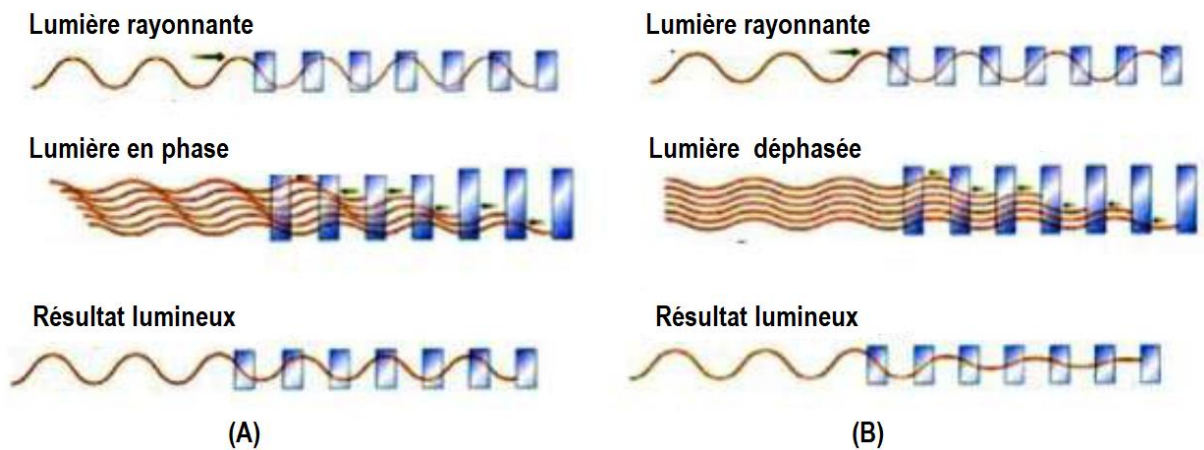


Figure II.2 : Interférence, (A) Constructive, (B) Destructive pour les ondes réfléchies par un réseau régulier de diffractions d'ondes [11].

La figure (II.3) montre la collision oblique d'une onde plane avec un réseau de surfaces réfléchissantes.

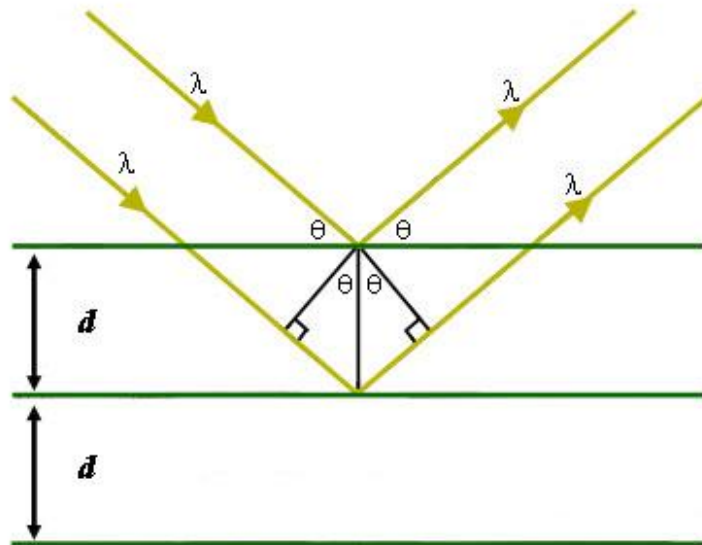


Figure II.3 : Réflexion de Bragg d'une onde plane qui entre en collision oblique avec les plaques d'un cristal ou d'un cristal photonique [11].

Pour une amplification en phase, la différence de trajet indiquée dans les figures (II.1), (II.2) et (II.3) doit être un multiple entier de la longueur d'onde λ du faisceau lumineux dans le milieu. Elle peut être exprimée selon l'équation (II.1) :

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{II.1})$$

Où θ est l'angle d'incidence de la lumière entrante et n est un nombre entier. Il s'agit de la réflexion de Bragg. Par conséquent, les longueurs d'onde qui remplissent la condition donnée par l'équation (II.1) reviennent avec un angle de réflexion, et les autres traversent le cristal, qui

présente donc un spectre de réflectance non uniforme, contrairement aux métaux entiers. Si cette non-uniformité se situe dans le domaine de la partie visible, le cristal photonique ressemblera à une aile de papillon.

II.3.1 : Méthodes de simulation numérique

La majorité des structures à cristaux photoniques (CPs) sont basées sur l'effet de bande interdite. Bien qu'un CP tridimensionnel (3D) possède une meilleure capacité de confinement de la lumière, une plateforme de CPs présentant un motif périodique bidimensionnel (2D) dans un milieu en couches est beaucoup plus facile à fabriquer et largement utilisée.

Pour concevoir et optimiser les guides d'ondes de la plateforme CP, des méthodes numériques efficaces sont nécessaires pour calculer les modes du guide d'ondes. La méthode 2D de différences finies dans le domaine temporel (2D-FDTD) a été utilisée pour analyser les guides d'ondes en plateforme CPs, mais elle nécessite un temps de calcul important. Ceci est particulièrement correcte pour les structures avec un grand contraste d'indice, où une très petite taille de réseau est nécessaire pour résoudre les interfaces. Pour choisir la longueur d'onde de fonctionnement permettant de simuler les portes logiques prévues, deux méthodes sont utilisées pour analyser les circuits basés sur les PhCs. La première consiste à déterminer la gamme de fréquences fonctionnelles des portes logiques tout-optique à l'aide de la méthode d'expansion des ondes planes (PWE) [12]. La seconde consiste à analyser la lumière transmise, représentée par l'amplitude du spectre de transmission et l'efficacité d'absorption, et à utiliser un maillage précis dans les portes logiques tout-optiques basées sur des cristaux photoniques bidimensionnels, en exploitant la méthode FDTD (FiniteDifference Time Domain). La zone opérationnelle pour la méthode FDTD est entourée d'une couche parfaitement adaptée (PML) pour éviter les réflexions indésirables et absorber les ondes incidentes [53]. Dans nos simulations, la méthode de la maille de Yee doit résoudre les équations de Maxwell [53]. La grille spatiale doit être suffisamment petite pour résoudre les plus petites caractéristiques du champ de simulation afin de produire des résultats précis, Les grilles spatiales Δx et Δz doivent être choisies comme suit [53] :

$$\Delta x < a/16 \quad \text{et} \quad \Delta z < a/16 \quad (\text{II.2})$$

Δx et Δz sont les mailles dans les directions x et z , et « a » est la constante de réseau, respectivement. Nous avons considéré les facteurs suivants pour assurer la convergence des simulations, en considérant $\Delta x = \Delta z = a/16$. En outre, les grilles spatiales et temporelles sont choisies pour satisfaire la condition actuelle afin d'obtenir des simulations stables [53].

$$c\Delta t < \frac{1}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2}} \quad (\text{II.3})$$

Où « c » est la vitesse de la lumière dans l'espace libre.

II.3.2 : Bande interdite photonique

La caractéristique la plus importante qui clarifie l'importance pratique des cristaux photoniques est la présence d'une **Bande Interdite Photonique (BIP)**. C'est une limite continue et bornée dans le domaine des fréquences, les ondes ne peuvent pas s'y propager, elles sont complètement réfléchies.[13]

La propagation de la lumière dans la structure à base des cristaux optiques dépend de leur longueur d'onde. Les longueurs d'onde de la lumière qui peuvent se propager sont appelées modes. Les modes TE (**T**ransverse **E**lectric) et TM (**T**ransverse **M**agnetic) sont deux modes importants dans les CPs. Dans le mode TE le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence, et le champ magnétique est parallèle au plan. Alors que dans le mode TM le champ électrique est parallèle au plan d'incidence et le champ magnétique est perpendiculaire au plan (figure (II.4)).[14]

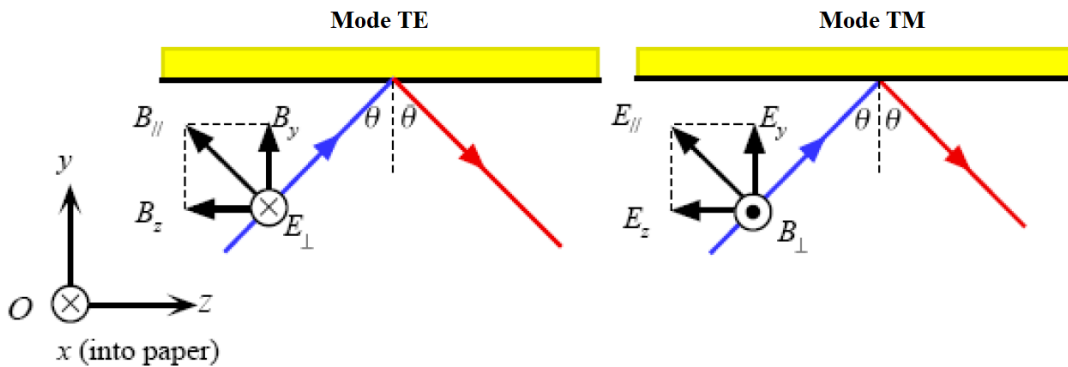


Figure II.4 : Mode TE et TM dans le plan XYZ. [13]

Le diagramme de bande est différent pour les modes avec diverses polarisations ; par conséquent, la bande interdite peut être seulement pour une polarisation spécifique pour une structure particulière. Les structures sous forme de tiges diélectriques dans l'air sont appelées structures déconnectées, illustrées sur la figure (II.5a). Dans ces structures, la bande interdite est souvent observée pour la polarisation TM. Les structures sous forme de trous sur la surface d'un matériau (figure (II.5b)) sont appelées structures connectées, et dans ces structures, la bande interdite est visible pour la polarisation TE. La figure (II.6) présente un exemple de bande interdite photonique pour des structures déconnectées et connectées. [13,14]

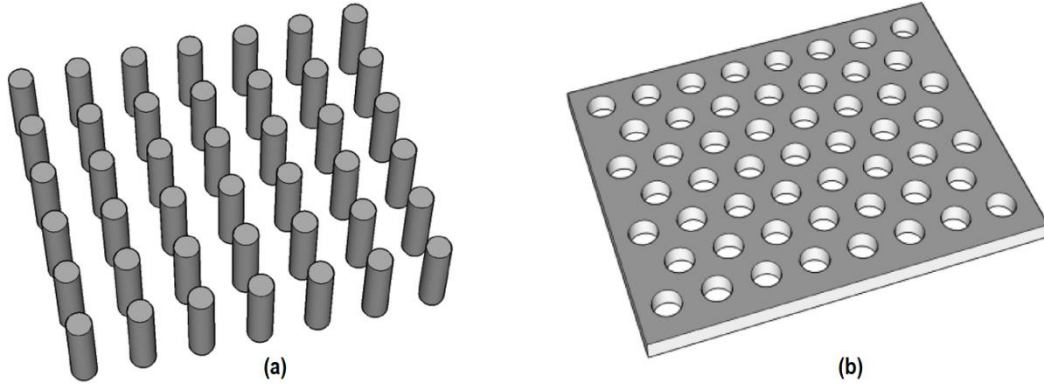


Figure II.5 : Cristal photonique bidimensionnel : (a) Structure déconnectée, (b) Structure connectée [13]

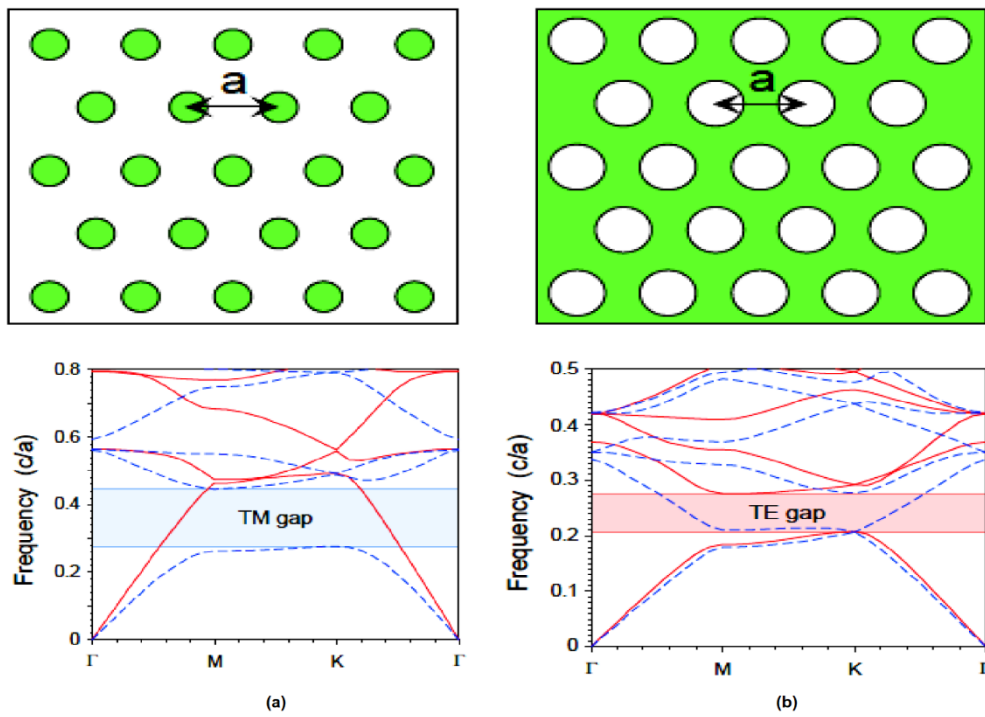


Figure II.6 : Bande interdite pour la polarisation : (a) TM, (b) TE [14]

L'obtention d'une bande interdite appropriée est très importante pour la conception de dispositifs à base de cristaux photoniques. Dans un CP bidimensionnel, la bande interdite dépend de l'indice de réfraction des matériaux, de la forme des tiges, de la structure cristalline, du rayon des tiges et de la constante du réseau. [14]

On souligne ici qu'une façon habituelle de décrire la réponse d'un cristal photonique à une onde monochromatique de fréquence ω (en particulier l'apparition des BIP) est d'utiliser les courbes de dispersion, qui représentent la fréquence ω en fonction de la composante du vecteur d'onde $\vec{k}$ selon plusieurs directions de l'espace. On peut y voir très clairement les BIPs sur la figure II.6. [14]

Aux fréquences ω à l'intérieur de la bande interdite photonique, la transmittance et la réflectance des ondes électromagnétiques sont proches de zéro et de l'unité, respectivement [15]. Si la surveillance de la configuration du champ est notre intérêt, une source monochromatique devient appropriée. L'introduction d'une source monochromatique consiste à injecter les champs à partir d'une valeur nulle. Cela provoque des fluctuations de champ qui se poursuivent pendant tout le temps de calcul. Par conséquent, il est impératif d'attribuer un profil qui garantit que le champ source s'active progressivement [16].

II.3.3 : Défauts dans les cristaux photoniques

Toute irrégularité dans la structure cristalline est appelée défaut. Deux classes de défauts sont définis dans les cristaux photoniques bidimensionnels : Les défauts ponctuels et linéaires. En général, les défauts ponctuels peuvent être réalisés par la suppression d'une ou plusieurs tiges (ou trous), par la modification de leurs rayons ou par des changements dans l'indice de réfraction des tiges. Les défauts linéaires peuvent être créés en supprimant ou en modifiant le rayon ou l'indice de réfraction d'une ou plusieurs rangées de tiges (ou de trous) dans les cristaux photoniques. Les cavités résonantes et les guides d'ondes sont formés en créant des défauts ponctuels et linéaires dans les structures photoniques, respectivement. Un exemple de défauts linéaires et ponctuels est donné par la figure (II.7). [17]

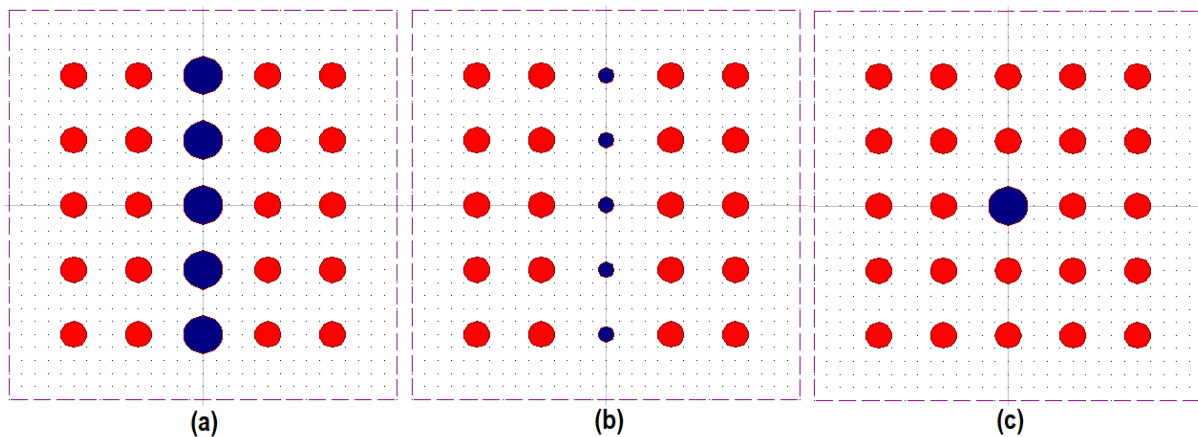


Figure II.7 : Défauts dans la structure photoniques : (a) et (b) Défauts linéaires, (c) Défaut ponctuel. [17]

La création de défauts dans le CP, comme l'ajout d'impuretés dans le semi-conducteur en électronique, conduit à la création de niveaux d'énergie dans la bande interdite photonique. Ces défauts permettent la propagation d'une certaine fréquence de la BIP, à travers la structure, appelée fréquence de résonance, ou mode unique (figure (II.8)). [17]

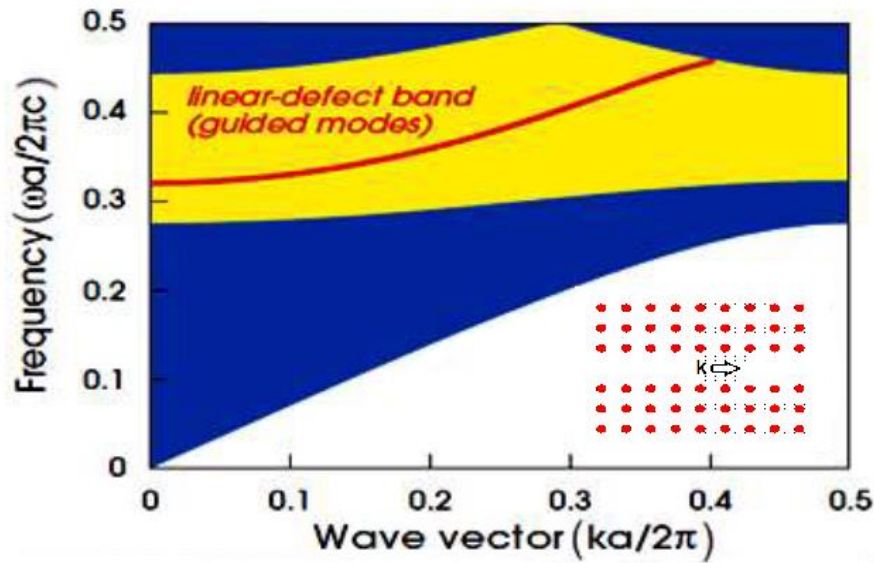


Figure II.8 : Guide à base de cristaux photoniques (défaut linéaire) : Présence du mode guidé (en rouge) dans la BIP (en jaune) [17].

Si le rayon du défaut ponctuel diminue, la fréquence de résonance correspondante se rapproche de la limite supérieure de la bande interdite. Et, inversement, la fréquence de résonance se rapproche de la limite inférieure de la bande interdite lorsque le rayon du défaut augmente, comme le montre la figure (II.9). [18]

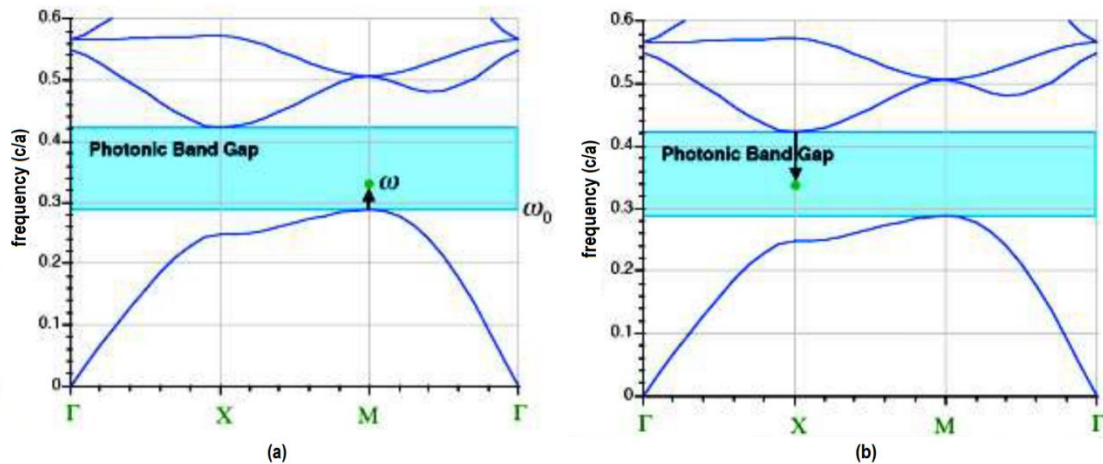


Figure II.9 : Impact du changement du rayon des défauts sur la fréquence de résonance dans la BIP.[18]

II.4 : Histoire des portes logiques à base des cristaux photoniques

De nombreux scientifiques étudient les cristaux photoniques depuis la fin des années 1990, principalement pour le traitement optique, en raison de leurs propriétés uniques telles que la faible consommation d'énergie, la faible dimension des longueurs d'onde, et la simplicité d'intégration. [19, 20]

En 1998, Schloz et Hess [19] ont inventé le premier commutateur optique basé sur les effets non linéaires des cristaux optiques. Ils ont proposé une conception de type unidimensionnel et ils ont appliqué un signal de commande puissant. Suite à la présentation de cette structure, Centeno et Felbacq [20] ont développé une proposition pour la réalisation de commutateurs optiques en 2000 en examinant des guides d'ondes à base cristaux photoniques non linéaires couplés par des cavités résonantes. Après deux ans, trois études sur le traitement optique ont été proposées simultanément. Dans une étude, Fan [21] a proposé un commutateur optique utilisant un guide d'onde couplé à une cavité dans les cristaux photoniques non linéaires. Dans le travail de Soljačić et al [22], un autre commutateur optique bistable utilisant des cristaux photoniques non linéaires. Les limiteurs optiques en exploitant des matériaux non-linéaires dans des guide d'ondes en cristaux photoniques ont été obtenus par Mingaleev Kivshar [22] [23]. En 2004, Locatelli & Cuesta-soto et al ont proposé des commutateurs optiques à base de coupleurs directionnels dans des cristaux photoniques dans deux recherches différentes [24,25]. Zhu et al [26] ont implémenté la porte logique AND à base d'un du cristal photonique en 2006. Plusieurs tiges ayant un effet Kerr non linéaire ont été utilisées pour contrôler la fonction de la porte AND dans leur structure. En ce qui concerne les autres portes logiques du cristal photonique, Zhang et al, ont proposé en 2007 des portes logiques OR et XOR basées sur la propriété des cristaux photoniques auto-collimatés (auto-parallèles) [27]. Shinya [28] a développé une mémoire optique sur une puce à base des cristaux photoniques en 2008. La même année, Liu et al [29] ont proposé une structure de demi-additionneur de cristal photonique. Une porte logique XOR basé sur l'interférence des faisceaux entrants, ce travail a été publié par Lee et al [30]. Andalibet Granpayehen 2009 [31], a publié un schéma pour la porte logique AND en utilisant une structure de résonateur en anneau à base de cristaux photoniques non linéaires. La même année, Jung et al [32] ont proposé une autre conception, dans laquelle des cavités de cristaux photoniques non linéaires ont été utilisées pour créer des portes logiques. Pour le codage, Lee et al [33] ont également proposé la structure d'un codeur 2×4 . Divers concepts pour la mise en œuvre des portes logiques à base de cristaux photoniques ont été développés au cours de la dernière décennie. Ces dispositifs ont été proposés pour optimiser les paramètres fonctionnels des portes logiques en réduisant la consommation d'énergie, en augmentant la bande passante, et en améliorant le rapport de contraste. Pour améliorer et mettre en œuvre les propriétés des portes logiques à base de cristaux photoniques, ils utilisent différents matériaux et semi-conducteurs. D'autres conceptions ont été lancées utilisant la propriété des interférences multimodes, pour réaliser des circuits logiques à base de cristaux photoniques. L'un de ces circuits est proposée par Ishizaka et al [34], pour réaliser les portes logiques AND et XOR.

II.5 : Différents concepts des portes logiques basées sur les cristaux photoniques

La recherche sur les portes logiques optiques à base de CPs est classée en trois catégories principales : les portes logiques tout-optiques à base de CPs à interférence, les portes logiques tout-optiques à base de CPs à résonateurs et les portes logiques à CPs à auto-collimation qui ont été étudiées par Salmanpour [35].

II.5.1 : Portes logiques basées sur les interférences

En 2006, les chercheurs ont publié les premières études sur les portes logiques basées sur les guides d'ondes d'interférence multimode.[36]

D'après la figure (II.10), les interférences constructives et destructives se produisent lorsque la différence de phase et la différence de trajet sont, respectivement, égales à $2n\pi$ et $n\lambda$, $(2n + 1)\pi$ et $(2n + 1)\lambda/2$. [36]

Pour assurer des interférences stables dans les structures photoniques, il faut lancer deux (ou plusieurs) ondes de même fréquence avec une phase relative stable et contrôlable. Ces deux (ou plusieurs) ondes doivent être guidées à l'intérieur de la structure pour se superposer dans certaines régions de la structure, donnant lieu à des interférences à cet endroit. En raison de ces interférences, et en fonction de la phase initiale relative entre les deux (ou plusieurs) champs d'entrée, les interférences peuvent rendre la superposition d'ondes constructive dans l'un ou l'autre des canaux de sortie et destructive dans d'autres canaux de sortie.

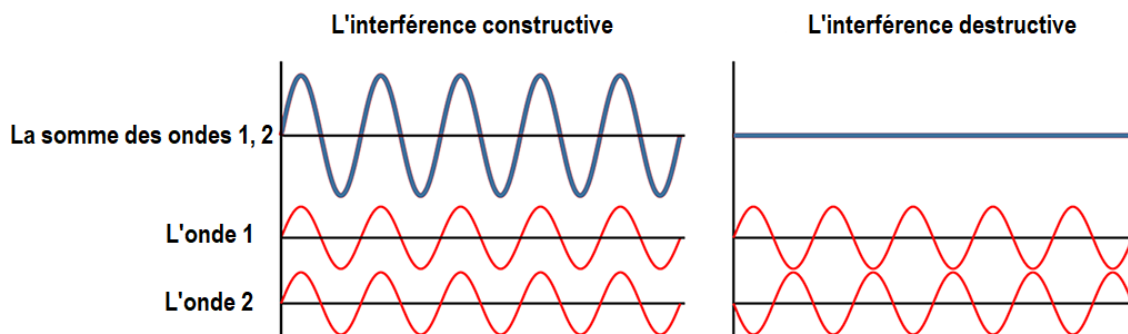


Figure II.10 : Interférence destructive et constructive entre les ondes. [36]

II.5.2 : Portes logiques basées sur la résonance

Les ondes oscillent dans une petite cavité créée par un défaut ponctuel dans le cristal photonique. L'utilisation de filtres à effet tunnel résonnants est une solution idéale pour réaliser des portes logiques [37,38]. Ces filtres sont constitués de cavités et de guides d'ondes linéaires, avec une faible consommation d'énergie et une vitesse élevée. Les résonateurs circulaires sont utilisés pour concevoir des dispositifs optiques tels que les commutateurs et les filtres tout-

optiques [39,40]. Le facteur de qualité « Q » du résonateur en anneau, qui montre la limitation de la lumière dans le résonateur, est un facteur essentiel pour déterminer la commutation des circuits tout-optiques. Lors de la fabrication de dispositifs tout-optiques utilisant des résonateurs en anneau, un arbitrage doit être fait entre l'augmentation du facteur de qualité « Q » et la diminution du couplage. Le résonateur en anneau est un dispositif optique simple constitué de deux guides d'ondes parallèles (Entrée-Sorties) couplé par un anneau résonant, comme le montre la figure (II.11.a).

À une longueur d'onde bien précise (appelée longueur d'onde de résonance, λ_c), les ondes optiques du guide d'onde d'entrée sont transmises par le résonateur en anneau au guide d'onde de sortie, ce qui permet de réaliser la fonction de filtrage. La longueur d'onde de résonance du résonateur en anneau dépend des paramètres optogéométriques du résonateur circulaire [41]. Le spectre de sortie de ce résonateur est montré par la figure (II.11b).

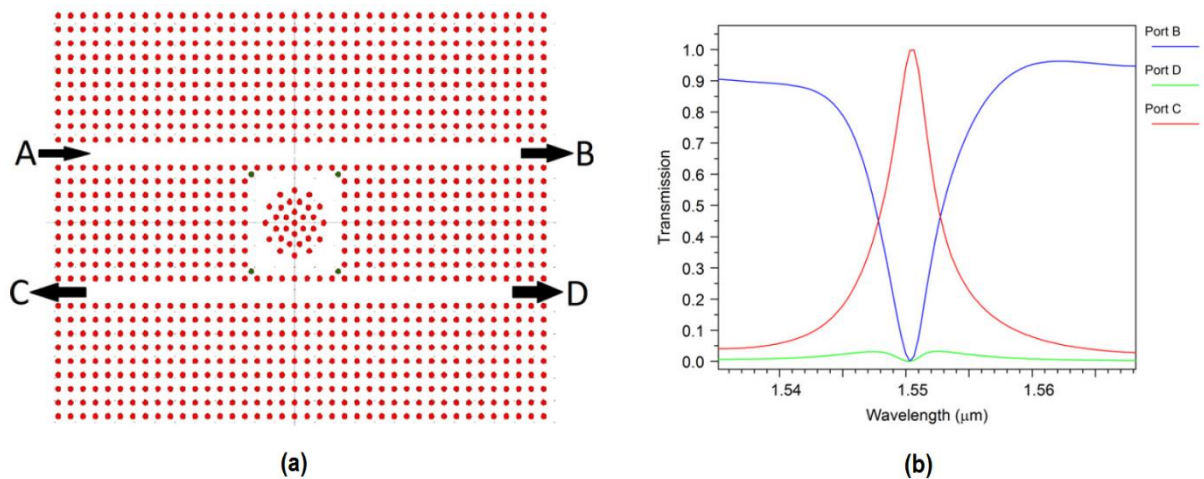


Figure II.11 : (a) Résonateur en anneau à cristaux photoniques, (b) Spectre de transmission [41].

II.5.3 : Portes logiques basées sur l'auto-collimation

L'auto-collimation est un phénomène qui permet de produire un faisceau d'entrée divergent et de le mettre en parallèle sans avoir à utiliser un effet non linéaire [42]. De nombreux travaux publiés dans la revue « Non linear Optics » présentent des limites fondamentales à savoir, la consommation d'énergie et la gamme de fréquences étroite. En revanche, le phénomène d'auto-collimation est indépendant de l'intensité du rayonnement entrant et il n'a pas besoin d'une bande interdite optique complète par rapport aux guides d'ondes à base de cristaux photoniques [43]. Le phénomène d'auto-collimation ne nécessite pas la présence d'une plage latérale pour empêcher la divergence et la réfraction des faisceaux, contrairement aux guides d'ondes diélectriques classiques et aux guides d'ondes à cristaux photoniques qui fonctionnent avec la bande interdite photonique. Par conséquent, les dispositifs basés sur l'auto-

collimation ont un fort potentiel pour les circuits intégrés optiques. Une façon de mettre en parallèle les faisceaux d'émission dans la structure du cristal photonique consiste à réduire le rayon des tiges au lieu de les éliminer pour créer un défaut linéaire. Cette réduction élimine la réflexion globale en ne laissant, donc, que la réflexion partielle de l'onde. On suppose qu'il va y avoir une différence de phase entre le faisceau de réflexion et le faisceau transmis. Par conséquent, si un autre faisceau d'auto-collimation est introduit avec la phase initiale appropriée, les faisceaux transmis ou réfléchis peuvent créer des interférences constructives ou destructives donnant naissance à des performances de commutation et de portes logiques [42,43]. Des phénomènes d'auto-collimation ont été rapportés [42], montrant une propagation de la lumière collimatée insensible à la divergence du faisceau incident, sans intervention d'un effet non linéaire (Comme par exemple, l'effet Kerr qui provoque la propagation de solitons et d'auto-focalisation).

Pour décrire le principe de fonctionnement de l'auto-collimation, nous avons décrit une partie du travail effectué dans la référence [42], La propagation du faisceau lumineux dans un cristal photonique est gouvernée par ses surfaces de dispersion, qui correspondent à l'ellipsoïde d'indice dans l'optique cristalline classique. Une branche typique d'une surface de dispersion dans l'espace réciproque d'un cristal photonique est représentée schématiquement par une courbe épaisse sur la figure (II.12) [42]. La courbure de la surface de dispersion tourne du bas vers le haut, et la lumière incidente arrive par le haut de la figure (II.12). La direction de la propagation de la lumière dans le CP est perpendiculaire à la surface de dispersion aux points de liaison (A_1 , A_2 et B) car la vitesse de l'énergie intégrée sur une cellule unitaire est identique à la vitesse de groupe, qui est donnée par l'équation (II.4) [42] :

$$vg = \nabla_k \omega(k) \quad (\text{II.4})$$

Où ω est la fréquence optique du vecteur d'onde k , on note que la direction dans l'espace réciproque correspond exactement à celle dans l'espace réel en raison de la symétrie.

Ainsi, la propagation de la lumière dans un cristal photonique peut être classée selon les trois cas suivants [42] :

1. Au point de liaison de la courbure vers le bas (point A_1), la lumière dans le cristal photonique présente une propagation divergente comme dans une lentille concave ;
2. Au point d'attache de la courbure vers le haut (point A_2), la lumière présente une propagation divergente après convergence comme dans une lentille convexe ;

Les cas (1) et (2) apparaissent généralement simultanément, c'est le cas d'une « lentille ».

3. Dans la zone approximativement linéaire autour du point d'inflexion de la courbure vers le bas à la courbure vers le haut (point B), la lumière présente une propagation presque collimatée. Ce phénomène est analogue à celui d'un « collimateur », qui est constitué d'une combinaison de lentilles concaves et convexes comme le montre la figure (II.12).

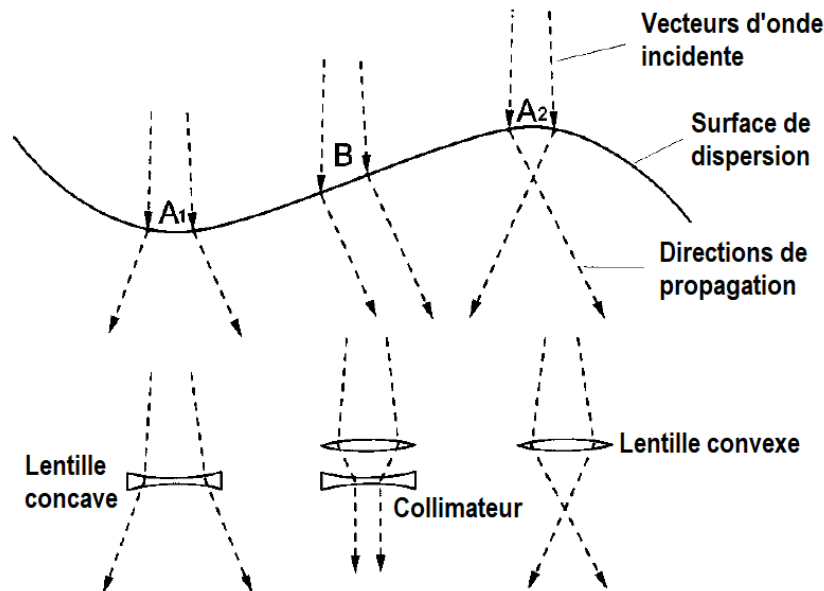


Figure II.12 : Illustration schématique du phénomène d'auto-collimation, (B) avec le cas de divergence (A1), et de convergence (A2). Chaque cas correspond, respectivement, au collimateur (B), à la lentille concave (A1) et à la lentille convexe (A2) en optique conventionnelle. Les flèches au-dessus de la surface de dispersion indiquent les vecteurs d'onde incidents dans l'espace réciproque. Les flèches sous la surface de dispersion indiquent le flux d'énergie dans l'espace réel [42].

II.6 : Portes logiques tout-optiques à base de cristaux photoniques. Etat de l'art

Les portes logiques tout-optiques, telles que BUFFER, NOT, AND, NAND, NOR, XOR, XNOR, OR, sont des composants indispensables pour la construction de différentes unités de calcul. Les guides d'ondes et les microcavités à base de cristaux photoniques sont souvent utilisés pour réaliser des portes logiques.

II.6.1 : Portes logiques tout-optique basées sur les interférences

II.6.1.1 : Portes logiques tout-optique AND et XOR basées sur les interférences multi modes

Des portes logiques AND et XOR basées sur le **MMI** (**M**ulti-**M**ode **I**nterference) ont été proposées dans [44], comme le montre la figure (II.13), ayant des ports d'entrées A et B et des ports de sorties X et Y. Elles ont été conçues en utilisant un réseau de géométrie triangulaire constitué de tiges en Silicium **Si** gravées sur un substrat en dioxyde de Silicium (ou Silice) **SiO₂**. La structure présente une constante de réseau "a", un rayon des tiges "r". Les tiges au niveau du

Chapitre II : Historique et principes de performance des portes logiques à base des cristaux photoniques

coude ont des rayons r_w , r_x , r_y , r_z , qui ont été optimisés de manière à obtenir une transmission maximale aux ports de sortie. Les paramètres choisis pour la région MMI étaient une largeur du guide d'onde W_n de $2\sqrt{3}a$ et une longueur du guide d'onde L , où W_n désigne un guide d'ondes, qui a été créé en supprimant totalement n lignes de tiges dans la structure. Pour concevoir la porte XOR, la longueur utilisée pour le MMI était de $9a$. Ces opérations sont résumées dans la table II-1 et 2.

Table II-1 : Fonctions de la porte logique AND. ϕ est la phase du signal sur chaque port d'entrée.

Port d'entrée A			Port d'entrée B			Port de sortie X
Logique	Amplitude	ϕ	Logique	Amplitude	ϕ	Logique
0	0	-	0	1	$-\frac{\pi}{2}$	0
0	0	-	1	1	$\frac{\pi}{2}$	0
1	1	0	0	1	$-\frac{\pi}{2}$	0
1	1	0	1	1	$\frac{\pi}{2}$	1

Table II-2 : Fonctions de la porte logique XOR, ϕ est la phase du signal sur chaque port d'entrée.

Port d'entrée A		Port d'entrée A		Port de sortie X
Logique	ϕ	Logique	ϕ	Logique
0	π	0	$\frac{\pi}{2}$	0
0	π	1	$-\frac{\pi}{2}$	1
1	0	0	$\frac{\pi}{2}$	1
1	0	1	$-\frac{\pi}{2}$	0

En utilisant la même structure, la porte AND a été réalisée en choisissant une longueur du MMI de $10a$ et en sélectionnant correctement les phases du signal d'entrée. Un rapport de contraste « CR » d'environ 6,79 dB a été obtenu pour les portes logiques AND et XOR.

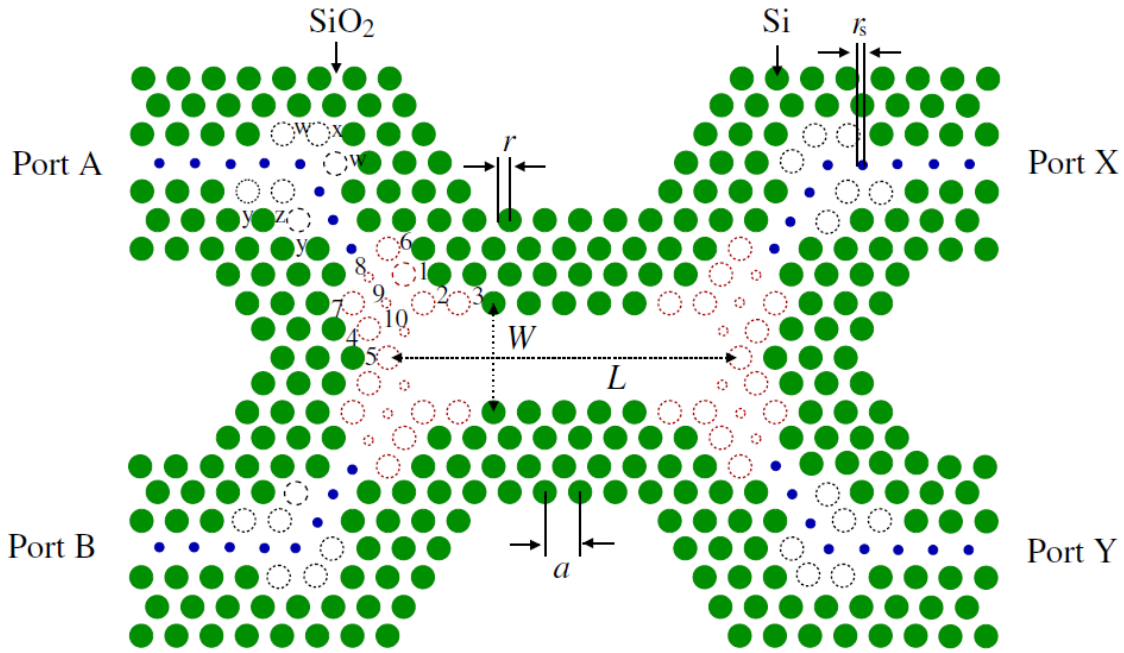


Figure II.13 : Schéma des portes AND et XOR basées sur l'interférence multimode (MMI) [44].

Dans [45], une autre structure pour les portes XOR, NAND XNOR et OR basée sur MMI a été proposée, comme le montre la figure (II.14), avec A et B comme ports d'entrées et C et D comme ports de sorties. La structure a été conçue à base d'un cristal photonique de géométrie triangulaire constitué de tiges en Silicium **Si** gravées sur un substrat en dioxyde de Silicium (ou Silice) **SiO₂**. La structure présente une constante de réseau " a ", un rayon des tiges " r ". Le rayon de la tige B est R , les deux tiges A, déplacées d'une distance de $d = 0,5a$, ont été optimisées avec la région MMI de largeur W et de longueur $L = 4a$. Dans le cas de la porte XOR, le « 1 » logique était exprimé par un signal d'entrée de phase 0 pour le port A tandis que le « 0 » logique était représenté par un signal avec un déphasage de π . Pour le port B, le déphasage de $-\pi/2$ exprime le « 1 » logique tandis que la phase de $\pi/2$ exprime le « 0 » logique. Tous les autres ports ont été exprimées avec les différentes combinaisons de la phase des signaux d'entrée au port A et au port B. Le rapport de contraste obtenu pour les portes XOR, XNOR, NAND et OR était de 28.6, 28.6, 25, et 26.6 dB, respectivement, dans la bande C.

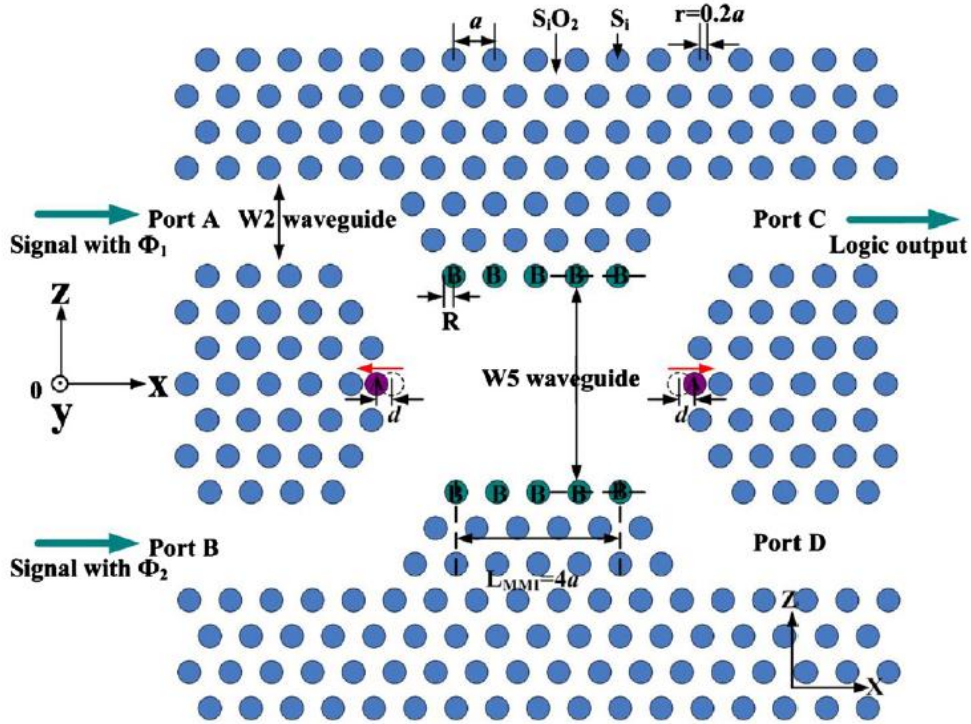


Figure II.14 : Structure schématique des portes XOR, XNOR, NAND et OR utilisant un réseau de géométrie triangulaire [45].

Dans [46], des portes XNOR, XOR, OR et NAND, ont été proposées et conçues à partir d'un cristal photonique bidimensionnel de géométrie de carrée avec des tiges en Silicium Si suspendues dans l'air. La structure était composée de 11×15 tiges cylindriques. Un guide d'ondes « W5 » a été réalisé par la suppression de cinq rangées. La structure possède deux ports d'entrée A et B, et un port de sortie Y, comme le montre figure (II.15), un rayon de $0,2a$ ($a = 600$ nm) a été choisi. Une longueur de couplage L_c de « $6a$ » a été fixée pour obtenir des images doubles de l'entrée. Les valeurs d'entrée et de sortie ont été prises sous forme de phases et d'intensité, respectivement. En fonction de la phase appliquée, des interférences constructives ou destructives se produisaient à la sortie.

Lorsque la différence de phase entre les signaux d'entrée était de 0, un signal de haute intensité était reçu au port Y. Lorsque la différence de phase était de π , les deux signaux d'entrée ne s'interfèrent pas entre eux et se réfléchissent vers les deux ports d'entrée A et B, produisant une quantité négligeable de lumière au port de sortie. Lorsque la différence de phase était $n\pi/2$, la lumière provenant des deux ports A et B d'entrée était superposée et atteignait la même intensité au port de sortie Y. En utilisant les différentes combinaisons de phases, des portes XOR, OR, NAND et XNOR ont été réalisées. Le rapport de contraste obtenu était de 40.41 dB pour les deux portes logiques XNOR/XOR et de 37.40 dB pour OR/NAND à la longueur d'onde de 1550 nm avec un temps de réponse inférieur à 0.131 ps.

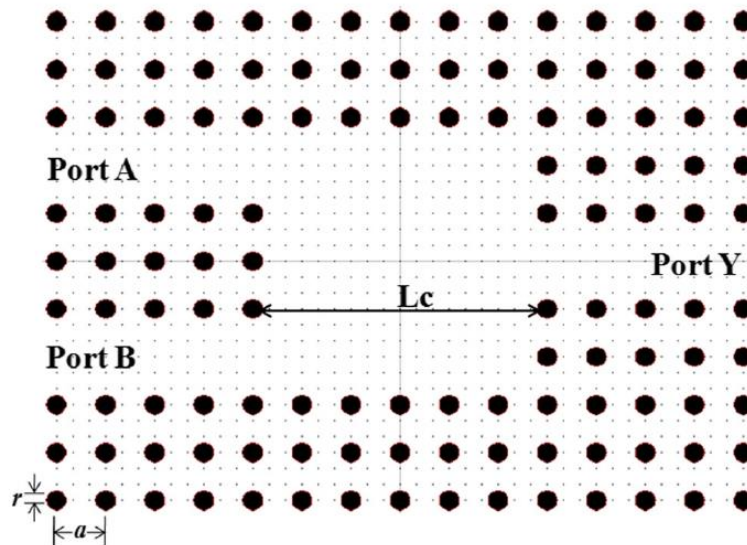


Figure II.15 : Structure des portes XNOR, XOR, OR et NAND [46].

II.6.2 : Portes logiques tout-optique basée sur la résonance

Une structure basée sur l'effet résonance a été proposée par [47] pour réaliser des portes OR, AND, XOR et NOT ayant A et B comme ports d'entrée et O comme port de sortie. Un réseau de géométrie carrée a été utilisé pour concevoir la structure de tiges diélectriques en « Si » suspendue dans l'air. La figure (II.16) montre la présence d'un résonateur en anneau et des guides d'ondes réalisés en supprimant des tiges. Les signaux d'entrées sont polarisés en TM. Lorsqu'il y a un signal à l'entrée A ou B, il y a un couplage au niveau du résonateur, où le signal couplé se propage dans le sens des aiguilles d'une montre (CW : **W**ith the **C**lock), tandis qu'une autre partie se propage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (CCW : **C**ounter **C**lock **w**ise). Le CW et le CCW interfèrent entre eux d'une manière constructive à l'entrée du guide d'ondes de sortie O, ce qui représente un « 1 » logique. En optimisant la taille du résonateur en anneau, comme la longueur et la largeur, d'autres portes ont été conçues à partir de cette structure.



Figure II.16 : Structure d'une porte OR avec A et B comme ports d'entrée et O comme port de sortie [47].

Une autre structure pour les portes AND/OR/NOT basée sur un matériau Kerr non linéaire a été proposée par Pashamehr et al. [48]. La structure possède deux ports d'entrée C et D, un port de référence A connecté au signal continu et un port de sortie B, comme le montre la figure (II.17). La structure a été réalisée à l'aide des matériaux non linéaires à effet Kerr avec un résonateur en anneau au centre qui résonne sur une certaine fréquence. En l'absence du signal au port C ou D ($C=0$, $D=1$ ou $C=1$, $D=0$), le signal de A ($A=1$) est couplé au résonateur en anneau et donc aucun signal n'est transmis au port B, ce qui représente un « 0 » logique. Lorsque ($C=D=1$), ils sont couplés avec le résonateur en anneau et la fréquence de résonance change, ce qui permet au signal de A de se propager vers le port B, ce qui représente un « 1 » logique.

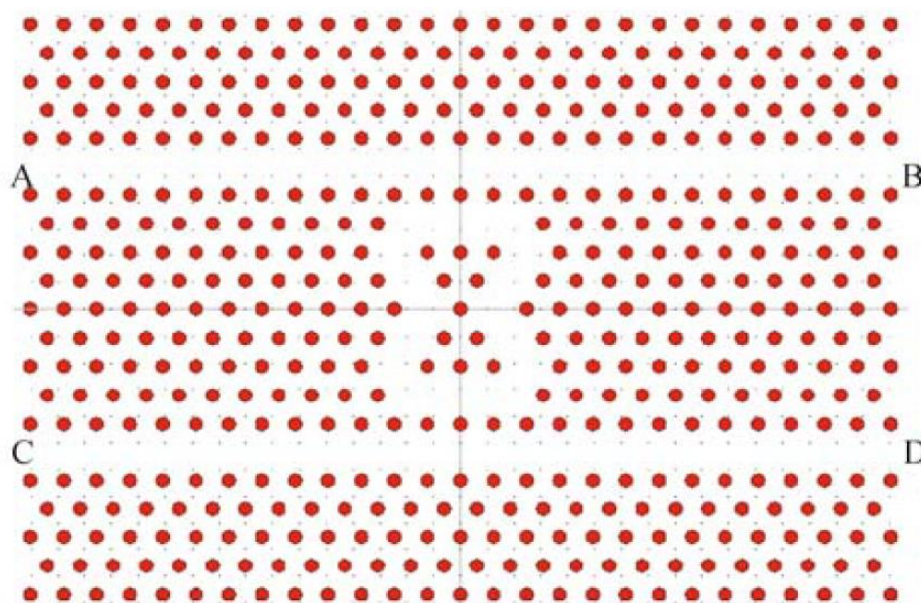


Figure II.17 : Schéma d'une porte OR utilisant un matériau non linéaire d'origine Kerr [48].

La structure de la figure (II.18) a été proposée par [49] pour réaliser des portes AND/OR tout-optique. La structure se compose d'un résonateur en anneau, qui a été optimisé en faisant varier le rayon des tiges de manière à ce qu'il résonne à la fréquence de résonance voulue, et de quatre guides d'ondes connectés aux ports d'entrée A et B, et aux sorties 1 et 2. Le rayon de l'anneau intérieur est de $0,15a$ tandis que celui des autres tiges est de $0,2a$, où « a » était la constante du réseau. Table II.3 illustre différents états de fonctionnement de la structure proposée sur la figure (II.18).

Table II-3 : Table de vérité des portes logiques AND/OR proposées correspondant aux longueurs d'onde de $1,52 \mu\text{m}$.

Longueurs d'onde (μm)	Entrée (A, B)	Puissance de sortie normalisée (AND)	Représentation logique (AND)	Puissance de sortie normalisée (OR)	Représentation logique (OR)
$\lambda = 1.52$	00	0	0	0	0
	01	0.12586	0	0.52931	1
	10	0.02682	0	0.45	1
	11	0.2526	1	1.6724	1

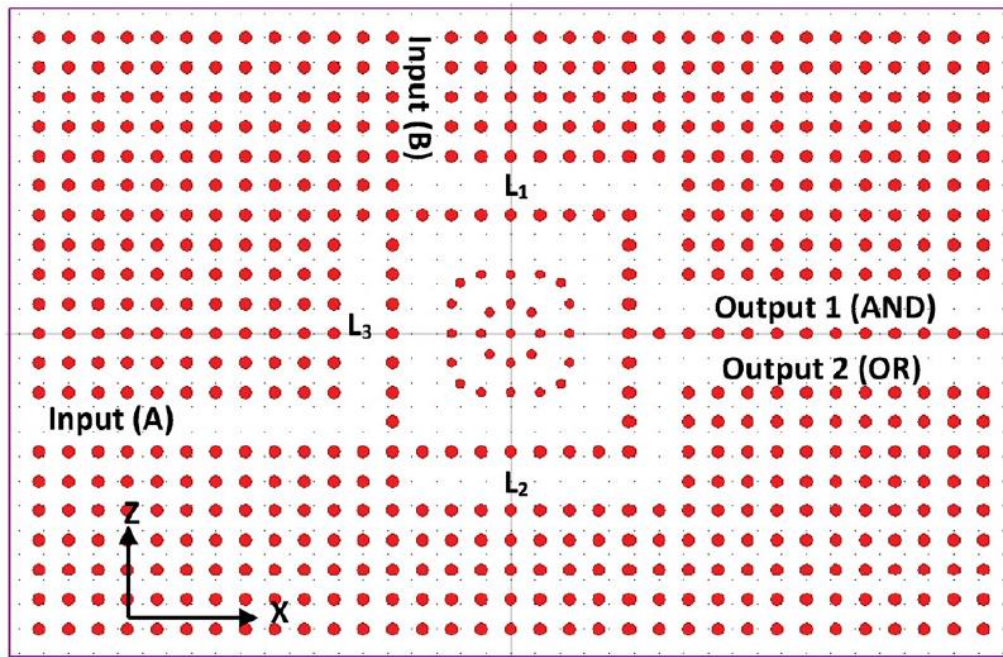


Figure II.18 : Schéma des portes logiques AND/OR [49].

Dans [50], les structures de la porte NOT et AND, basées sur un matériau Kerr non linéaire, ont été proposées, comme le montrent les figures (II.19a) et (II.19b). La structure comporte un résonateur en anneau qui se connecte aux guides d'ondes à l'entrée et à la sortie. Un cristal photonique de géométrie carrée a été utilisé avec des tiges en verre chalcogénure suspendues dans l'air. L'indice de réfraction et le coefficient de Kerr du verre de chalcogénure sont de 3,1 et $9 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$, respectivement, avec des signaux polarisés en TM. La longueur d'onde de résonance par le résonateur en anneau est de 1550 nm, pour que la densité de puissance soit supérieure à $1 \text{ KW}/\mu\text{m}^2$, qui est la valeur seuil connue. Dans le cas des opérations AND, comme le montre la figure (II.19b), la longueur d'onde de fonctionnement de 1550 nm est requise avec une densité de puissance de $0,5 \text{ KW}/\mu\text{m}^2$; lorsqu'il y a un signal à l'entrée du port A, seul le signal qui est couplé au résonateur va au port O de la figure (II.19a), représentant la porte NOT et aucun signal n'est présent à la sortie O de la figure (II.19b). Dans la structure de la porte AND, lorsqu'un signal est présent aux deux ports d'entrée A et B, l'entrée B est couplée au résonateur tandis que l'entrée du port A se propage vers le port O, ce qui représente le « 1 » logique.

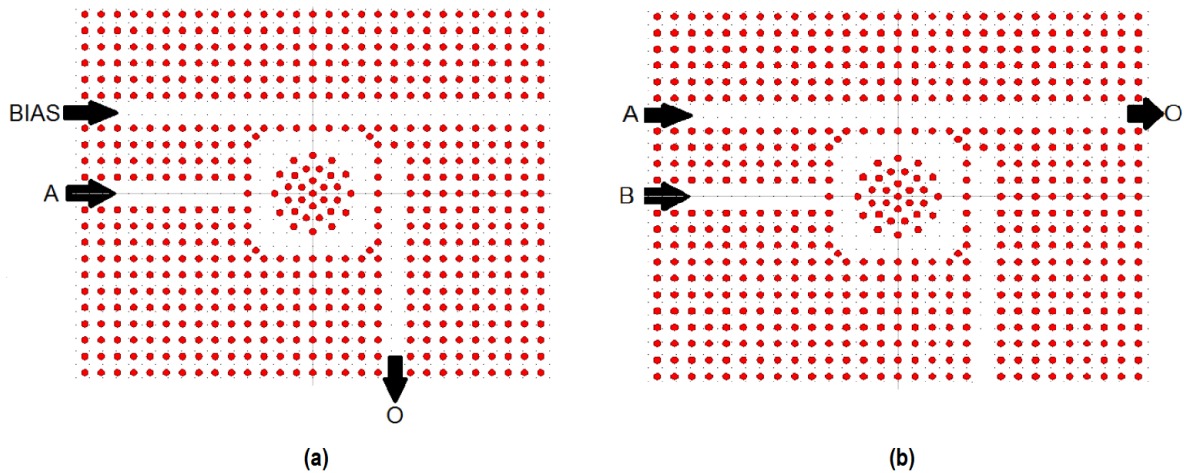


Figure II.19 : (a) Schéma de la porte NOT et (b) schéma de la porte AND [50].

Dans [51], une conception pour la porte NAND a été proposée en utilisant le concept de la non-linéarité de type Kerr avec un résonateur en anneau basé sur le cristal photonique, comme le montre la figure (II.20). Dans la conception proposée, le résonateur en anneau a été conçu en utilisant un réseau carré 33×26 de tiges de verre chalcogénure ($n = 3,1$) suspendues dans l'air. Le rayon de « $0,2a$ » a été choisi, où la période du réseau « a » est de 640 nm. La longueur d'onde résonance est de 1554 nm. Après la conception du résonateur en anneau, il a été constaté la variation l'indice de réfraction quand la puissance est de $0,5 \text{ KW}/\mu\text{m}^2$ ou plus, à cause de l'effet Kerr. Ceci entraîne une modification de la longueur d'onde de résonance du résonateur en anneau, empêchant ainsi la transmission de l'onde lumineuse à la sortie. Afin de concevoir la porte logique tout-optique NAND en exploitant les caractéristiques de la conception du résonateur en anneau, la structure de cette porte a été conçue à l'aide de réseau carrés 33×26 de tiges diélectriques. Elle se compose de trois entrées A, B et BIAS (Signal de référence), et OUT est le port de sortie, comme le montre la figure (II.20) Lorsque la puissance d'entrée du résonateur en anneau est inférieure à $0,5 \text{ KW}/\mu\text{m}^2$, une résonance se produit dans l'anneau, et le signal est dirigé vers la sortie du port OUT ; sinon, il aucun signal à la sortie de la porte, ce qui vérifie bien le fonctionnement de la porte NAND.

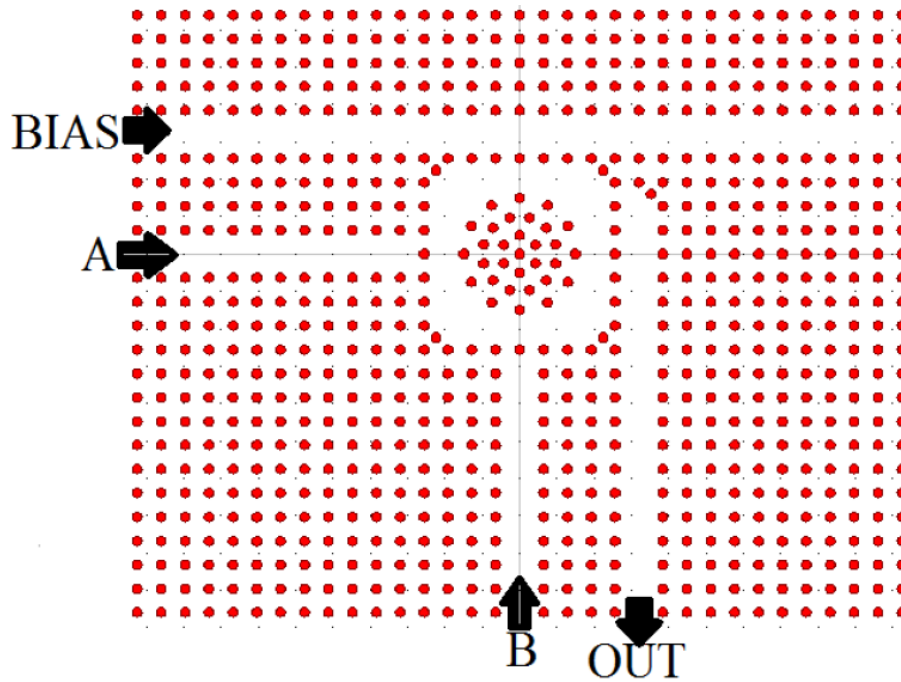


Figure II.20 : Structure d'une porte NAND utilisant un matériau non-linéaire à effet Kerr [51].

II.6.3 : Portes logiques tout-optique basées sur l'auto-collimation

Dans [52], un dispositif, pour le circuit intégré photonique basé sur un faisceau auto-collimaté dans un cristal photonique bidimensionnel, a été proposé. Le dispositif est très pertinent pour construire des commutateurs optiques et des portes logiques, qui sont des composants clés pour l'optique intégrée. Le réseau est de géométrie carrée avec des tiges en Si suspendues dans l'air. Dans la structure proposée (figure (II.21a)), le rayon r et la constante diélectrique choisis sont, respectivement, $r = 0,35a$ et $\epsilon = 12,0$. Pour transmettre le faisceau, un défaut linéaire a été créé dans la direction Γ -X en réduisant la taille des 25 trous à $0,274a$. Le principe de cette opération a été de créer un milieu à faible indice de réfraction afin qu'une partie du faisceau se propage et que l'autre se réfléchisse. La présence de faisceaux transmis et de faisceaux réfléchis pour les signaux d'entrée produit un déphasage en sortie. La structure de porte OR et XOR a été proposée en faisant varier la différence de phase entre le faisceau réfléchi et le faisceau transmis. Lorsque la différence de phase entre les faisceaux d'entrée, comme le montre la figure (II.21b), est de $2k\pi + \pi/2$, la sortie O_1 fonctionne comme une porte OR et O_2 comme une porte XOR. En revanche, lorsque la différence de phase est de $2k\pi - \pi/2$ en raison de la présence d'une différence de phase de $-\pi/2$ entre les faisceaux d'entrée (figure (II.21c)), O_1 fonctionne comme une porte XOR et O_2 comme une porte OR. La gamme de fréquences sélectionnée (a/λ) pour le dispositif a été de 0,188 à 0,199, et le rapport de contraste le plus élevé obtenu a été de 17 dB.

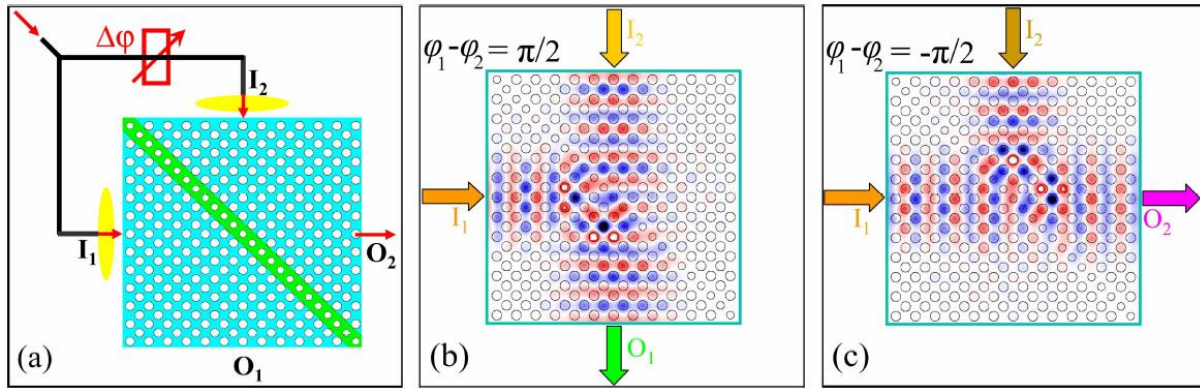


Figure II.21 : (a) La structure pour les portes logiques OR et XOR avec déphaseur (b) lorsque la différence de phase est $\pi/2$, (c) lorsque la différence de phase est $-\pi/2$. [52]

II.7: Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un bref historique sur les cristaux photoniques, suivi de leurs caractéristiques et leurs propriétés. La bande interdite optique et les différents types de défauts ont été étudiés, pour pouvoir comprendre la conception des composants optique à base de CPs à savoir les portes logiques, où on a présenté leur principe de base, leurs concepts et un état de l'art ; à partir duquel, on a compris que les portes logiques ont des propriétés spécifiques à savoir la bande interdite et le contrôle des défauts créés comme les cavités, et les guides d'ondes. En modifiant la géométrie et les dimensions des tiges diélectriques ainsi que le type du réseau (connecté ou déconnecté), des résultats optimaux peuvent être obtenus pour améliorer les performances adaptées à la suite de notre travail, qui a pour objectif l'étude des portes logiques optiques à base cristaux photoniques.

II.7 : Références

- [1] Rayleigh, L. (1887). XVII. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 24(147), 145-159.
- [2] Johnson, S. G., & Joannopoulos, J. D. (2003). Introduction to photonic crystals: Bloch's theorem, band diagrams, and gaps (but no defects). Photonic Crystal Tutorial, 1-16.
- [3] Zhu, Z. H., Ye, W. M., Ji, J. R., Yuan, X. D., & Zen, C. (2006). High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals. Optics Express, 14(5), 1783-1788.
- [4] Bykov, V. P. (1975). Spontaneous emission from a medium with a band spectrum. Soviet Journal of Quantum Electronics, 4(7), 861.
- [5] Ohtaka, K. (1979). Energy band of photons and low-energy photon diffraction. Physical Review B, 19(10), 5057.
- [6] Yablonovitch, E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Physical review letters, 58(20), 2059.
- [7] John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Physical review letters, 58(23), 2486.
- [8] Ho, K. M., Chan, C. T., & Soukoulis, C. M. (1990). Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. Physical Review Letters, 65(25), 3152.
- [9] Grüning, U., Lehmann, V., & Engelhardt, C. M. (1995). Two-dimensional infrared photonic band gap structure based on porous silicon. Applied physics letters, 66(24), 3254-3256.
- [10] Gruning. U., Lehman. V., Englehardt. C. M., 1998. Small scale photonic crystals in near visible large scale inverted Opals, Applied Physics Letters, 82.
- [11] Ohtaka. K., 1979. Energy band of photons and low-energy photon diffraction, Physical Review B, 56(20), pp. 5057-5067
- [12] Johnson, S. G., & Joannopoulos, J. D. (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis. Optics express, 8(3), 173-190.

Chapitre II : Historique et principes de performance des portes logiques à base des cristaux photoniques

- [13] John, S. G. J., Joannopoulos, D., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). Photonic crystals: molding the flow of light. In Princeton University of Press: Princeton, NJ, USA.
- [14] Johnson, S. G., & Joannopoulos, J. D. (2003). Introduction to photonic crystals: Bloch's theorem, band diagrams, and gaps (but no defects). Photonic Crystal Tutorial, 1-16.
- [15] Foteinopoulou, S., 2003. Electromagnetic wave propagation in two-dimensional photonic crystals. Retrospective Theses and Dissertations
- [16] Agio, M., Lidorikis, E., & Soukoulis, C. M. (2000). Impurity modes in a two-dimensional photonic crystal: coupling efficiency and Q factor. JOSA B, 17(12), 2037-2042.
- [17] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., and Meade, R. D., 2008. Photonic crystals: Modeling the flow of light, Second Ed Princeton university Press.
- [18] Johnson, S. and Joannopoulos, J.D., 2003. Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But No Defects) . MIT Tutorial.
- [19] Scholz, S., Hess, O., & Rühle, R. (1998). Dynamic cross-waveguide optical switching with a nonlinear photonic band-gap structure. Optics Express, 3(1), 28-34.
- [20] Centeno, E., & Felbacq, D. (2000). Optical bistability in finite-size nonlinear bidimensional photonic crystals doped by a microcavity. Physical Review B, 62(12), R7683.
- [21] Fan, S. (2002). Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems. Applied Physics Letters, 80(6), 908-910.
- [22] Soljačić, M., Ibanescu, M., Johnson, S. G., Fink, Y., & Joannopoulos, J. D. (2002). Optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals. Physical Review E, 66(5), 055601.
- [23] Mingaleev, S. F., & Kivshar, Y. S. (2002). Nonlinear transmission and light localization in photonic-crystal waveguides. JOSA B, 19(9), 2241-2249.
- [24] Locatelli, A., Modotto, D., Paloschi, D. and De Angelis, C., 2004. All optical switching in ultrashort photonic crystal couplers. Optics Communications, 237(1-3), pp.97-102.
- [25] Cuesta-Soto, F., Martínez, A., Garcia, J., Ramos, F., Sanchis, P., Blasco, J., & Martí, J. (2004). All-optical switching structure based on a photonic crystal directional coupler. Optics Express, 12(1), 161-167.

- [26] Zhu, Z. H., Ye, W. M., Ji, J. R., Yuan, X. D., & Zen, C. (2006). High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals. *Optics Express*, 14(5), 1783-1788.
- [27] Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, B. (2007). Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals. *Optics Express*, 15(15), 9287-9292.
- [28] Shinya, A., Matsuo, S., Tanabe, T., Kuramochi, E., Sato, T., Kakitsuka, T., & Notomi, M. (2008). All-optical on-chip bit memory based on ultra high Q InGaAsP photonic crystal. *Optics express*, 16(23), 19382-19387.
- [29] Liu, Q., Ouyang, Z., Wu, C. J., Liu, C. P., & Wang, J. C. (2008). All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals. *Optics express*, 16(23), 18992-19000.
- [30] Lee, K. Y., Lin, J. M., Yang, Y. C., Yang, Y. B., Wu, J. S., Lin, Y. J., & Lee, W. Y. (2008, November). The designs of XOR logic gates based on photonic crystals. In *Optoelectronic Materials and Devices III* (Vol. 7135, p. 71353Y). International Society for Optics and Photonics.
- [31] Andalib, P., & Granpayeh, N. (2009). All-optical ultracompact photonic crystal AND gate based on nonlinear ring resonators. *JOSA B*, 26(1), 10-16.
- [32] Jung, Y. J., Yu, S., Koo, S., Yu, H., Han, S., Park, N., ... & Lee, S. (2009, August). Reconfigurable all-optical logic AND, NAND, OR, NOR, XOR and XNOR gates implemented by photonic crystal nonlinear cavities. In *Conference on lasers and electro-optics/Pacific Rim* (p. TuB4_3). Optical Society of America.
- [33] Lee, K. Y., Yang, Y. C., Lin, Y. J., Lee, W. Y., Lee, C. C., & Wong, S. H. (2009, November). The designs of 4×2 encoder based on photonic crystals. In *2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP)* (Vol. 2009, pp. 1-7). IEEE.
- [34] Ishizaka, Y., Kawaguchi, Y., Saitoh, K., & Koshiba, M. (2010, September). Design of all-optical XOR and AND logic gates based on multi-mode interference devices. In *2010 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling* (pp. 53-55). IEEE.
- [35] Salmanpour, A., Mohammadnejad, S., & Bahrami, A. (2015). Photonic crystal logic gates: an overview. *Optical and Quantum Electronics*, 47(7), 2249-2275.
- [36] Ishizaka, Y., Kawaguchi, Y., Saitoh, K. and Koshiba, M., 2011. Design of ultra compact

all-optical XOR and AND logic gates with low power consumption. *Optics Communications*, 284(14), pp.3528-3533.

[37] Notomi, M., Shinya, A., Mitsugi, S., Kuramochi, E., & Ryu, H. Y. (2004). Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs. *Optics express*, 12(8), 1551-1561.

[38] Shinya, A., Mitsugi, S., Kuramochi, E., Tanabe, T., Kim, G., Kira, G., ... & Notomi, M. (2005, March). Ultrasmall resonant tunneling/dropping devices in 2D photonic crystal slabs. In *Optoelectronic Integrated Circuits VII* (Vol. 5729, pp. 72-85). International Society for Optics and Photonics.

[39] Tameh, T. A., Isfahani, B. M., Granpayeh, N., & Javan, A. M. (2011). Improving the performance of all-optical switching based on nonlinear photonic crystal microring resonators. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 65(4), 281-287.

[40] Djavid, M., Monifi, F., Ghaffari, A., & Abrishamian, M. S. (2008). Heterostructure wavelength division demultiplexers using photonic crystal ring resonators. *Optics communications*, 281(15-16), 4028-4032.

[41] Mehdizadeh, F., Alipour-Banaei, H., & Serajmohammadi, S. (2013). Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator. *Journal of Optics*, 15(7), 075401.

[42] Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., & Kawakami, S. (1999). Self-collimating phenomena in photonic crystals. *Applied Physics Letters*, 74(9), 1212-1214.

[43] Witzens, J., Loncar, M., & Scherer, A. (2002). Self-collimation in planar photonic crystals. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(6), 1246-1257.

[44] Ishizaka, Y., Kawaguchi, Y., Saitoh, K., & Koshiba, M. (2011). Design of ultra compact all-optical XOR and AND logic gates with low power consumption. *Optics Communications*, 284(14), 3528-3533.

[45] Liu, W., Yang, D., Shen, G., Tian, H., & Ji, Y. (2013). Design of ultra-compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides. *Optics & Laser Technology*, 50, 55-64.

- [46] Rangaswamy, N. (2017). Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio. *Photonic Network Communications*, 34(1), 140-148.
- [47] D'souza, N. M., & Mathew, V. (2016). Interference based square lattice photonic crystal logic gates working with different wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 80, 214-219.
- [48] Pashamehr, A., Zavvari, M., & Alipour-Banaei, H. (2016). All-optical AND/OR/NOT logic gates based on photonic crystal ring resonators. *Frontiers of Optoelectronics*, 9(4), 578-584.
- [49] Mostafa, T. S., Mohammed, N. A., & El-Rabaie, E. S. M. (2019). Ultra-high bit rate all-optical AND/OR logic gates based on photonic crystal with multi-wavelength simultaneous operation. *Journal of Modern Optics*, 66(9), 1005-1016.
- [50] Alipour-Banaei, H., Serajmohammadi, S., & Mehdizadeh, F. (2017). All optical NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Optik*, 130, 1214-1221.
- [51] Serajmohammadi, S., & Absalan, H. (2016). All optical NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonator. *Information processing in Agriculture*, 3(2), 119-123.
- [52] Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, B. (2007). Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals. *Optics Express*, 15(15), 9287-9292.
- [53] Lavrinenko, A., Borel, P. I., Frandsen, L. H., Thorhauge, M., Harpøth, A., Kristensen, M., ... & Chong, H. M. H. (2004). Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components. *Optics Express*, 12(2), 234-248.

Chapitre III

Les portes logiques tout-optique à
base cristaux photoniques linéaires

III. Chapitre III : Les portes logiques tout-optique à base cristaux photoniques linéaires

III.1 Introduction :

Dans le monde de la communication, la vitesse de transfert des données et la bande passante sont des paramètres essentiels pour les réseaux de télécommunications modernes [1]. Les réseaux de communications optiques ont une large bande avec une vitesse acceptable, ce qui permet d'envoyer et recevoir énormément de données puisqu'ils utilisent la lumière pour le transfert d'informations [2]. En revanche, le problème de la conversion d'un signal électrique en un signal optique (et vice versa) dans les réseaux de télécommunications optiques engendre une perte énergétique et temporelle. L'efficacité de ces systèmes est fortement diminuée. Par conséquent, la tendance à remplacer les processeurs existants par des processeurs tout optiques a augmenté [3]. Les portes logiques sont les principaux composants de l'unité de traitement de l'information. C'est pour cela qu'une grande attention a été accordée à la conception de portes logiques optiques [4]. Les portes logiques tout-optiques basées sur les cristaux photoniques (CPs) ont attiré l'attention du monde entier en raison de leur faible puissance de commutation et de la très grande vitesse de transfert des données [5]. Jusqu'à présent, de nombreux efforts ont été déployés pour concevoir des portes logiques tout-optiques [6-15], tandis que peu d'études se sont concentrées sur le développement de structures multifonctionnelles. Ces structures offrent une flexibilité considérable dans la conception de systèmes numériques.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle structure pour la mise en œuvre des portes logiques de type NOT, XOR et XNOR tout-optique, basée sur une cavité résonnante et l'effet d'interférence.

Le paramètre le plus important pour examiner l'efficacité des portes logiques tout-optiques est le rapport de contraste. Le rapport de contraste est défini comme suit [16] :

$$CR \text{ (dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} \quad \text{III.1}$$

Où P_1 est la puissance de sortie pour le niveau logique « 1 » et P_0 est la puissance de sortie pour « 0 » logique. Un autre paramètre permettant d'examiner l'efficacité des circuits logiques est le temps de réponse, qui est représenté la vitesse de transmission des données dans les circuits logiques. Selon le type de résonance utilisé pour la conception, le temps de réponse

sera différent. Un temps de réponse plus court se traduira par des vitesses de transmission de données très élevées [17].

III.2 Description de la structure initiale

La structure initiale utilisée pour la conception des portes logiques tout-optiques proposées est un réseau carré de 20 colonnes $\times$ 14 lignes, de tiges de silicium avec un indice de réfraction de 3,43 suspendues dans l'air (figure (III.1)). Le rayon des tiges diélectriques est de $r/a=0,2$, où $a=520$ nm est la constante du réseau.

La structure de bande de la structure initiale montre l'existence deux bandes interdites photoniques $0.28 < a/\lambda < 0.42$ et $0.73 < a/\lambda < 0.74$ pour le mode TE seulement, soit en termes de longueur d'onde $1.23\mu\text{m} < \lambda < 1.85\mu\text{m}$ et $0.70\mu\text{m} < \lambda < 0.71\mu\text{m}$ respectivement comme le montre sur la figure (III.2). Nous utiliserons la première bande qui correspond à la troisième fenêtre des télécommunications.

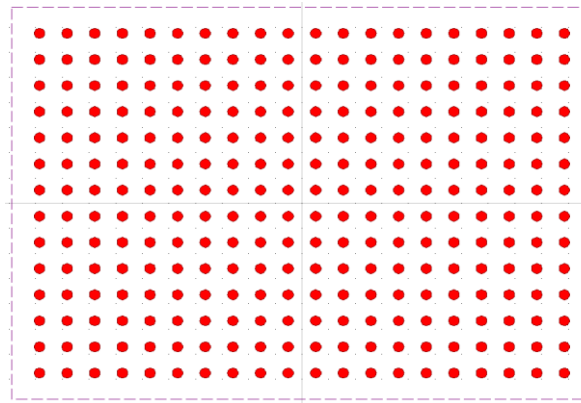


Figure III.1 : Structure initiale.

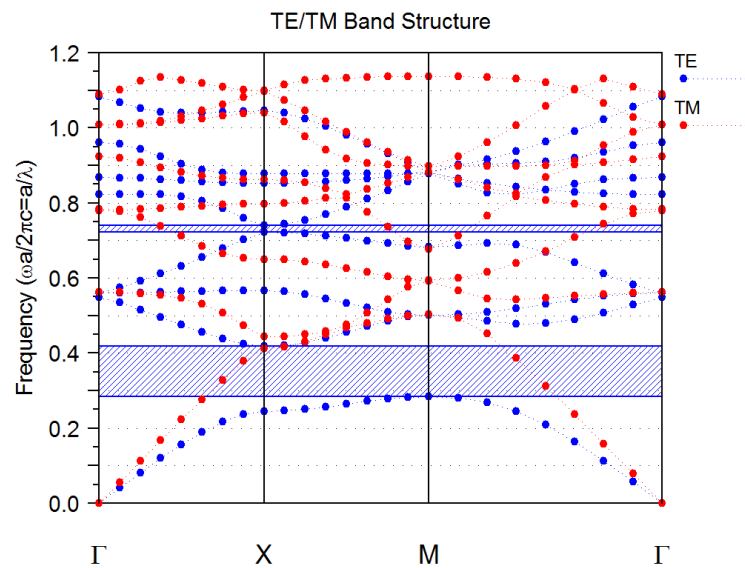


Figure III.2 : Diagramme de bande.

Le principe de fonctionnement de la porte logique NOT est schématisé par la figure (III.3). Les deux ports d'entrées sont nommés 'Bias' et 'Input', et le port de sortie est nommé 'Output'. Chaque port est connecté à la cavité résonnante par un guide d'onde.

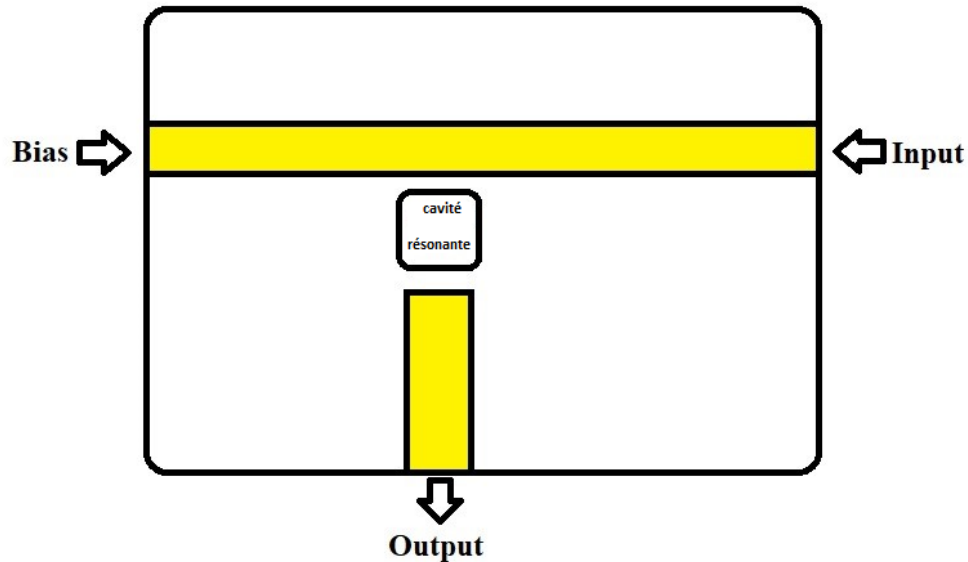


Figure III.3 : Schéma de principe de la porte logique 'NOT'.

La conception initiale de la porte logique tout-optique consiste en trois ports qui sont couplés entre eux par une cavité résonnante par un guide d'onde selon la figure (III.4).

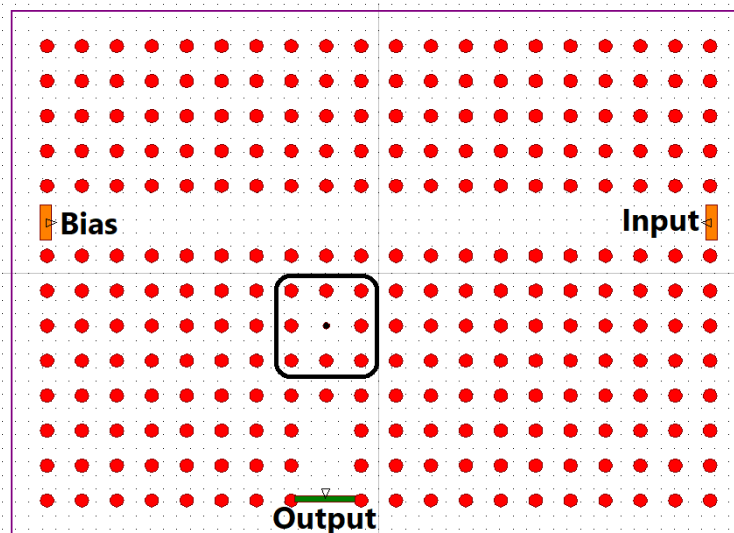


Figure III.4 : Conception finale de notre proposition de porte logique NOT tout-optique.

Cette structure est optimisée en faisant varier le rayon de la cavité, pour obtenir un facteur de qualité $Q = 1192$, le rayon de la tige de la cavité résonnante a été modifié pour

obtenir des performances très élevées. La figure (III.5) montre un pourcentage de transmission de 87% autour de la longueur d'onde centrale $\lambda = 1550$ nm.

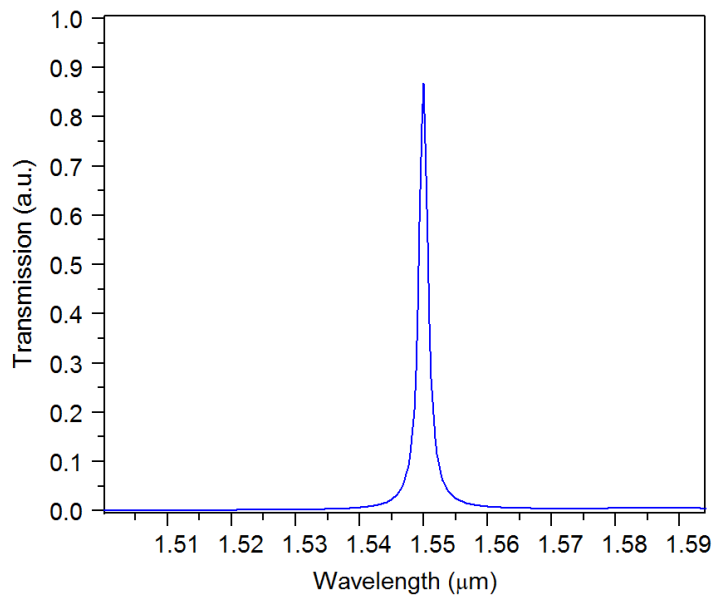


Figure III.5 : Spectre de transmission linéaire de la cavité résonante.

III.3 Résultats et discussion

III.3.1 Résultats de la simulation de la porte logique 'NOT'

Les états de fonctionnement proposés pour la porte logique 'NOT' sont résumés dans le tableau (III.1). D'après la figure 4 et le tableau (III.1), le 'bias' est placé en permanence au niveau logique « 1 », ce port contrôle le signal. Si l'intensité normalisée du signal de sortie est supérieure ou égale à 50 %, le niveau logique est considéré comme étant « 1 » logique et s'il est inférieur ou égal à 5 %, il est considéré comme un « 0 » logique, comme le montre la figure (III.6).

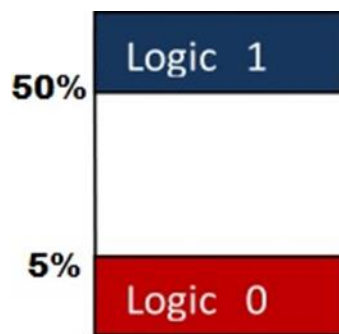


Figure III.6 : Plages de niveaux de transmission.

Tableau III.1. Table de vérité et puissance optique en sortie pour la porte logique 'NOT' tout optique.

Table III-1 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour la porte logique ‘NOT’ tout optique.

Bias	Input	Output logic	Rapport de contraste (CR)	Temps de réponse	Débit binaire
Puissance d'entrée	Puissance d'entrée	Puissance de sortie normalisée	25.08 dB	8.33ps	0.12Tbit/s
1 (P_{in})	0	1(0.87 P_{in})			
1 (P_{in})	1(P_{in})	0 (0.0027 P_{in})			

➡ **Cas 1 :** ‘Bias’ = 1, ‘Input’ = 0. Le signal optique ‘Pin’ à l’entrée de ‘Bias’ se couple à la cavité résonnante en utilisant le phénomène de piégeage de la lumière et il est transmis au port de sortie ‘Output = 1’ avec une efficacité de 87% à la longueur d’onde 1550 nm, comme la montre sur les figures (III.7a) et (III.8a).

➡ **Cas 2 :** ‘Bias’ = 1, ‘Input’ = 1. Les entrées du signal interfèrent destructivement, donnant un signal de sortie ‘Output = 0’. Dans ce cas, le moniteur de sortie reçoit une très faible puissance, jusqu’à 0,0027% de la puissance d’entrée ‘Pin’, comme le montrent les figures (III.7b) et (III.8b).

La porte ‘NOT’, proposée, est comparée avec plusieurs portes logiques présentées dans [14, 18, 19, 20, 21]. Le tableau (III.2) montre que la porte logique ‘NOT’ proposée est plus petite en taille que les autres portes avec un rapport de contraste très élevé.

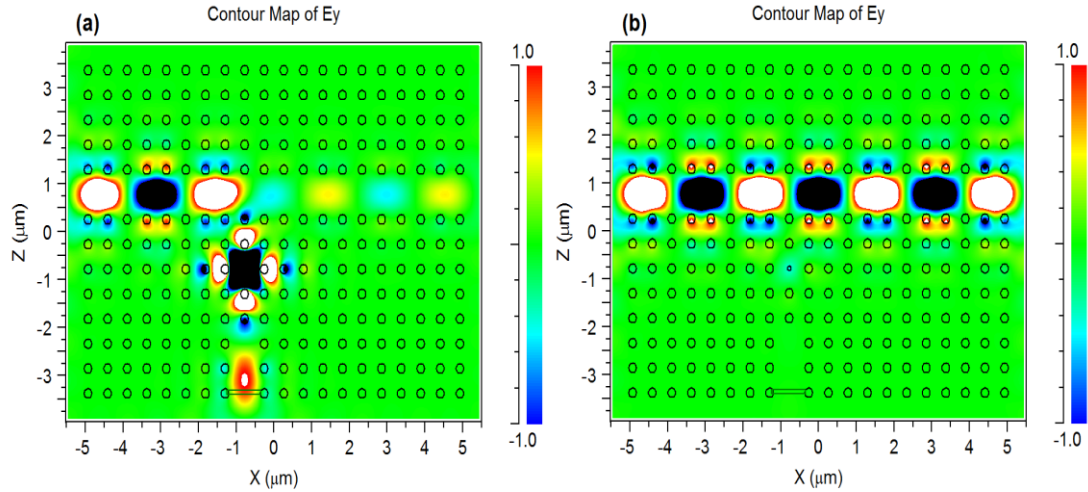


Figure III.7 : Distribution du champ optique pour différents états de la porte NOT proposée pour : (a) Bias=1, Input=0. (b) Bias=1, Input=1.

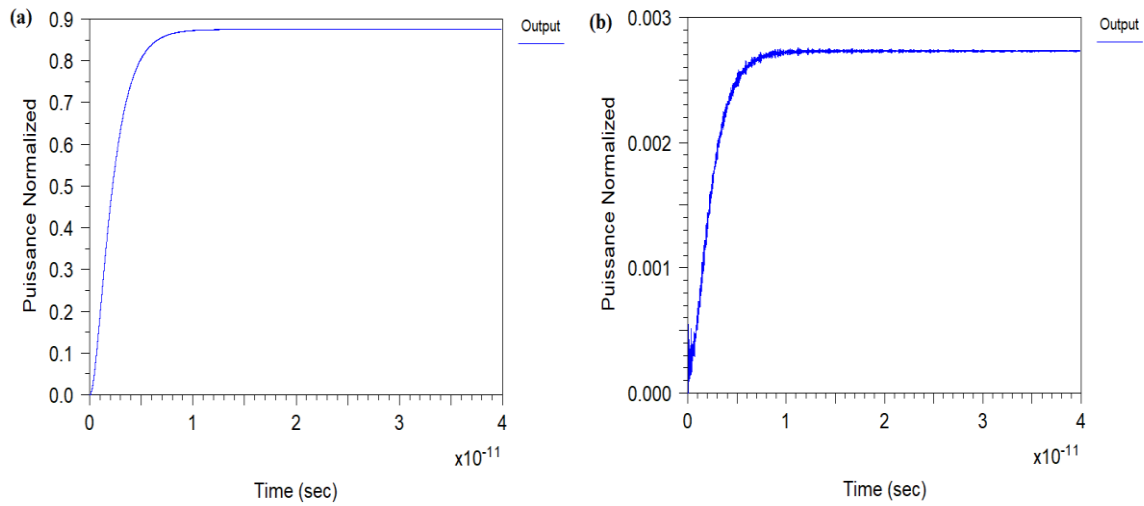


Figure III.8 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte logique 'NOT' proposée pour:(a) Bias=1, Input=0. (b) Bias=1, Input=1.

Table III-2 : Comparaison des résultats de la porte NOT proposée avec ceux des travaux de recherches précédents.

	Longueur d'onde de fonctionnement, (nm)	Taille de la structure, (μm^2)	CR	Temps de réponse, (ps)
Structure NOT proposée	1550	85.8	25.08	8.33
Bahabady-Olyaei [14]	1550	252	20.53	0.466
Singh & Rawal [18]	1550	122	5	-
Ghadrdan & Mansouri-Birjandi [19]	1550	144	10.79	0.84
Fu et al. [20]	1550	558	20	-
Jianga et al. [21]	-	729	9.33	-

III.3.2 Résultats de la simulation de la porte logique ‘XOR’

L’un des intérêts des portes logiques tout-optiques basées sur les cristaux photoniques est de pouvoir utiliser une même structure pour plusieurs portes. La structure proposée sert, non seulement, de porte ‘NOT’, mais elle peut, également, être utilisée comme porte ‘XOR’. La figure (III.9) présente un schéma de principe de la porte logique XOR proposée.

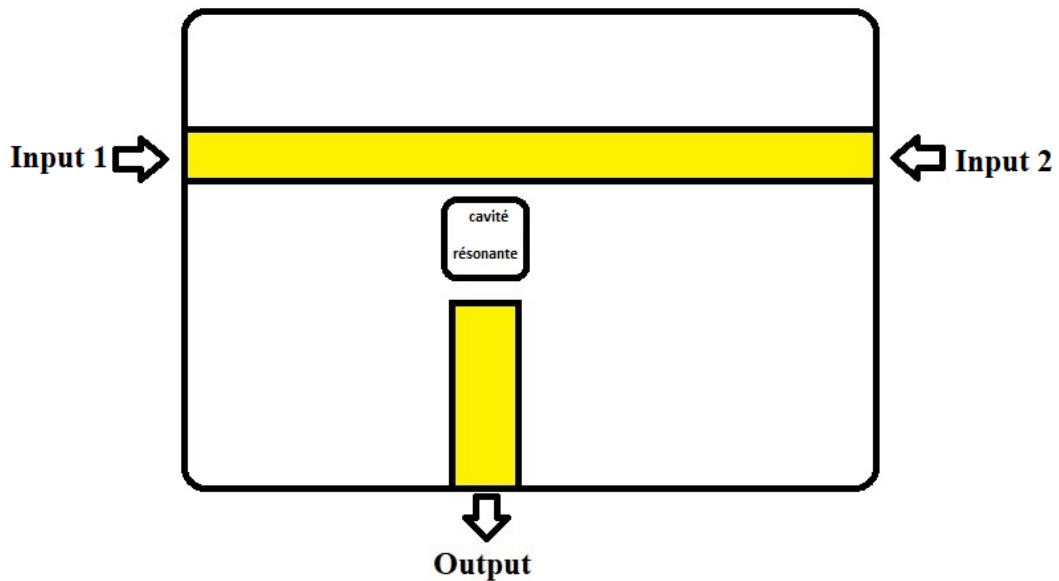


Figure III.9 : Schéma de principe de la porte logique XOR proposée.

D’après la figure (III.10) et le tableau (III. 3), la porte ‘XOR’ est composée de deux entrées (Input 1 et Input 2) et de la sortie (Output).

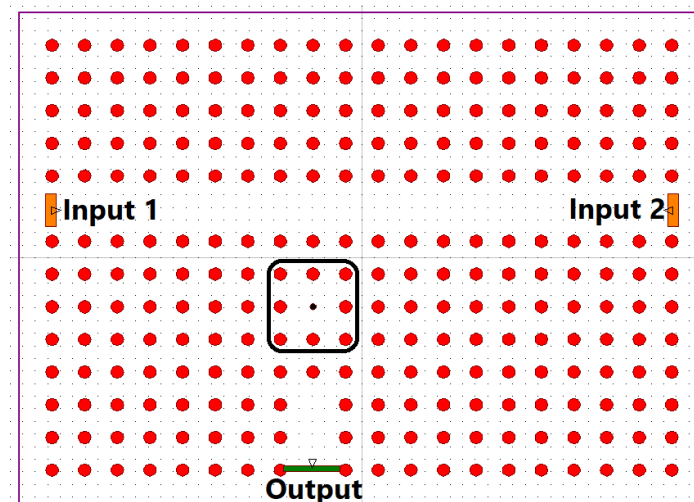


Figure III.10 : La conception finale de la porte logique XOR tout-optique proposée.

Table III-3 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour la porte logique XOR.

Bias	Input	Output logic	Rapport de contraste	Temps de réponse (ps)	Débit binaire
Puissance ($W/\mu m^2$)	Puissance ($W/\mu m^2$)	Puissance normalisée	25.03 dB	8.33ps	0.12Tbit/s
0	0	0			
0	1(P_{in})	1(0.86 P_{in})			
1(P_{in})	0	1 (0.87 P_{in})			
1 (P_{in})	1(P_{in})	0 (0.0027 P_{in})			

Pour tester et simuler le fonctionnement de la structure proposée, on peut examiner les cas suivants :

- Cas 1 : ‘Input 1’ = ‘Input 2’ = 0. Il n’y a pas de transmission dans la structure, et le port de sortie est donc égal à « 0 », comme le montrent les figures (III.11a) et (III.12a) ;
- Cas 2 et cas 3 : (‘Input 1’ = 0 & ‘Input 2’ = 1), et (‘Input 1’ = 1 & ‘Input 2’ = 0). Le signal passe de la cavité résonante et atteint la sortie. Dans ces deux cas, la sortie reçoit jusqu’à 86 % et 87 % de l’intensité de l’entrée ‘Pin’ pour la longueur d’onde 1550 nm, comme le montrent les figures (III.11b), (III.11c), (III.12b) et (III.12c);
- Cas 4 : ‘Input’ = ‘Input 2’ = 1. Les entrées du signal interfèrent destructivement, le signal de sortie ‘Output = 0’, et la sortie reçoit jusqu’à 0,0027% de la puissance d’entrée ‘Pin’, selon les figures (III.11d) et (III.12d). Le tableau (III.3) donne un rapport de contraste de 25,03 dB, un débit binaire de 0.12 Tbit/s et un temps de réponse de 8.33 ps.

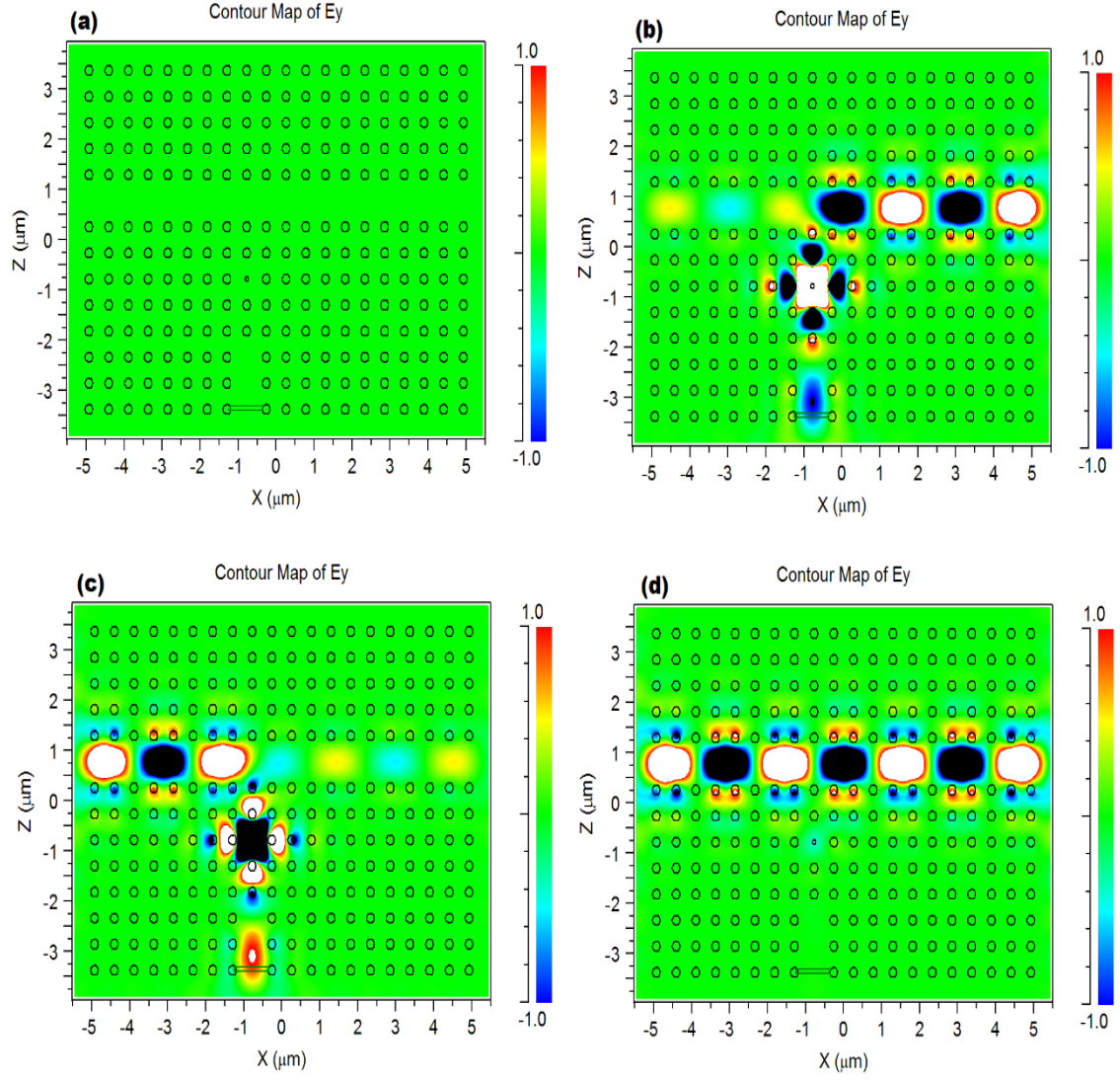


Figure III.11 : Distribution du champ optique pour les 4 états de la porte 'XOR' proposée : (a) Input 1 = Input 2 = 0. (b) Input 1 = 0, Input 2 = 1. (c) Input 1 = 1, Input 2 = 0. (d) Input 1 = Input 2 = 1.

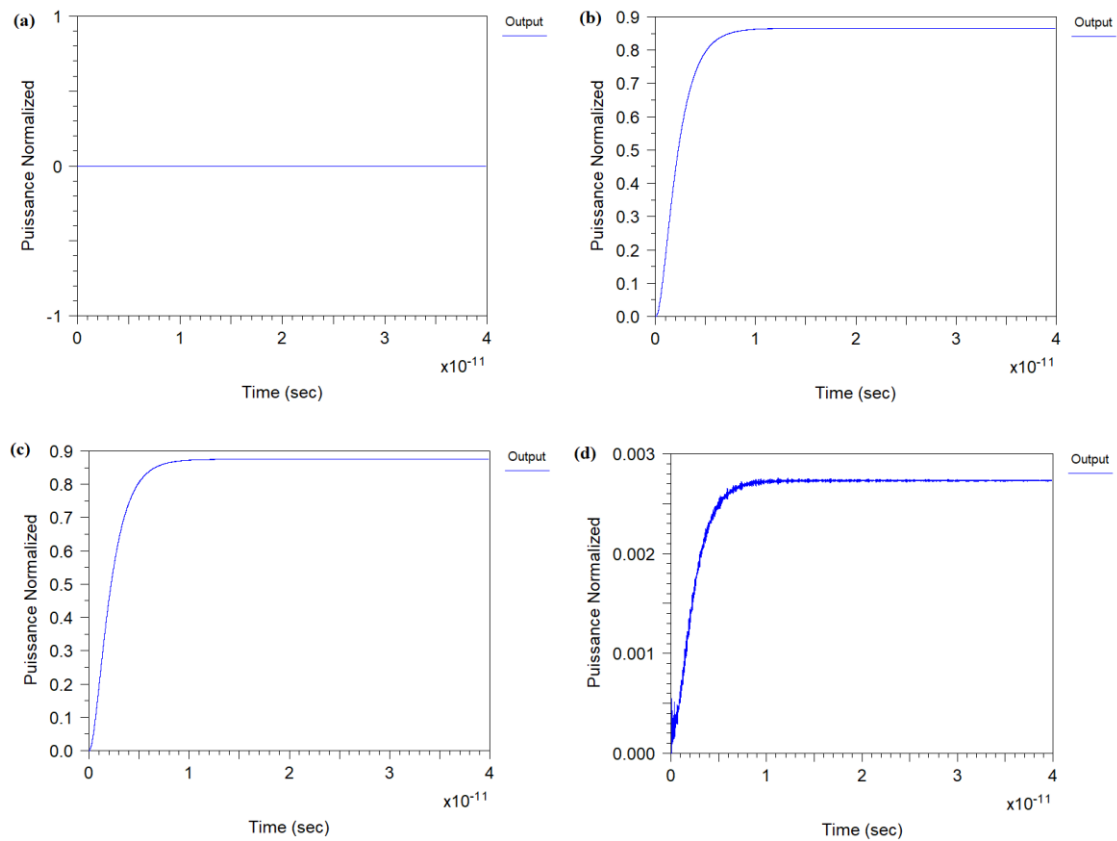


Figure III.12 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte XOR proposée pour :(a) Input 1 = Input 2 = 0. (b) Input 1 = 0, Input 2 =1. (c) Input 1 =1, Input 2 =0. (d) Input 1= Input 2 =1.

Table III-4 : Comparaison des résultats de la porte XOR proposée avec ceux des travaux de recherches précédents.

	Longueur d'onde de fonctionnement (nm)	Taille de la structure, (μm^2)	CR	Temps de réponse (ps)
Structure XOR proposée	1550	85.8	25.03	8.33
Ghadrdan&Mansouri-Birjandi [22]	1550	265	5.67	0.85
Fu et al. [20]	1550	558	20.48	-
Bahabady&Olyaei [14]	1550	252	19.95	0.466
Jianga et al. [21]	-	729	9.33	-

Notre structure 'XOR' a été comparée à plusieurs structures présentées dans les travaux de recherches précédents [14, 20, 21, 22]. Le tableau (III.4) montre que la porte logique 'XOR' proposée a un rapport de contraste très élevé et une taille plus petite que les autres structures.

III.3.3 Résultats de la simulation de 'XNOR'

Cette partie décrit les résultats obtenus et les performances optiques pour la structure XNOR proposée. Cette porte optique est une porte très importante pour la conception de comparateurs logiques, d'additionneurs complets, de demi-additionneurs optiques, de contrôles de parité en treillis et d'autres circuits logiques basés sur des cristaux photoniques bidimensionnels. L'idée de base du fonctionnement du XNOR optique est basée sur l'utilisation de la cavité résonante ayant une longueur d'onde de résonance de 1550 nm. Cette porte est composée de trois entrées (Bias, Input 1 et Input 2) et de la sortie (Output), comme le montre le schéma de la figure (III.13) et la structure proposée de la porte XNOR donnée par la figure (III.14).

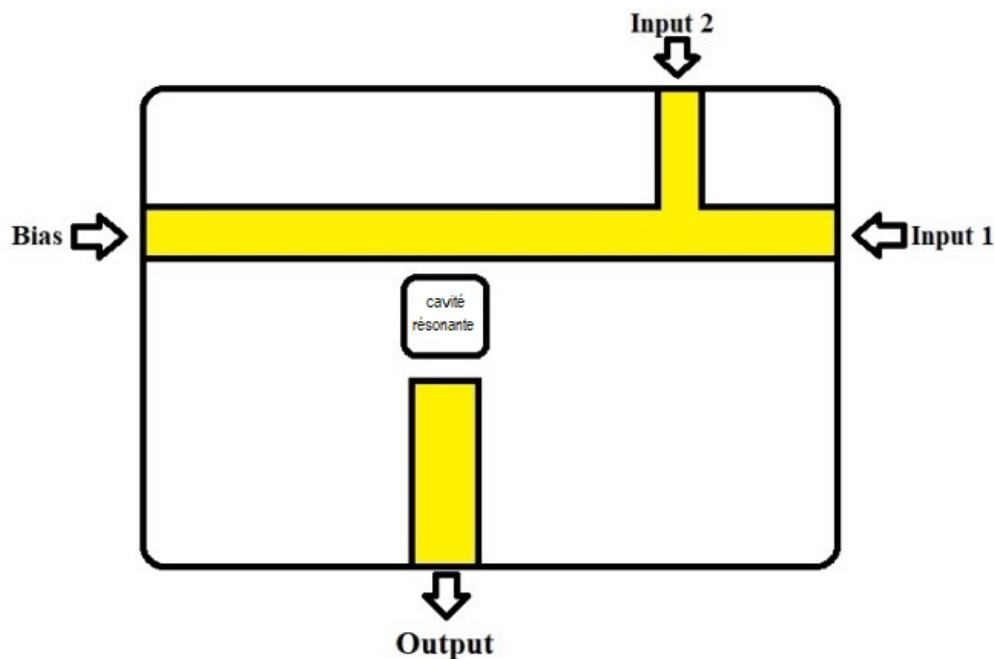


Figure III.13 : Schéma de principe de la porte XNOR.

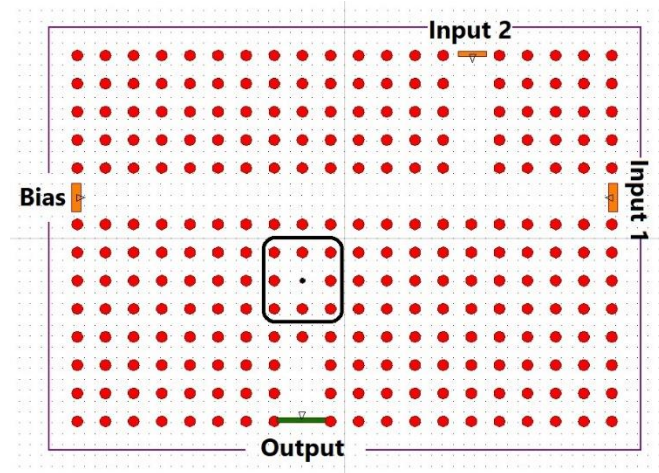


Figure III.14 : Conception finale de la porte logique XNOR proposée.

Pour décrire et réaliser le fonctionnement de cette porte, les scénarios suivants peuvent être examinés :

- ➡ **Cas 1 :** 'Bias' = 1, 'Input 1' = 'Input 2' = 0. Le signal optique 'Pin' à l'entrée de 'Bias' se couple à la cavité résonante et circule directement vers le port de sortie 'Output = 1' avec un pourcentage de transmission de 56 % à une longueur d'onde de $\lambda = 1550$ nm, comme le montrent les figures (III.15a) et (III.16a).
- ➡ **Cas 2 :** 'Bias' = 1, 'Input 1' = 0, 'Input 2' = 1. Les signaux d'entrées s'interfèrent destructivement ce qui se traduit par un signal de sortie 'Output = 0'. Dans ce cas, le moniteur de sortie reçoit jusqu'à 0,02 % de la puissance d'entrée du signal, comme le montrent les figures (III.15b) et (III.16b).
- ➡ **Cas 3 :** 'Bias' = 1, 'Input 1' = 1, 'Input 2' = 0. Les signaux d'entrées s'interfèrent destructivement ce qui se traduit par un signal de sortie 'Output = 0'. Dans ce cas, la transmission au niveau de la sortie 'Output = 0' est quasi nulle, environ 0,003 %, comme le montrent les figures (III.15c) et (III.16c).
- ➡ **Cas 4 :** 'Bias' = 1, 'Input 1' = 'Input 2' = 1. Comme le montrent les figures (III.15d) et (III.16d), les deux entrées 'Input 1' et 'Input 2' circulent, ensemble, et se dirigent directement vers la sortie par couplage avec la cavité résonante avec une efficacité de transmission de 71%, empêchant, ainsi, les interférences destructives avec le signal d'entrée 'Bias' (Tableau (III.5)).

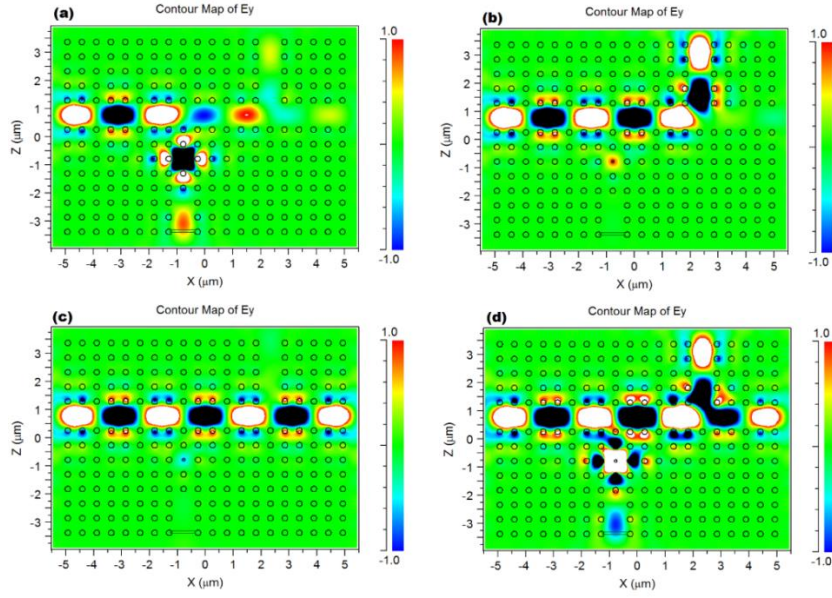


Figure III.15 : Distribution du champ optique pour les 4 états de la porte 'XNOR' proposée pour : Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 0. (b) Bias =1, Input 1 = 0, Input 2 = 1. (c) Bias =1, Input 1 = 1, Input 2 = 0. (d) Bias = 1, Input 1= Input 2 = 1.

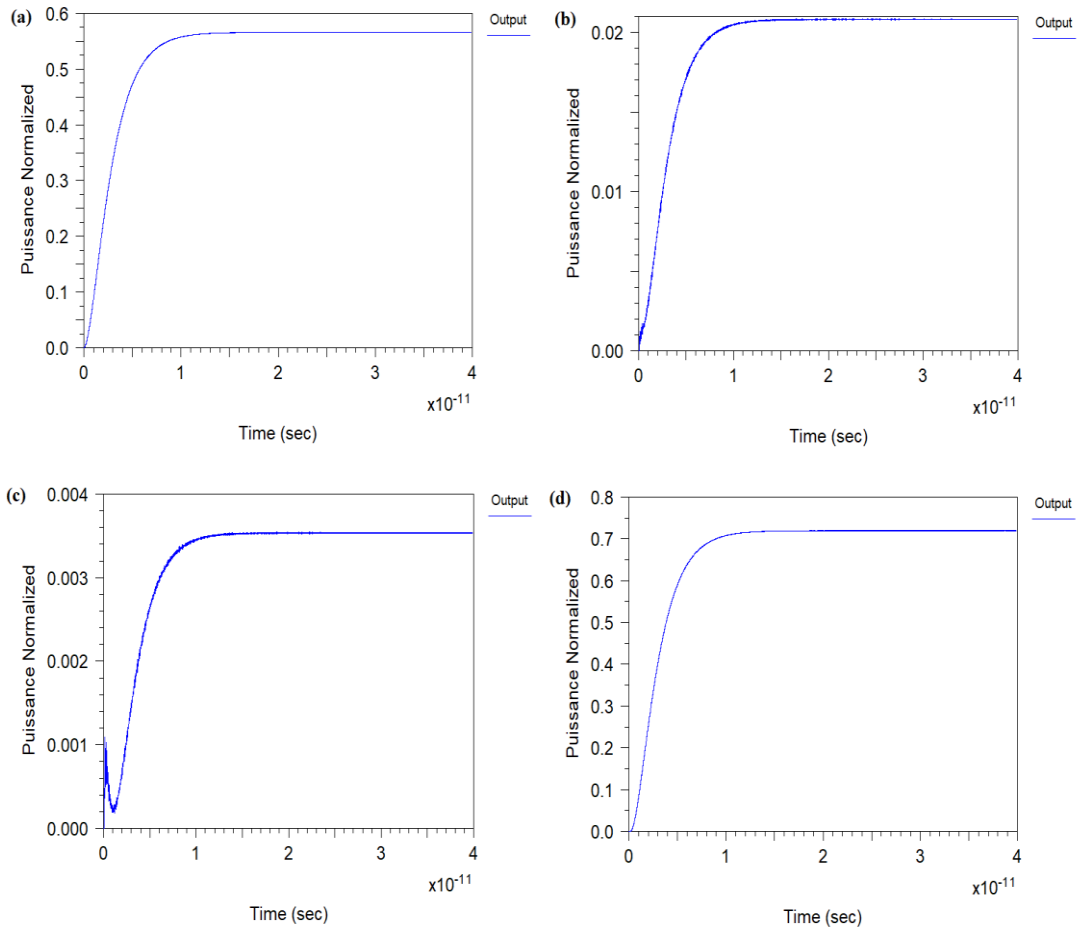


Figure III.16 : Courbe d'évolution de la transmission en fonction du temps de la porte 'XNOR' proposée pour : (a) Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 0. (b) Bias = 1, Input 1 = 0, Input 2 = 1. (c) Bias = 1, Input 1 = 1, Input 2 = 0. (d) Bias = 1, Input 1 = Input 2 = 1.

Chapitre III : Les portes logiques tout-optique à base cristaux photoniques linéaires

Comme le montre le tableau (III.6), la porte XOR proposée, comparée à celles présentées dans les travaux de Moniem et Sun et al [23, 24], est plus petite en taille avec un rapport de contraste très élevé.

Table III-5 : Table de vérité et puissance optique en sortie pour une porte logique 'XNOR' tout optique.

Bias	Input 1	Input 2	Output logic	Rapport de contraste (CR)	Temps de réponse	Débit binaire
Puissance (W/ μm^2)	Puissance (W/ μm^2)	Puissance (W/ μm^2)	Puissance normalisée	14.47 dB	8.33ps	0.12Tbit/s
1 (P_{in})	0	0	1 (0.56 P_{in})			
1 (P_{in})	0	1 (P_{in})	0 (0.02 P_{in})			
1 (P_{in})	1 (P_{in})	0	0(0.003 P_{in})			
1 (P_{in})	1 (P_{in})	1(P_{in})	1 (0.71 P_{in})			

Table III-6 : Tableau comparatif pour la porte 'XNOR'.

	Longueur d'onde de fonctionnement, (nm)	Taille de la structure, (μm^2)	CR	Temps de réponse, (ps)
Structure XOR proposée	1550	85.8	14.47	8.33
Tamer-Moniem [23]	1550	735	-	-
Sun Xiao-Wen et al [24]	1550	625	-	-

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, de nouvelles portes tout-optique NOT, XOR et XNOR basées sur l'effet des interférences ont été proposées et démontrées par des simulations dans la gamme de longueur d'onde des télécommunications. La structure proposée est ultra-compacte avec une surface de $85,8 \mu\text{m}^2$, caractérisée par une faible consommation d'énergie, une facilité de conception et une simplicité de fonctionnement par rapport à d'autres portes logiques à structure complexe, et elle est adaptée aux circuits tout-optiques intégrés. Pour les portes logiques tout optique NOT, XOR et XNOR proposées, les rapports de contraste sont respectivement de 25.08, 25.03 et 14.47 dB, avec un temps de réponse et un débit binaire de 8,33 ps et 0,12 Tbit/s respectivement. La méthode des différences finies dans le domaine temporel bidimensionnelle (2D-FDTD : Bidimensionnel- Finite Difference Time Domain) démontre le comportement optique de la structure prévue et le diagramme de dispersion est extrait à l'aide de la méthode des ondes planes (PWE : Plane Wave Expansion).

III.5 Références

- [1] haq Shaik, E., &Rangaswamy, N. (2017, February). High contrast all-optical xor gate with t-shaped photonic crystal waveguide using phase-based interference. In 2017 Fourteenth international conference on wireless and optical communications networks (WOCN) (pp. 1-3). IEEE.
- [2] Wabnitz, S., &Eggleton, B. J. (2015). All-optical signal processing. Springer Series in Optical Sciences, 194.
- [3] Goodarzi, A., &Ghanaatshoar, M. (2018). Coherent all-optical transistor based on frustrated total internal reflection. Scientific Reports, 8(1), 1-8.
- [4] Matsumoto, T., Komatsu, K., Hosoya, G., &Yashima, H. (2018). Performance of all-optical AND gate using photonic-crystal QDSOA at 160 Gb/s. Electronics Letters, 54(9), 580-582.
- [5] Almeida, L. C., de Sousa, F. M., de Sousa, F. B., de Oliveira, J. E., Kumar, S., Paschoal, W., & Costa, M. B. (2019). Design and performance analysis of all-optical NAND logic gate using 2-D photonic crystal. Advanced Science, Engineering and Medicine, 11(4), 251-254.
- [6] Kotb, A., Zoiros, K. E., & Guo, C. (2019). Ultrafast performance of all-optical AND and OR logic operations at 160 Gb/s using photonic crystal semiconductor optical amplifier. Optics & Laser Technology, 119, 105611.
- [7] Parandin, F., &Karkhanehchi, M. M. (2019). Low size all optical XOR and NOT logic gates based on two-dimensional photonic crystals. Majlesi Journal of Electrical Engineering, 13(2), 1-5.
- [8] Kumar, A., &Medhekar, S. (2020). All optical NOR and NAND gates using four circular cavities created in 2D nonlinear photonic crystal. Optics & Laser Technology, 123, 105910.
- [9] Kumar, A., Kumar, S., &Raghuwanshi, S. K. (2014). Implementation of XOR/XNOR and AND logic gates by using Mach–Zehnder interferometers. Optik, 125(19), 5764-5767.
- [10] Swarnakar, S., Rathi, S., & Kumar, S. (2020). Design of all optical XOR gate based on photonic crystal ring resonator. Journal of Optical Communications, 41(1), 51-56.
- [11] Dekkiche, L., Naoum, R., &Hamam, H. (2011). A novel all optical and logic gate based on nonlinear photonic crystal. Sensor Letters, 9(6), 2162-2164.

- [12] Kouddad, E., &Naoum, R. (2020). Optimization of an all-optical photonic crystal NOT logic gate using switch based on nonlinear Kerr effect and ring resonator. *Sensor Letters*, 18(2), 89-94.
- [13] Rao, D. G. S., Swarnakar, S., & Kumar, S. (2020). Performance analysis of all-optical NAND, NOR, and XNOR logic gates using photonic crystal waveguide for optical computing applications. *Optical Engineering*, 59(5), 057101.
- [14] Mohebzadeh-Bahabady, A., &Olyaei, S. (2018). All-optical NOT and XOR logic gates using photonic crystal nano-resonator and based on an interference effect. *IET Optoelectronics*, 12(4), 191-195.
- [15] Parandin, F., & Reza Malmir, M. (2020). Reconfigurable all optical half adder and optical XOR and AND logic gates based on 2D photonic crystals. *Optical and quantum electronics*, 52(2), 1-8.
- [16] Singh, B. R., & Rawal, S. (2015). Photonic-crystal-based all-optical NOT logic gate. *JOSA A*, 32(12), 2260-2263.
- [17] Shaik, E. H., &Rangaswamy, N. (2018). Single photonic crystal structure for realization of NAND and NOR logic functions by cascading basic gates. *Journal of computational Electronics*, 17(1), 337-348.
- [18] Singh, B. R., & Rawal, S. (2015). Photonic-crystal-based all-optical NOT logic gate. *JOSA A*, 32(12), 2260-2263.
- [19] Ghadrhan, M., & Mansouri-Birjandi, M. A. (2013). All-optical NOT logic gate based on photonic crystals. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(4), 478.
- [20] Fu, Y., Hu, X., & Gong, Q. (2013). Silicon photonic crystal all-optical logic gates. *Physics letters A*, 377(3-4), 329-333.
- [21] Jiang, Y. C., Liu, S. B., Zhang, H. F., & Kong, X. K. (2014). Reconfigurable design of logic gates based on a two-dimensional photonic crystals waveguide structure. *Optics communications*, 332, 359-365.
- [22] Ghadrhan, M., & Mansouri-Birjandi, M. A. (2013). Concurrent implementation of all-optical half-adder and AND& XOR logic gates based on nonlinear photonic crystal. *Optical and Quantum Electronics*, 45(10), 1027-1036.

- [23] Moniem, T. A. (2017). All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators. *Quantum Electronics*, 47(2), 169.
- [24] Xiao-Wen, S., Xiu-Lun, Y., Xiang-Feng, M., Ji-Nan, Z., Yu-Rong, W., Yong-Kai, Y., & Guo-Yan, D. (2018). Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect. *Quantum Electronics*, 48(2), 178.

Chapitre IV

Les portes logiques optique à base
cristaux photoniques non-linéaires

IV. Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons d'abord concevoir des portes logiques électro-optiques à base des cristaux photoniques non-linéaire d'ordre 2 à effet Pockels. Ensuite nous allons concevoir des portes logiques tout optiques à base des cristaux photoniques non-linéaire d'ordre 3 par effet Kerr.

IV.2 Les portes logiques électro-optiques à base cristaux photoniques non-linéaire du second ordre (Effet Pockels)

Dans cette partie nous allons concevoir des portes logiques basées sur un résonateur en anneau en exploitant les propriétés des cristaux photoniques [1].

IV.2.1 Introduction

Ces dernières années, pour les ordinateurs à haute performance et les réseaux optiques à haut débit, les interconnexions optiques sont extrêmement intéressantes pour la technologie informatique afin de satisfaire les demandes des utilisateurs [2]. Pour réaliser des circuits intégrés ultrarapides et des architectures d'interconnexion, les résonateurs en anneau miniatures et l'interféromètre Mach-Zehnder (MZI) ont été largement utilisés [3]. La plateforme des résonateurs en anneau est considérée comme la meilleure solution possible par rapport à la structure MZI en raison de sa faible consommation d'énergie, de ses faibles pertes optiques et de sa taille ultra-compacte [3]. De plus, la plateforme d'un cristal photonique bidimensionnel basée sur le résonateur en anneau est adaptée à la conception de diverses applications photoniques telles que : le codeur [4], le capteur [5,6], le démultiplexeur [7], les portes logiques [8-11].

A l'heure actuelle, le cristal photonique à base du **GaAs (Arséniure de Gallium)** est une plateforme de nanostructure commercialement disponible et exploitable pour les dispositifs optiques. Cependant, le **GaAs** présente des coefficients électro-optiques linéaires très faibles, de l'ordre de (1 - 3 pm/V), en raison de sa structure cristalline centrosymétrique, ce qui le rend insensible aux champs électriques externes et inadapté à la détection des champs électriques [12]. Par conséquent, pour optimiser la sensibilité au champ électrique, un matériau électro-optique très performant basé sur une structure cristalline non centrosymétrique est combiné au matériau **Si (Silicium)**. Au cours de la dernière décennie, les matériaux cristaux photoniques hybrides à base de Si-LiNbO₃ ont été de plus en plus utilisés pour les capteurs de champ électrique [13]. Cependant, le coefficient électro-optique

du **Si** (1 - 3 pm/V) est seulement 20 fois inférieur à celui du Niobate de Lithium: **LiNbO₃** (30 pm/V). Par conséquent, son intégration est extrêmement difficile avec les puces en silicium [14]. D'autre part, pour améliorer la sensibilité à la tension électrique appliquée, le matériau électro-optique non linéaire comme un polymère à cristaux liquides caractérisé par un coefficient électro-optique ($r_{LCP} = 150$ pm/V) est utilisé pour infiltrer le trou de **Si** [15,16], mais l'insertion de ce matériau dans les trous de **Si** est très difficile à réaliser, la réponse optique est très lente, et inadaptée à l'intégration photonique [17,18].

Dans le travail [1], un matériau électro-optique **BTO** (Oxide de Titanate de Baryum), qui est caractérisé par un coefficient électro-optique très élevé ($r_{BTO} = 1640$ pm/V) [19], l'intégration avec le **GaAs** est très facile, la réponse optique est ultra-rapide, et il consomme moins d'énergie par rapport aux autres matériaux électro-optiques car on utilise un champ électrique. En se basant sur les caractéristiques citées précédemment et sur nos recherches effectuées dans ce contexte, il n'y a pas eu une proposition d'une structure photonique (2D-PhC) fournissant une plateforme multifonctionnelle pour réaliser toutes les portes logiques optiques qui existent avec une faible perte optique, un rapport de contraste très élevé, un temps de réponse ultra-rapide et une taille ultra-compacte.

IV.2.2 Structure physique et photonique de la bande interdite

La structure fondamentale utilisée pour la conception de portes logiques basées sur le commutateur électro-optique est composée de tiges de **GaAs** suspendues dans l'air ($n=1$) avec un réseau carré disposé dans les directions X-Z. L'indice de réfraction des tiges de GaAs et le rayon des tiges diélectriques ainsi que la période du réseau de la structure sont $n=3.6$, $r=0.2 \times a$, $a=0.56$, respectivement. À l'aide des paramètres structurels bien choisis, les modes de propagation (TE, TM) et les bandes interdites photoniques (PBG) de la structure peuvent être calculés par la méthode PWE [20].

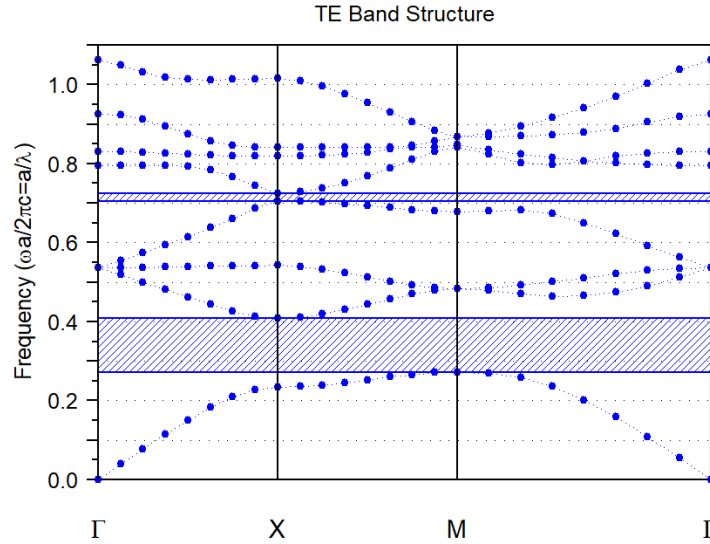


Figure IV.1 : Structure de bande fondamentale du cristal photonique en mode TE.

La figure (IV.1) montre que cette structure présente deux modes TE dont les fréquences normalisées (a/λ) sont comprises entre **0.268 et 0.414** & **0.7 et 0.728**, respectivement. La première gamme de longueur d'onde est comprise entre **1352.65 et 2089.55 nm**, ce qui est approprié pour les portes logiques car elle appartient à la troisième fenêtre optique de télécommunications.

IV.2.3 Simulation des dispositifs électro-optiques à base des cristaux photoniques

IV.2.3.1 Commutateur électro-optique

Ces dernières années, les commutateurs tout-optique ont été considérés comme un composant important pour la réalisation de divers circuits intégrés optiques et réseaux à haut débit. Dans la littérature, on utilise généralement des matériaux non linéaires du 3^{ème} ordre pour concevoir des commutateurs tout-optique basés sur des résonateurs en anneau sur des structures de géométrie carrée [21-23]. L'absence des diffuseurs, qui sont placés aux coins des résonateurs classiques, peut conduire à une diminution de la puissance de sortie due à l'effet de diffusion [24]. En revanche, leur présence induit à l'augmentation de la puissance de sortie du dispositif [24]. Par contre, les conceptions de commutateurs basés sur des matériaux non linéaires nécessitent une puissance d'entrée très élevée. Par conséquent, ce type de conception n'est pas adapté aux commutateurs ultra-compacts de faible puissance.

Cependant, nous avons proposé et conçu un commutateur basé sur un matériau non-linéaire électro-optique, fonctionnant avec une énergie de source minime. Pour concevoir ce commutateur, nous avons exploité les propriétés du matériau **BTO** qui est utilisé pour

modifier son indice de réfraction en fonction du champ électrique appliqué. En conséquence, la longueur d'onde de résonance du commutateur est déplacée vers des longueurs d'onde plus élevées (redshift). L'indice de réfraction du **BTO** et le champ électrique sont liés selon l'équation (IV.1) [25] :

$$n(V) = n_0 + \frac{r_{eo}n_0^3V}{2D} \quad (IV.1)$$

Où V est la tension, D est la distance entre les deux électrodes, n_0 est l'indice de réfraction du **BTO** ($n_0=2,29$) à champs électriques nuls (0 kV/mm), r_{eo} est le coefficient électro-optique ($r_{eo}=600 \text{ pmV}^{-1}$).

Le commutateur électro-optique proposé se compose de deux guides d'ondes couplés par un résonateur en anneau (Ring Resonator: RR) linéaire en cristal photonique de rayon ($0,2*a$), créé en retirant les tiges de **GaAs** et en remplaçant les tiges **BTO** (marquées en bleu) de rayon $0,16*a$. Ensuite, nous créons des diffuseurs quasi-carrés aux coins du RR pour améliorer le spectre de transmission à la sortie, comme le montre la figure (IV.2).

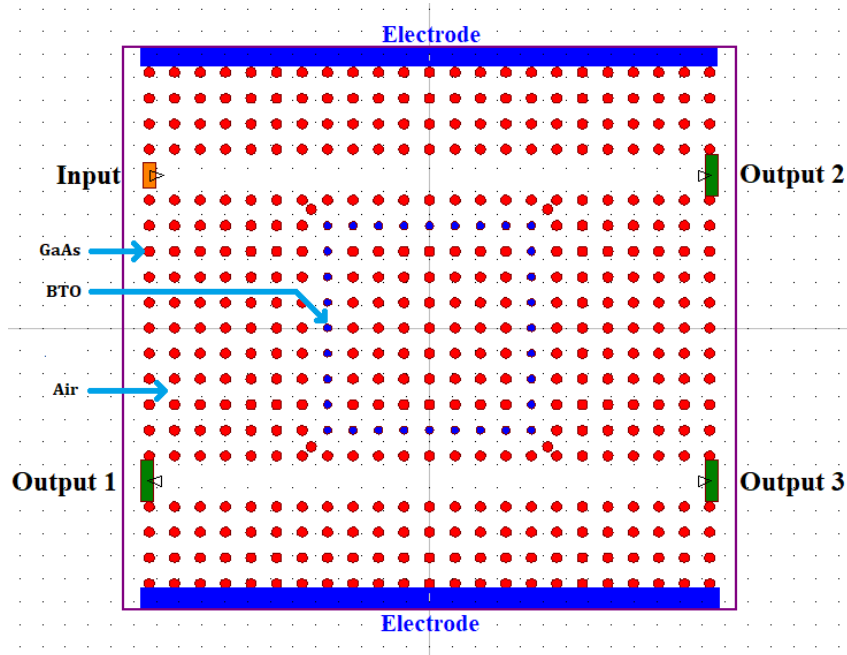


Figure IV.2 : Structure du commutateur électro-optique proposé.

Pour être en mesure de contrôler et d'observer le comportement optique à l'intérieur de notre structure linéaire résonateur en anneau en cristal photonique proposée, un signal optique avec une faible puissance d'entrée de $1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ est lancé à la longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ comme indiqué sur la figure (IV.2). En raison de l'absence de l'effet du champ électrique appliqué (0 kV/mm), le signal optique de l'entrée se déplace vers le port « Output

1 » en raison de l'effet de résonance du résonateur en anneau, cela signifie que le commutateur est sur l'état « ON » (figure (IV.3a) et figure (IV.3c)).

Cependant, pour la même puissance d'entrée, l'indice de réfraction du matériau ferroélectrique BTO augmente en raison de l'effet du champ électrique externe appliqué (56 kV/mm), par conséquent, le signal lumineux d'entrée ne sera pas couplé au résonateur en anneau et se déplacera vers le port « Output 2 », de sorte que l'interrupteur passe à l'état OFF ((figure (IV.3b) et figure (IV.3d)).

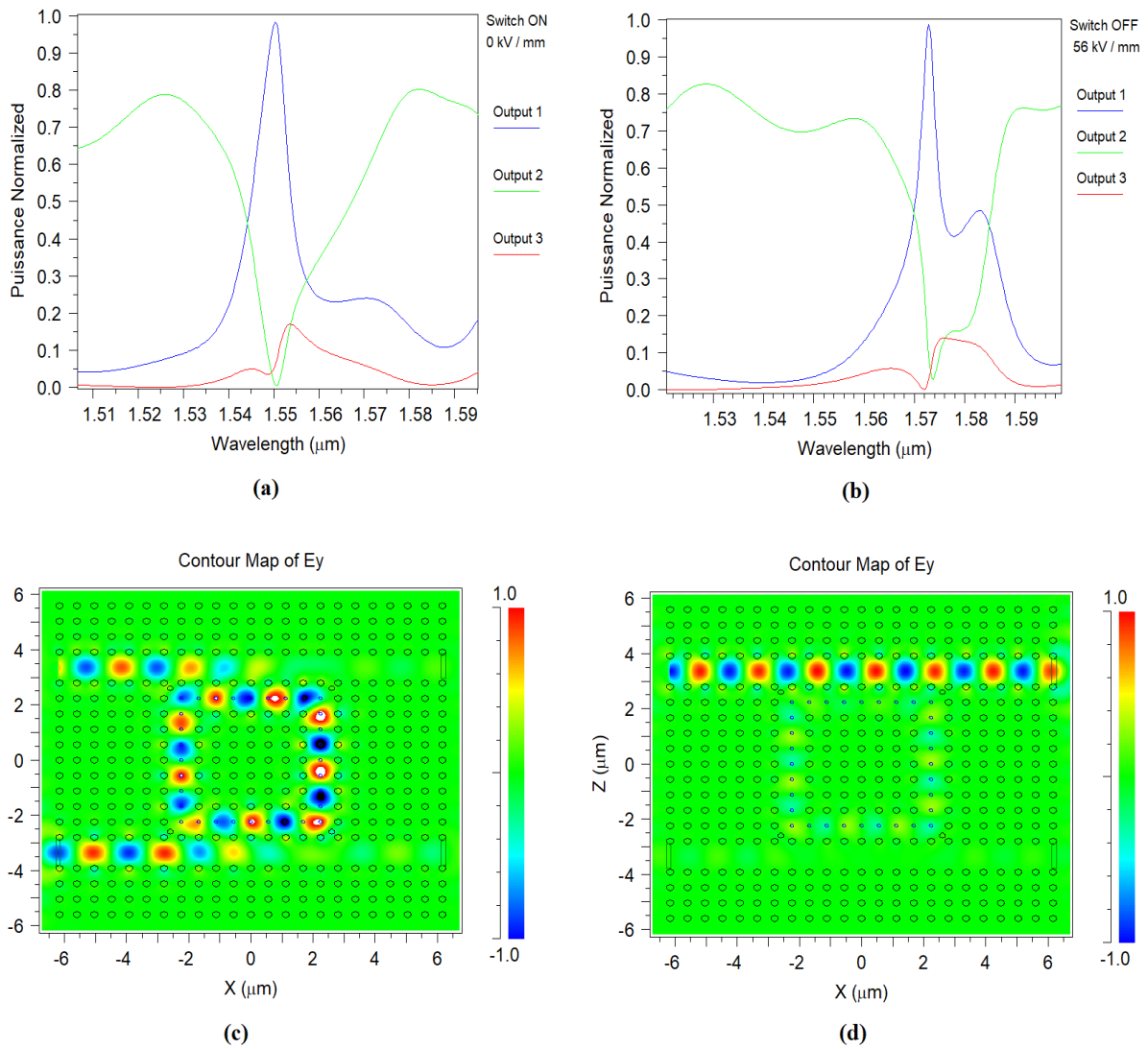


Figure IV.3 : Spectre de transmission et la distribution du champ électrique de notre commutateur proposé pour : (a-c) commutateur à l'état ON, (b-d) commutateur à l'état OFF.

IV.2.3.2 Portes logiques NOT et BUFFER simultanées

Pour les portes logiques NOT et BUFFER, nous avons utilisé une structure pour concevoir ces deux portes simultanément. Cette structure est basée sur le commutateur électro-optique précédent en ajoutant deux guides d'ondes d'entrée en parallèle près des

résonateurs en anneau comme le montre la figure (IV.4). Dans la structure que nous proposons, les deux portes de sortie (Output 1, Output 2) sont les ports de sortie de la porte NOT et la porte BUFFER respectivement.

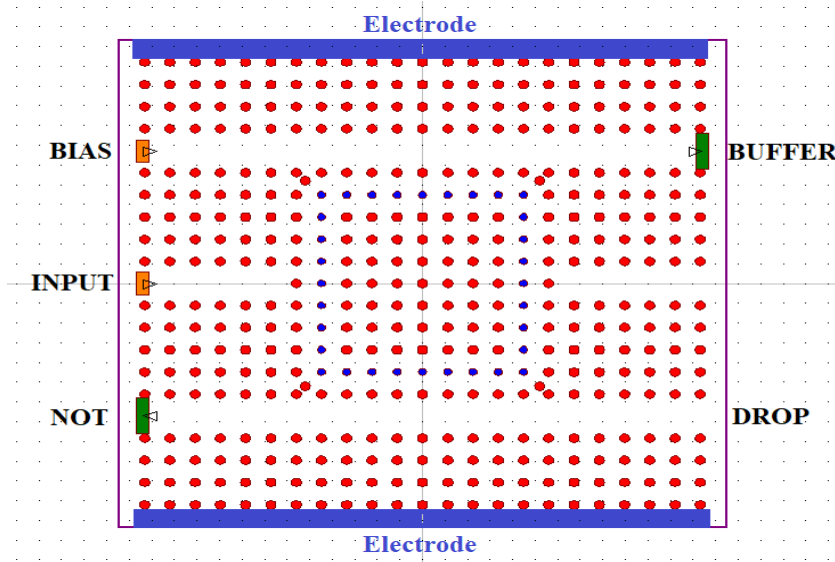


Figure IV.4 : Structure proposée pour les portes logiques NOT et BUFFER simultanément.

En excitant la structure, de la figure (IV.4), par un signal d'entrée optique de faible puissance de $1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ au port 'BIAS', et vu que le champ électrique appliqué est de 0 kV/mm , nous constatons que les spectres de transmission normalisés aux ports de sortie des portes NOT et BUFFER sont $0,84 P_{in}$ et $0,013 P_{in}$, ce qui correspond au niveau logique 1 et 0, respectivement.

On injecte un signal optique via les ports d'entrée 'BIAS' et 'INPUT' avec une puissance de $1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ pour chacun d'eux. Le signal lumineux ne peut pas être couplé avec le résonateur en anneau en raison de l'effet du champ électrique appliqué (56 kV/mm), d'où l'absence de l'effet de résonance à la longueur d'onde $1,55 \mu\text{m}$. Les valeurs de transmission trouvées aux ports de sortie des portes NOT et BUFFER sont $0,03 P_{in}$ (niveau logique 0) et $0,62 P_{in}$ (niveau logique 1), respectivement. Les états de fonctionnement des portes logiques NOT et BUFFER proposées sont résumés dans le tableau (IV.1) et les figures (IV.5) et (IV.6).

Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires

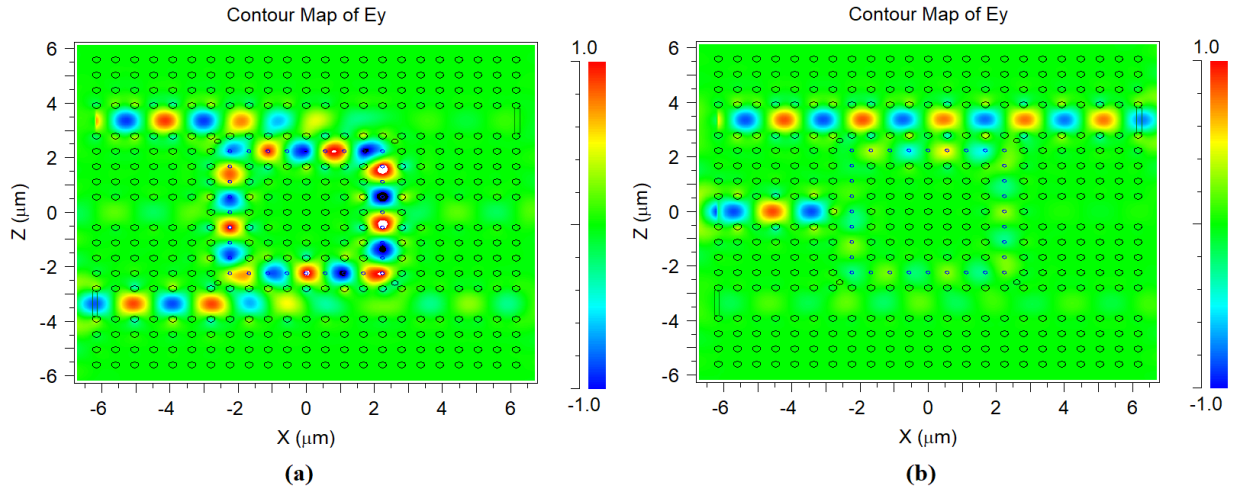


Figure IV.5 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques NOT et BUFFER simultanément.

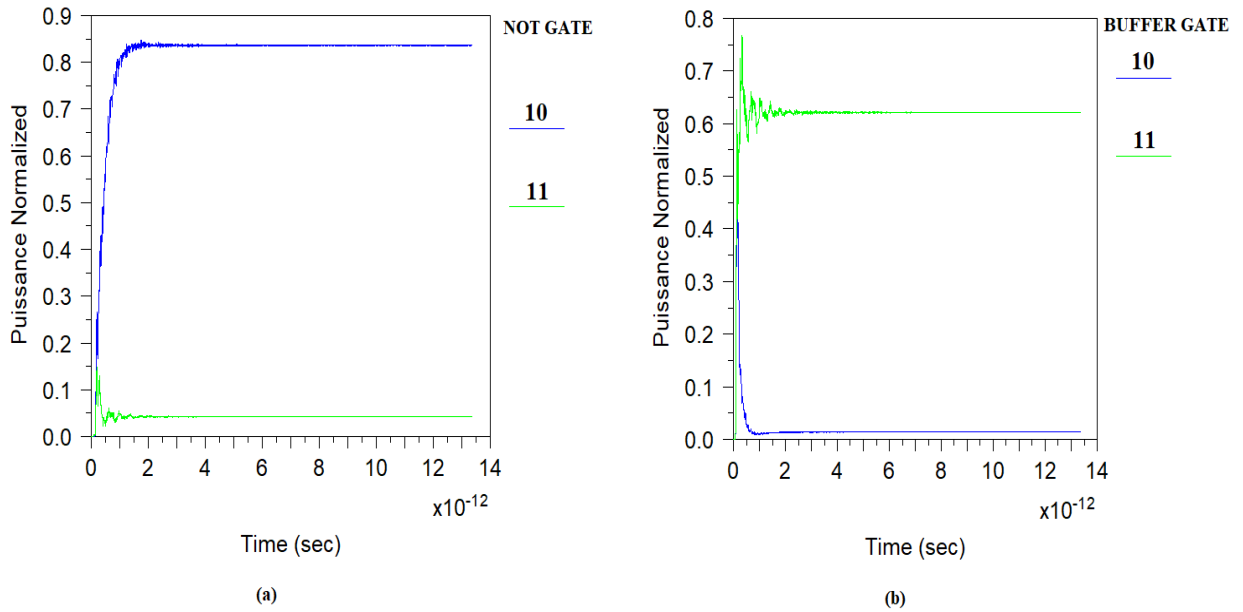


Figure IV.6 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour des portes logiques NOT et BUFFER simultanément.

Table IV-1 : Table de vérité des portes logiques NOT et BUFFER simultanément.

Champ Electrique	BIAS		INPUT		Port de sortie (NOT gate)				Port de sortie (BUFFER gate)			
	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Contrast ratio	response time	Logic level	P	Contrast Ratio	response time
0 kV/mm	1	Pin	0	0	1	0.84 Pin	14.47 dB	1 ps	0	0.013 Pin	16.78 dB	1 ps
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	0	0.03 Pin			1	0.62 Pin		

IV.2.3.3 Portes logiques AND et NAND simultanées

En se basant sur le commutateur électro-optique proposé (Figure (IV.2)), nous avons conçu des portes logiques AND et NAND simultanément (figure (IV.7)). Pour connecter les portes d'entrée (INPUT 1, INPUT 2) au résonateur en anneau, on a supprimé 6 tiges de chaque côté de l'anneau pour créer les deux guides d'ondes d'entrée sus-cités.

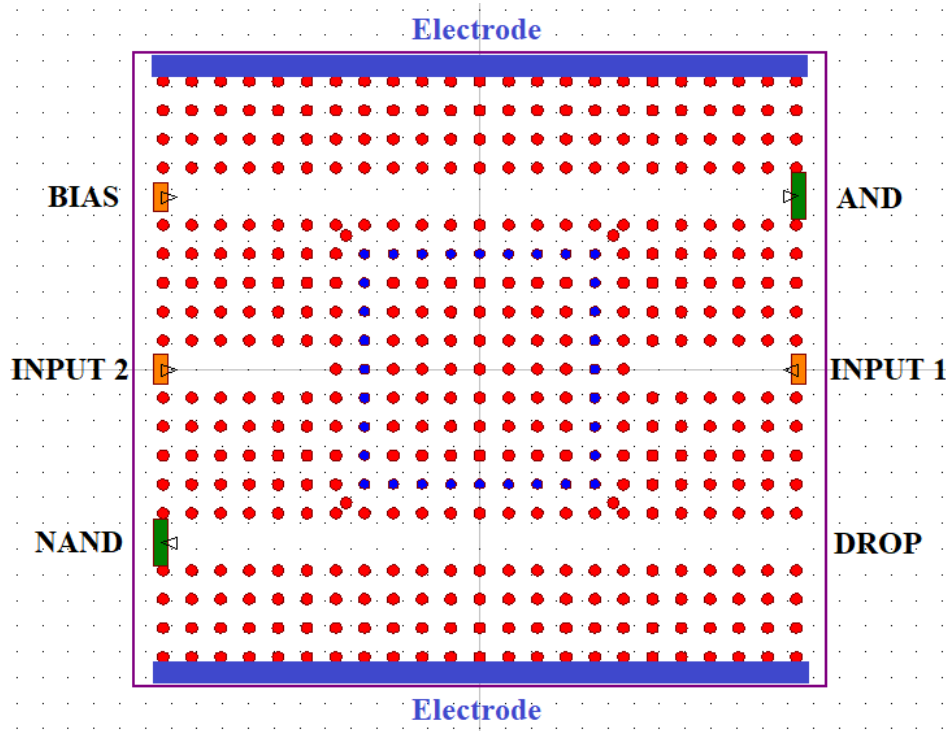


Figure IV.7 : La structure proposée pour les portes logiques AND et NAND simultanées.

Si une des deux entrées (INPUT 1, INPUT 2) sont à zéro ou les deux sont nulles, et que l'effet du champ électrique appliqué par les électrodes est absent (0 kV/mm), le signal de commande optique (BIAS) est piégé dans le résonateur en anneau afin de réaliser les différents états aux portes de sortie de chaque porte logique : AND et NAND simultanément.

Lorsque les deux entrées sont égales à « 1 », l'effet du champ électrique appliqué par les électrodes (56 kV/mm) va décaler la longueur d'onde de résonance de l'anneau et diriger le signal de contrôle optique (BIAS) vers l'autre sortie afin de réaliser simultanément les deux états de fonctionnement proposés de AND et NAND, qui sont résumés dans le tableau (IV.2) et les figures (IV.8) et (IV.9).

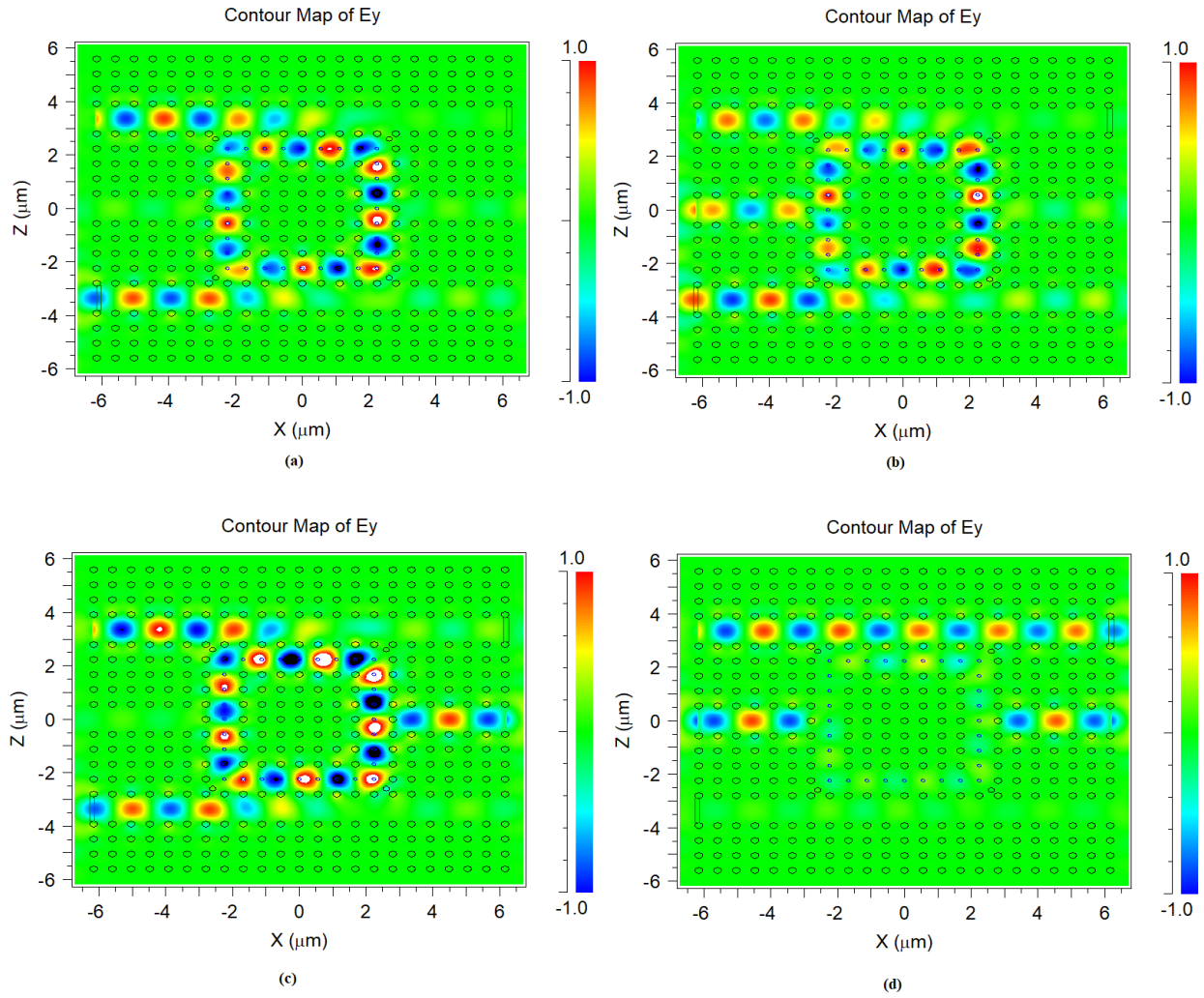


Figure IV.8 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques AND et NAND simultanément.

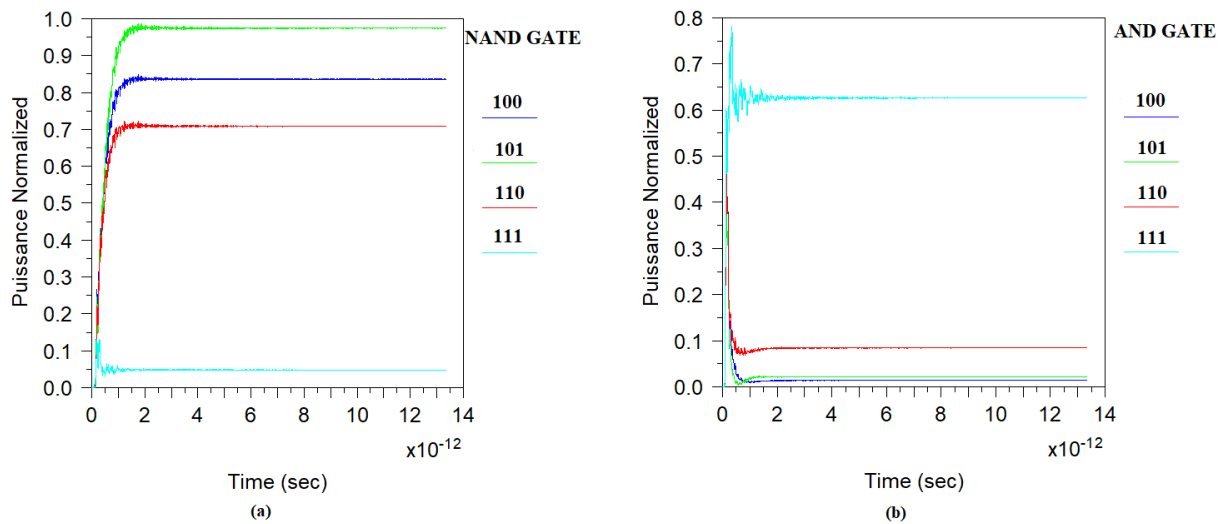


Figure IV.9 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour les portes logiques AND et NAND simultanément.

Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires

Table IV-2 : Table de vérité des portes logiques AND et NAND simultanément.

Champ Electrique	BIAS		INPUT 1		INPUT 2		Output port (AND gate)				Output port (NAND gate)			
	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Contrast ratio	response time	Logic level	P	Contrast Ratio	response time
0 kV/mm	1	Pin	0	0	0	0	0	0.01 Pin	8.89 dB	1 ps	1	0.84 Pin	12.49 dB	1 ps
0 kV/mm	1	Pin	0	0	1	Pin	0	0.02 Pin			1	0.98 Pin		
0 kV/mm	1	Pin	1	Pin	0	0	0	0.08 Pin			1	0.71 Pin		
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	1	Pin	1	0.62 Pin			0	0.04 Pin		

IV.2.3.4 Portes logiques XNOR et XOR simultanément

Pour la simulation des portes XNOR et XOR simultanément, proposées, on utilise la structure de la figure (IV.7), comme le montre sur la figure (IV.10).

Lorsque les deux entrées sont toutes les deux égales à (00) ou (11), dans ce cas, le résonateur en anneau peut coupler le signal de contrôle optique (BIAS) vers la sortie de la porte XNOR en raison de la présence de l'effet de résonance et de l'absence de l'effet du champ électrique appliqué (0 kV/mm) par les électrodes simultanément.

Cependant, lorsqu'une entrée est égale à « 1 » et l'autre est égale à « 0 », l'absence totale de l'effet de résonance à la longueur d'onde de 1,55 μm en raison de la présence de l'effet de champ électrique appliqué par les électrodes (56 kV/mm). Dans ce cas, le signal de contrôle optique (BIAS) est dirigé vers l'autre sortie de la porte XOR afin d'accomplir les états de fonctionnement de XNOR et XOR simultanément tel qu'il est illustré sur les figures (IV.11) et (IV.12) et résumé sur le tableau (IV.3).

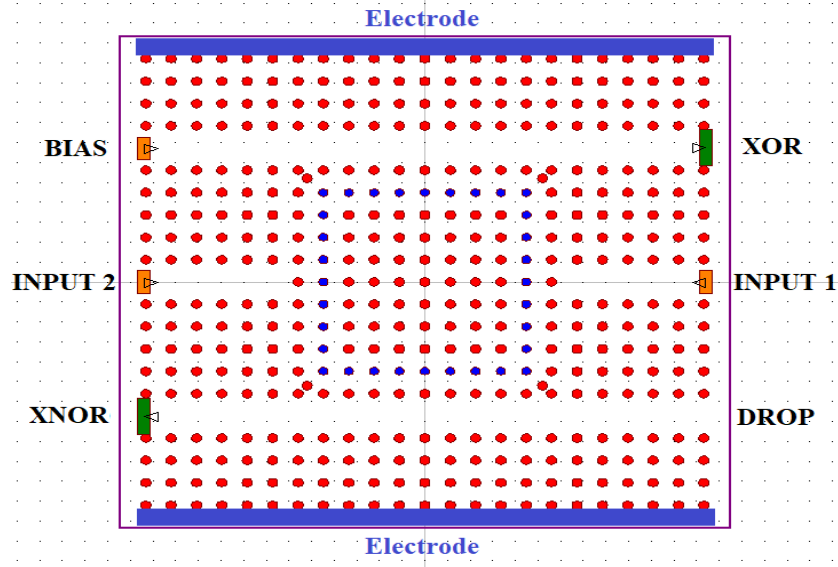


Figure IV.10 : Structure proposée des portes logiques XNOR et XOR simultanément.

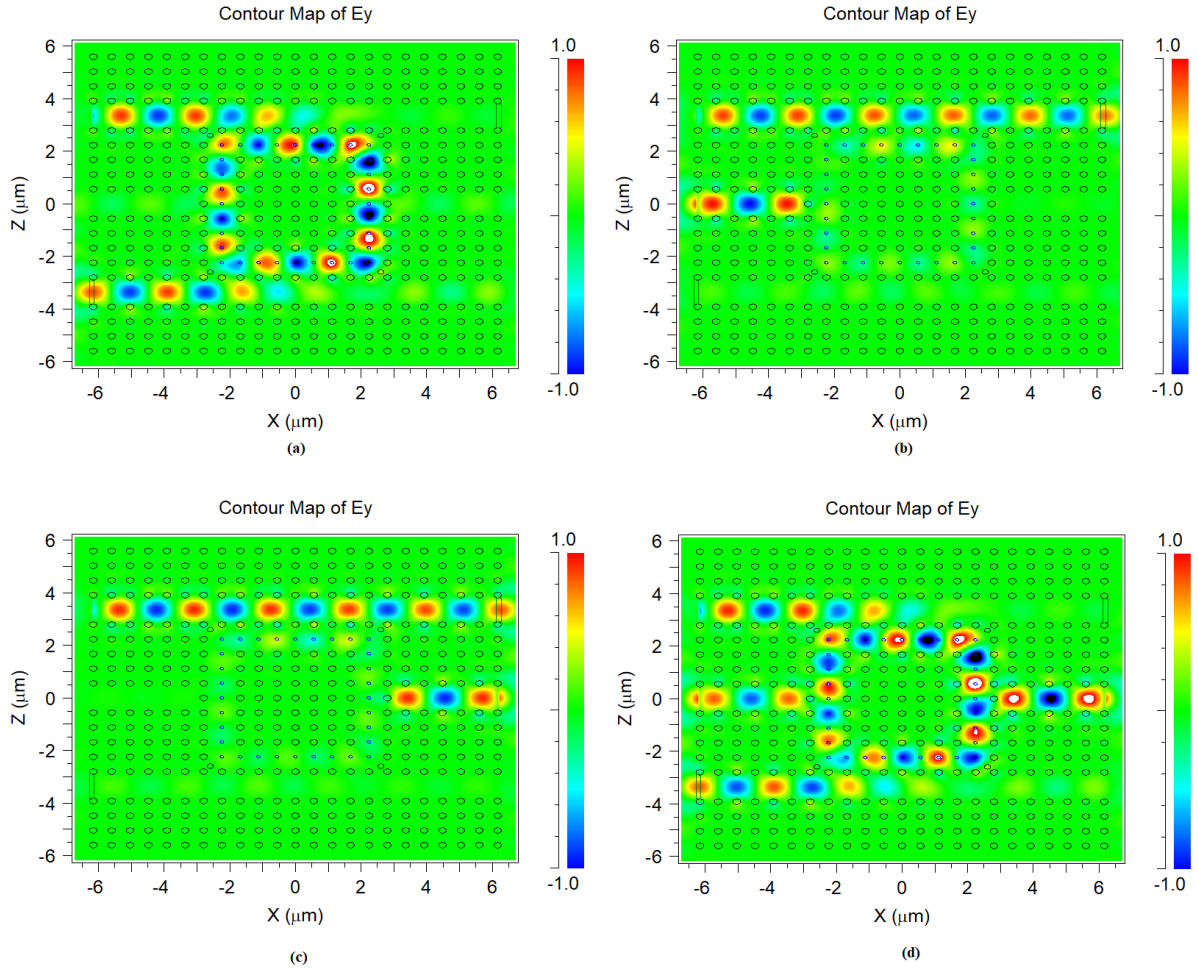


Figure IV.11 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques XNOR et XOR simultanément.

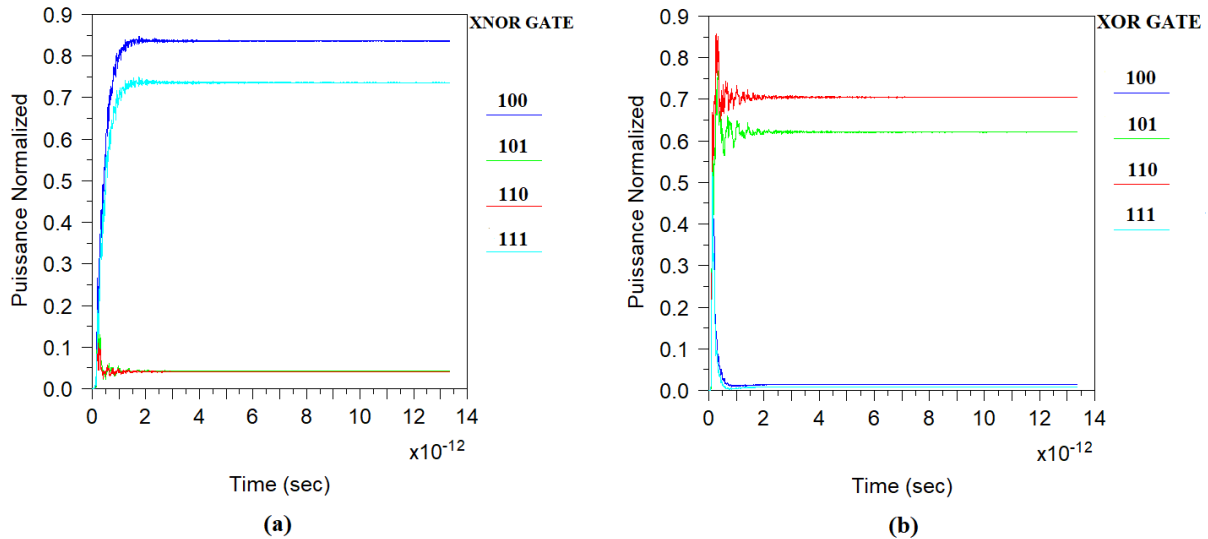


Figure IV.12 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour les portes logiques XNOR et XOR simultanément.

Table IV-3 : Table de vérité des portes logiques XNOR et XOR simultanément.

Champ Electrique	BIAS		INPUT 1		INPUT 2		Output port (XNOR gate)				Output port (XOR gate)			
	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Contrast ratio	response time	Logic level	P	Contrast ratio	response time
0 kV/mm	1	Pin	0	0	0	0	1	0.84 Pin	12.67 dB	1 ps	0	0.011 Pin	17.92 dB	1 ps
56 kV/mm	1	Pin	0	0	1	Pin	0	0.042 Pin			1	0.62 Pin		
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	0	0	0	0.04 Pin			1	0.7 Pin		
0 kV/mm	1	Pin	1	Pin	1	Pin	1	0.74 Pin			0	0.005 Pin		

IV.2.3.5 Portes logiques NOR et OR simultanément

La modélisation du fonctionnement des portes logiques NOR et OR simultanément en utilisant une structure unifiée est l'une des preuves de la simplicité de la conception proposée, comme le montre la figure (IV.13). Selon les figures (IV.14) et (IV.15) et le tableau (IV.4), lorsque les deux entrées sont égales à « 0 », le signal de commande optique (BIAS) passe directement à la sortie de la porte NOR à cause de la variation de l'indice de réfraction du matériau (BTO) et de la tension appliquée par les électrodes (56 kV/mm), d'où l'absence de l'effet de résonance à la longueur d'onde 1,55 μm .

Si l'une des entrées est égale à « 1 », le signal de commande optique (BIAS) passe à la sortie de la porte OR à travers le résonateur en anneau en raison de l'absence de l'effet de la tension appliquée (0 kV/mm).

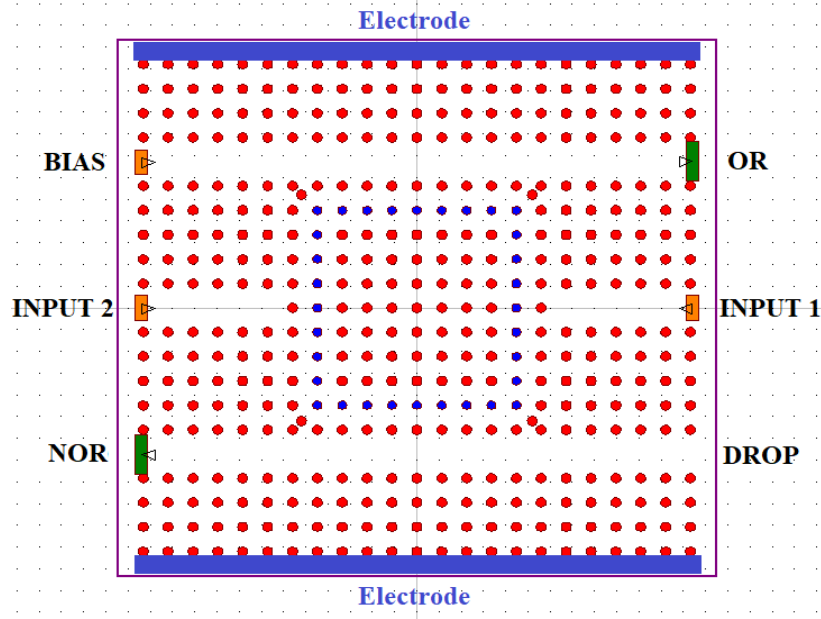


Figure IV.13 : Structure proposée des portes logiques NOR et OR simultanément.

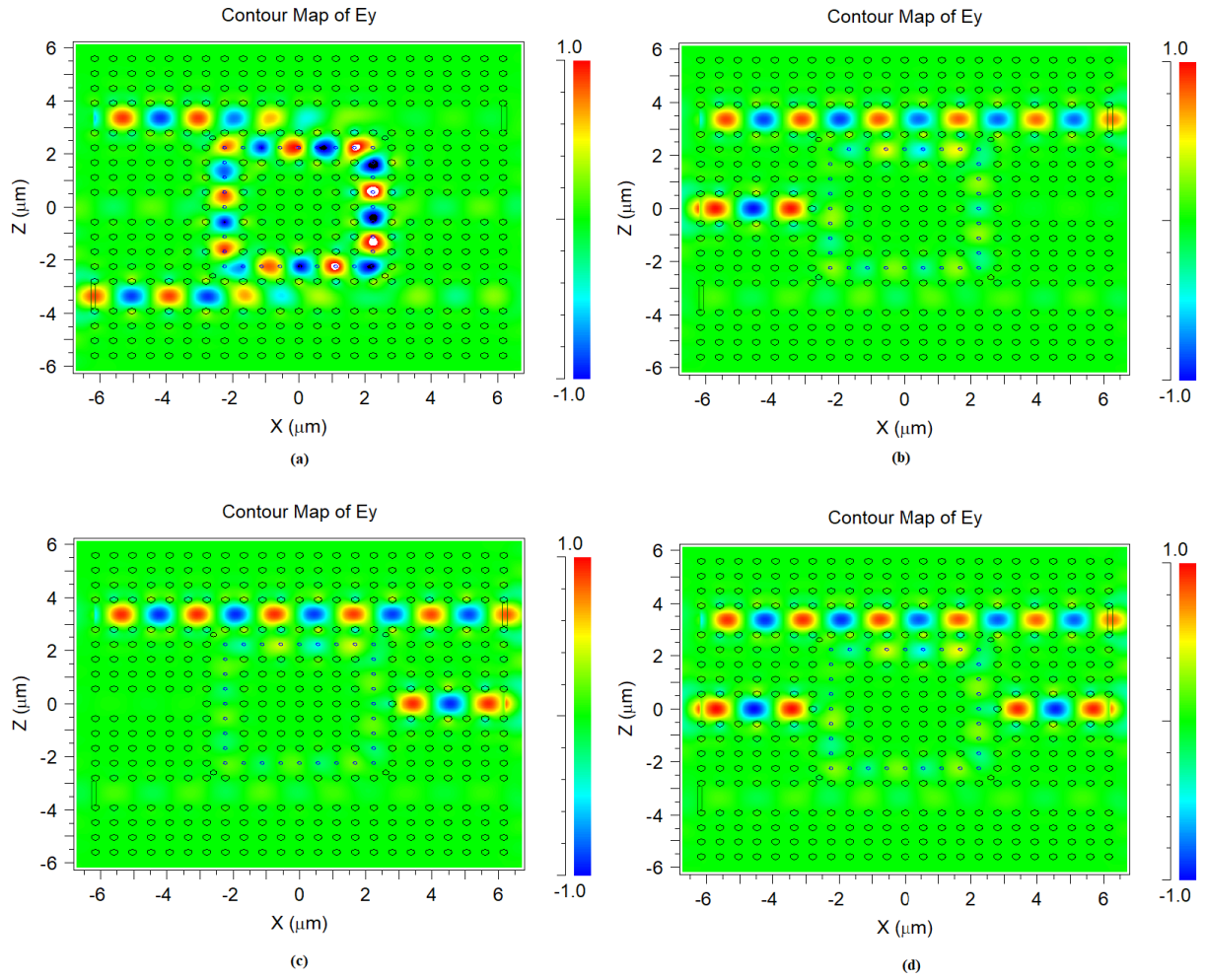


Figure IV.14 : Distribution du champ électrique pour les portes logiques NOR et OR simultanément.

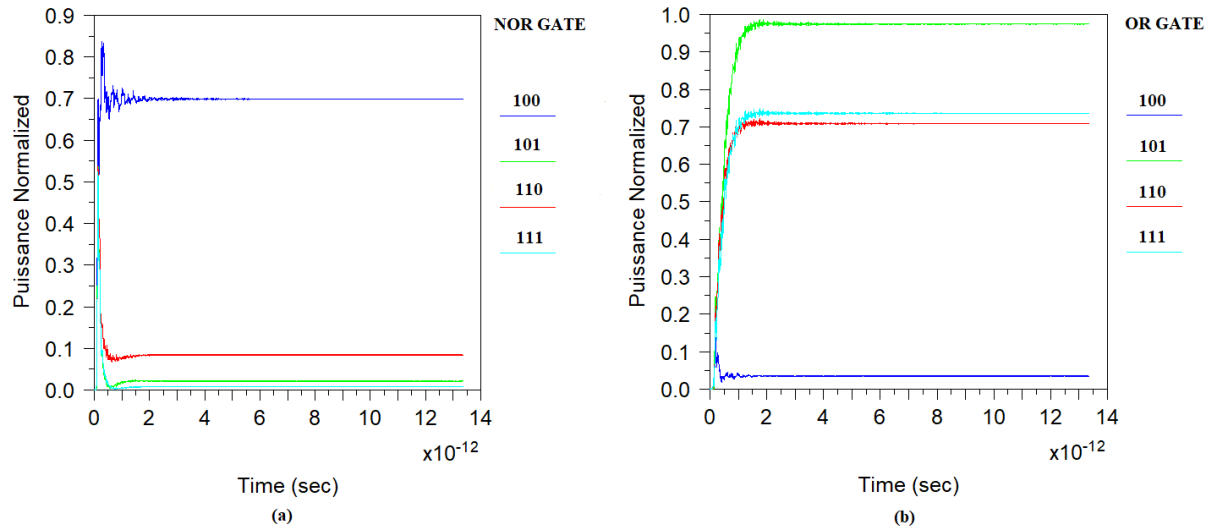


Figure IV.15 : Puissance de sortie normalisée et temps de réponse pour des portes logiques NOR et OR simultanément.

Table IV-4 : Table de vérité des portes logiques NOR et OR simultanément.

Champ Electrique	BIAS		INPUT 1		INPUT 2		Output port (NOR gate)				Output port (OR gate)			
	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Contrast ratio	response time	Logic level	P	Contrast ratio	response time
0 kV/mm	1	Pin	0	0	0	0	1	0.70 Pin	9.42 dB	1 ps	0	0.03 Pin	15.09 dB	1 ps
56 kV/mm	1	Pin	0	0	1	Pin	0	0.01 Pin			1	0.97 Pin		
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	0	0	0	0.08Pin			1	0.712 Pin		
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	1	Pin	0	0.007 Pin			1	0.738 Pin		

IV.2.3.6 Porte AND sans signal de commande

La structure proposée est capable d'exécuter certaines fonctions logiques sans utiliser le signal de commande comme la porte AND à haute performance basée sur un commutateur électro-optique comme le montre la figure (IV.16).

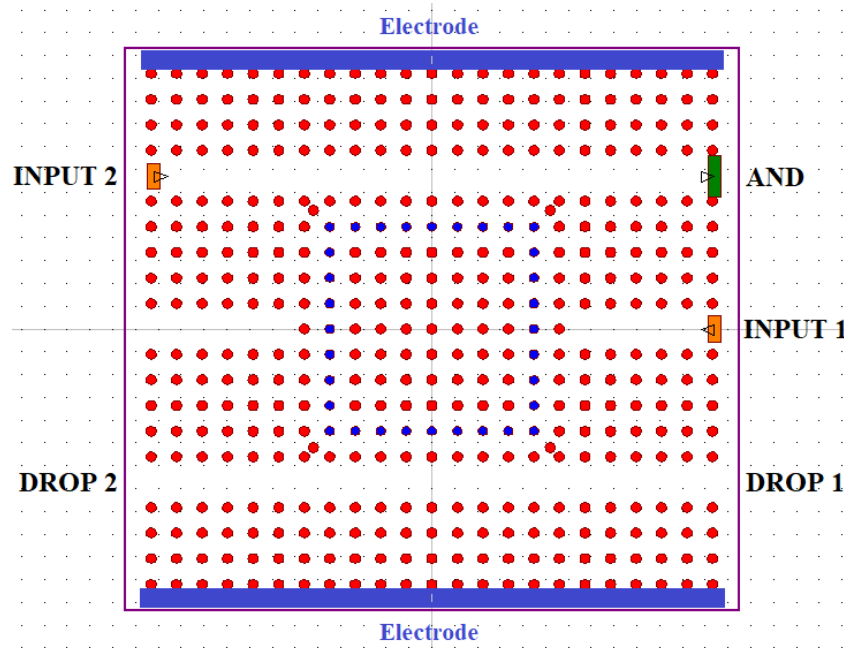


Figure IV.16 : Structure proposée de la porte logique AND.

- ➡ INPUT 1= INPUT 2 =0, il n'y a pas de lumière à l'intérieur de la structure et comme le montrent les figures (IV.17a) et (IV.18a) ;
- ➡ INPUT 1=0, INPUT 2=1, le signal optique d'entrée (INPUT 2) passe à la sortie (DROP 2) à travers le résonateur en anneau en raison de l'effet de résonance et de l'absence de l'effet de champ électrique (0 kV/mm), comme le montrent les figures (IV.17b) et (IV.18b) ;
- ➡ INPUT 1=1 et INPUT 2=0, le signal optique d'entrée (INPUT1) se déplace vers l'anneau mais ne peut pas atteindre la sortie, comme le montrent les figures (IV.17c) et (IV.18c) ;
- ➡ INPUT 1=INPUT 2=1 et que le champ électrique appliqué par les électrodes est égal à 56 kV/mm, le signal optique d'entrée INPUT2 passe vers la sortie de la porte AND en raison de l'absence totale de l'effet de résonance à la longueur d'onde de 1,55 μm , comme le montrent les figures (IV.17d) et (IV.18c).

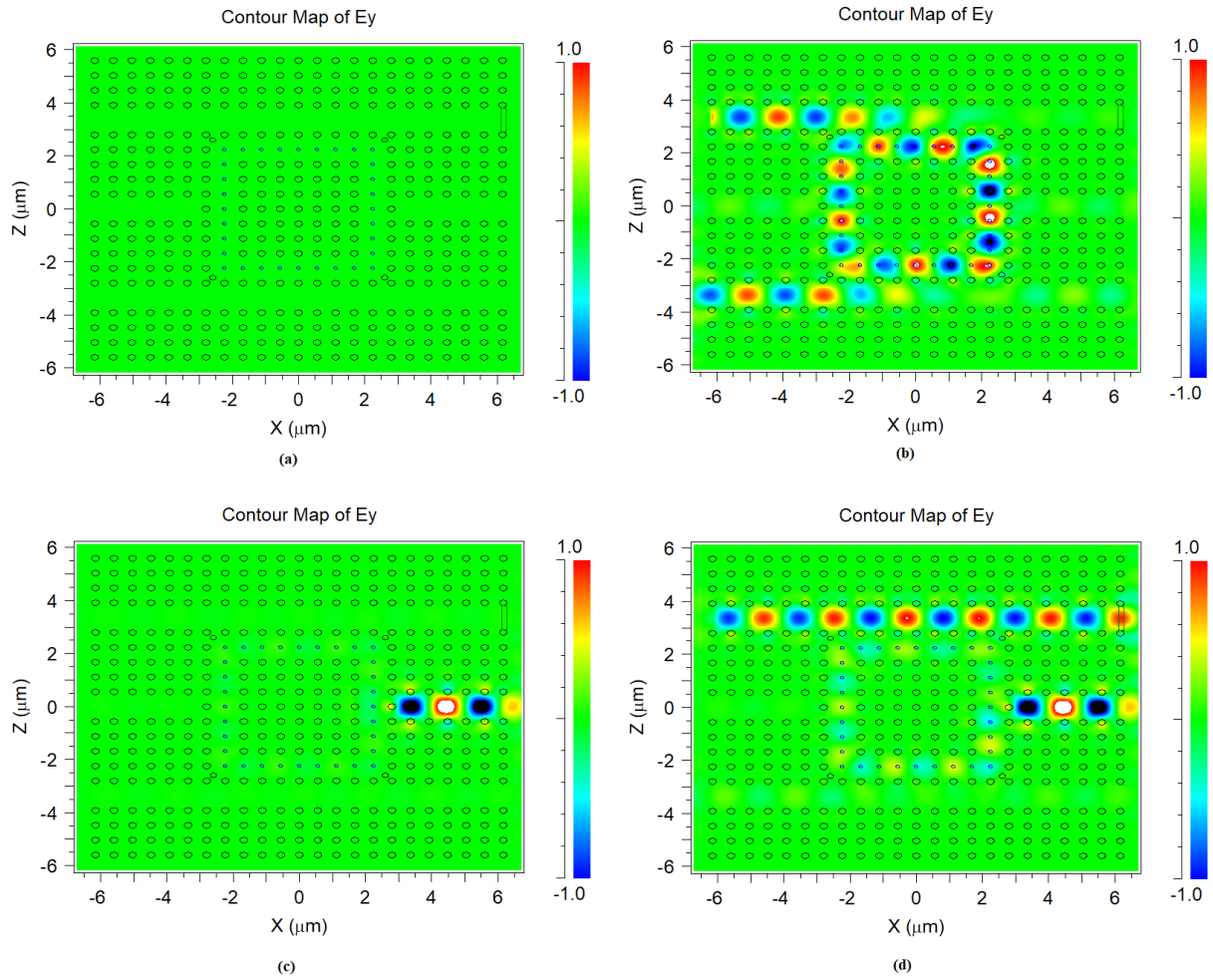


Figure IV.17 : Distribution du champ électrique pour la porte logique AND.

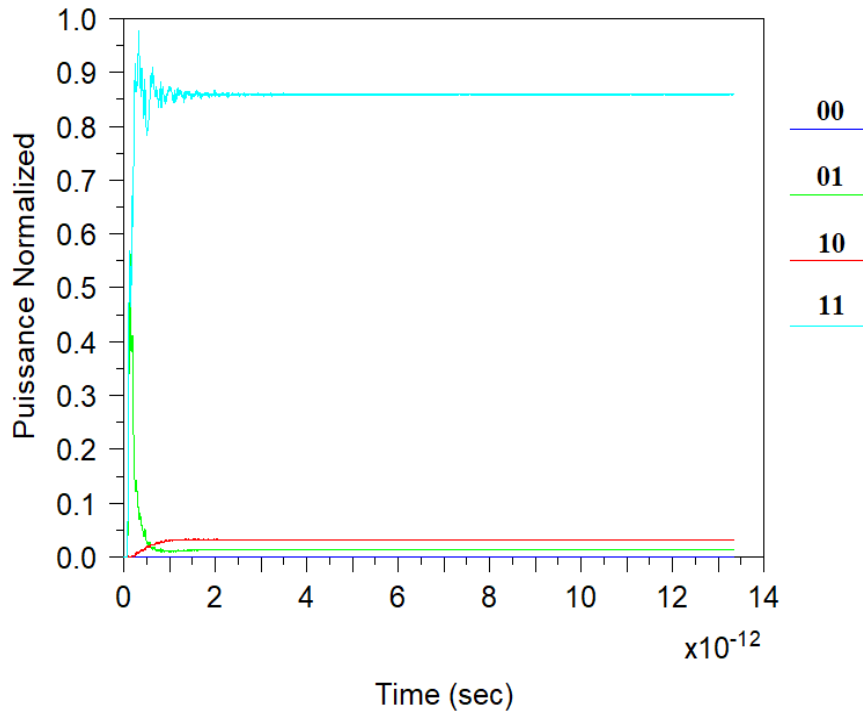


Figure IV.18 : Puissance de sortie normalisée et le temps de réponse de la porte logique AND.

Table IV-5 : Table de vérité de la porte logique AND.

Champ Electrique	INPUT 1		INPUT 2		Output port (AND gate)			
	Logic level	P	Logic level	P	Logic level	P	Contrast ratio	response time
0 kV/mm	0	0	0	0	0	0 Pin	14.57 dB	1 ps
0 kV/mm	0	0	1	Pin	0	0.013 Pin		
0 kV/mm	1	Pin	0	0	0	0.031 Pin		
56 kV/mm	1	Pin	1	Pin	1	0.86 Pin		

IV.2.4 Conclusion

Dans cette première partie, nous avons conçu une structure électro-optique multifonctionnelle à base de cristaux photoniques pour les ordinateurs à haute performance et les réseaux optique haut débit. Notre étude montre qu'il est possible d'intégrer un matériau à effet Pockels comme l'Oxyde de Baryum et de Titane (BTO) dans des structures photoniques GaAs afin d'exploiter et de réaliser des portes logiques optiques avec un coefficient de transmission et un rapport de contraste très élevés, un temps de réponse très court de 1 ps et une structure ultra-compacte de $157 \mu\text{m}^2$. Cette structure multifonctionnelle est adaptée aux circuits intégrés photoniques à l'échelle nanométrique.

IV.3 Portes logiques tout-optique à base des cristaux photoniques non-linéaires du troisième ordre (Effet Kerr)

IV.3.1 Portes logiques tout-optique 'NOT' et 'OR' en utilisant un commutateur basé sur l'effet Kerr non linéaire et un résonateur en anneau

IV.3.1.1 Introduction

Avec les progrès de la technologie des télécommunications, tous les dispositifs optiques modernes jouent un rôle très important en optique intégrée en raison de leur traitement rapide de l'information, de leur grande capacité et de leur sécurité face aux interférences électromagnétiques [26].

Les portes logiques tout-optiques sont considérées comme l'une des clés en temps réel pour rendre le traitement et la communication optiques suffisamment rapides pour exécuter les fonctions nécessaires aux nœuds du réseau, telles que le codage et le

décodage des données, la correspondance des formes, la reconnaissance et diverses opérations de commutation [27]. Les déviations des bandes photoniques [28], et les effets non linéaires sont des mécanismes communs qui peuvent être utilisés dans les cristaux photoniques pour créer des guides d'ondes optiques et contrôler la propagation des ondes optiques [29]. Ces mécanismes sont utilisés pour concevoir une grande variété de dispositifs optiques tels que : le codeur [30], le décodeur [31], les comparateurs [32] les additionneurs [33], les démultiplexeurs [34], les commutateurs [35] et les portes logiques [36,37].

Cependant, les difficultés de conception, la consommation d'énergie très élevée et la complexité du fonctionnement des portes logiques tout-optiques de haute qualité constituent un problème majeur dans la réalisation et le développement des circuits optiques intégrés.

Dans cette partie, nous avons proposé de nouvelles portes logiques 'NOT' et 'OR' tout-optique en utilisant un commutateur basé sur des cristaux photoniques non-linéaire pour atteindre une faible consommation d'énergie, un rapport de contraste très élevé, une taille relativement petite ($12\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$), un temps de réponse ultra-rapide, et elles peuvent fonctionner à des débits binaires important.

IV.3.1.2 Structure de base

La structure initiale proposée pour la conception des portes tout-optique 'NOT' et 'OR' est une structure carrée de 21 lignes et 25 colonnes de tiges $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ suspendues dans l'air. L'indice de réfraction du $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ est environ 3,6 à la longueur d'onde 1550 nm. Le rayon des tiges "r" est de $0.2a$ où « a » est égale à 450 nm, comme le montre la figure (IV.19a). La structure de bande, de la figure (IV.19b), présente deux BIPs en mode TE. La principale et large bande photonique de la structure se situe entre 1317 et 2037 nm, où la fréquence de fonctionnement du dispositif doit se faire dans cette zone. Nous avons utilisé l'outil de simulation Bandsolve du logiciel RsoftPhotonic CAD pour calculer le diagramme de bande des cristaux photoniques basé sur la méthode PWE [38].

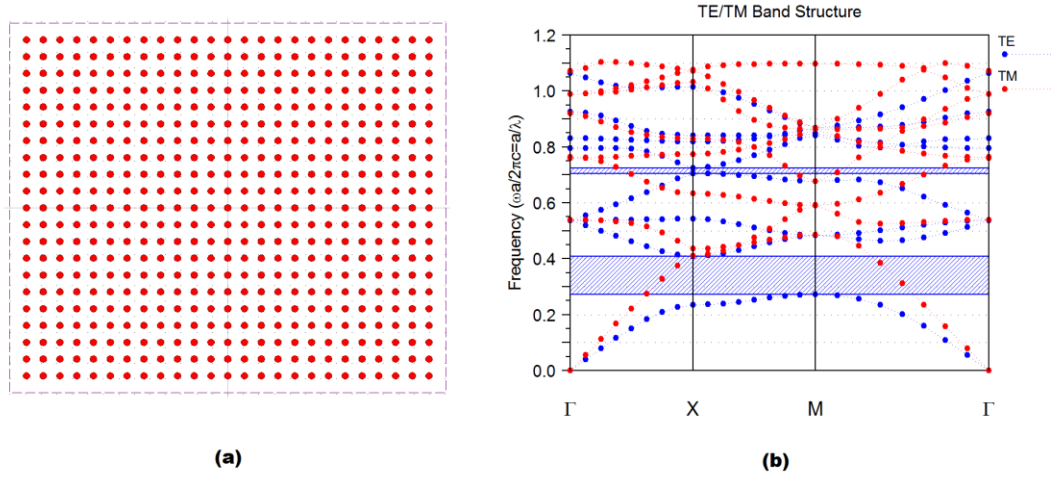


Figure IV.19 : (a) Structure initiale. (b) Diagramme de bande.

IV.3.1.3 Conception tout-optique du commutateur

Le commutateur tout-optique proposé est un résonateur en anneau conçu à partir d'un matériau non linéaire de rayon $0,34a$, formé par un guide d'ondes d'entrée adjacent à ce résonateur. Ce résonateur est créé en supprimant les tiges du $\text{In}_{0,82}\text{Ga}_{0,18}\text{As}_{0,40}\text{P}_{0,60}$ et en les remplaçant par des tiges en nano-cristal de Si (Si-nc) avec un effet Kerr très élevé. Le « Si-nc » a un indice de réfraction linéaire de $n_2=1,5$ et un coefficient Kerr non linéaire de $10^{-16} \mu\text{m}^2/\text{W}$ à 1550 nm [5] (Marqué en noir). Ensuite, nous créons le guide d'onde en forme de "I" près du résonateur en anneau qui représente le guide d'onde de sortie, comme le montre la figure (IV.20 a). Les diffuseurs sont placés aux coins du résonateur en anneau quasi-carré pour atteindre une transmission de 100 % à l'état linéaire, comme le montre la figure (IV.20 b).

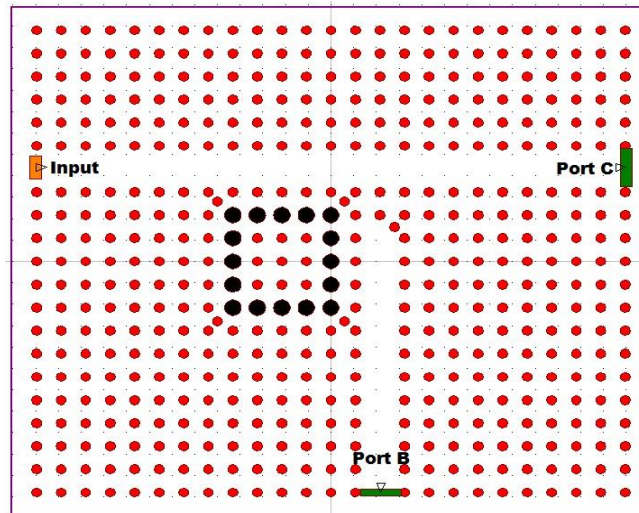


Figure IV.20 : Conception finale du commutateur tout optique proposé.

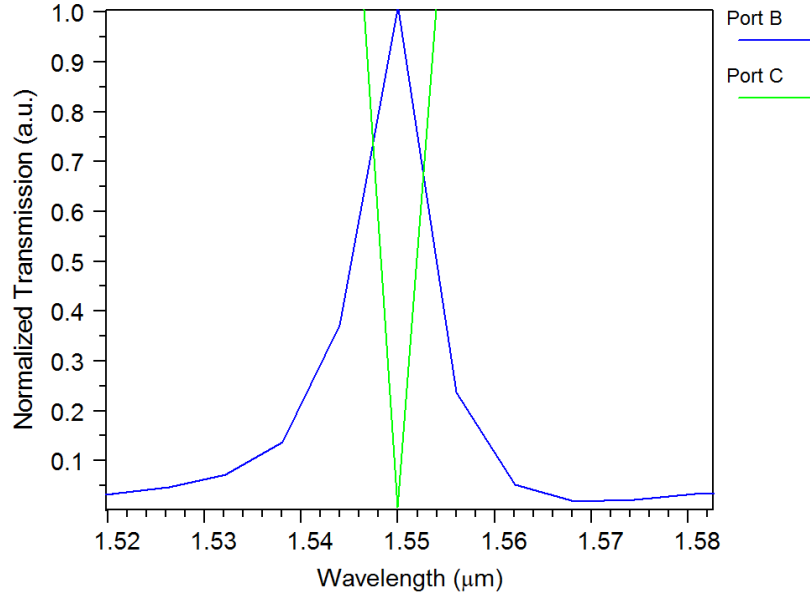


Figure IV.21 : Spectre de transmission normalisé.

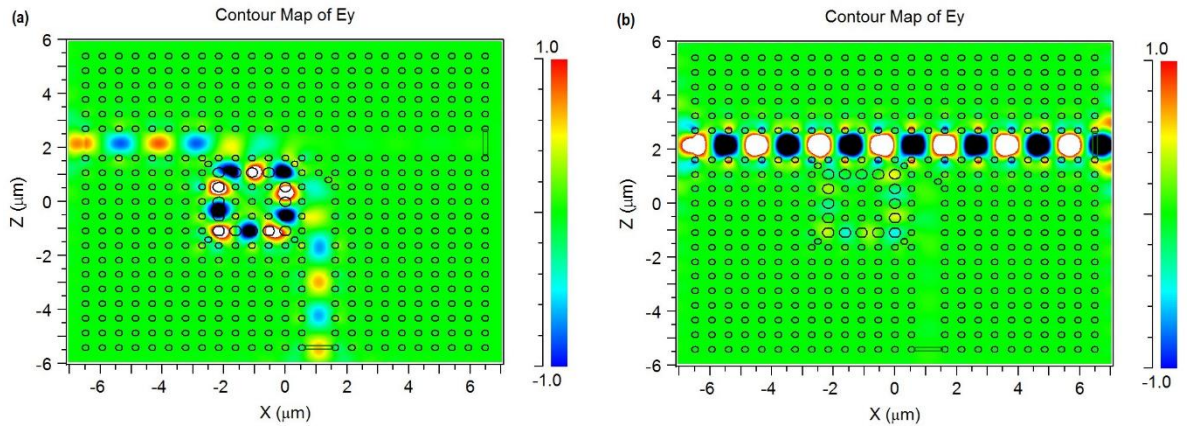


Figure IV.22 : Distribution du champ magnétique d'un commutateur tout-optique à 1550 nm (a) faible puissance, (b) très forte puissance.

A l'état linéaire, si nous considérons $\lambda_c = 1550$ nm comme la longueur d'onde opérationnelle de notre commutateur, et si on excite avec une intensité de faible puissance, l'entrée 'Input' fait résonner le signal vers la sortie 'Port B' en utilisant un résonateur en anneau, ce qui signifie que le commutateur est sur l'état « ON » (Figure (IV.22 a))).

Selon la figure (IV.22 b), si on excite avec une intensité de puissance élevée, tout le signal optique ira vers le port 'Port C', donc notre dispositif passera à l'état « OFF ».

Lorsque le commutateur est excité par le port 'Input' à $\lambda = 1,55$ μm, l'effet de résonance du RR permettra la sortie du signal par le port "B".

Nous simulons un modèle non linéaire par la méthode FDTD-2D en mode TE à l'état stable. Nous lançons un signal à onde continue (CW) avec une longueur d'onde de résonance

λ et une puissance de 0,1W dans le guide d'ondes du bus pour créer un décalage de la longueur d'onde de résonance λ souhaité entre l'état linéaire et l'état non linéaire. Le niveau de puissance de sortie peut être obtenu à partir des ports "B" et "C" à un état stable. Nous faisons varier la puissance de l'entrée (P_{input}) et nous mesurons l'état stable de la puissance de sortie. La variation de la puissance normalisée des sorties 'B' et 'C' en fonction de la puissance incidente ' P_{input} ' est montrée dans la figure (IV.23) où le seuil de commutation est égal à $0.8W/\mu m^2$.

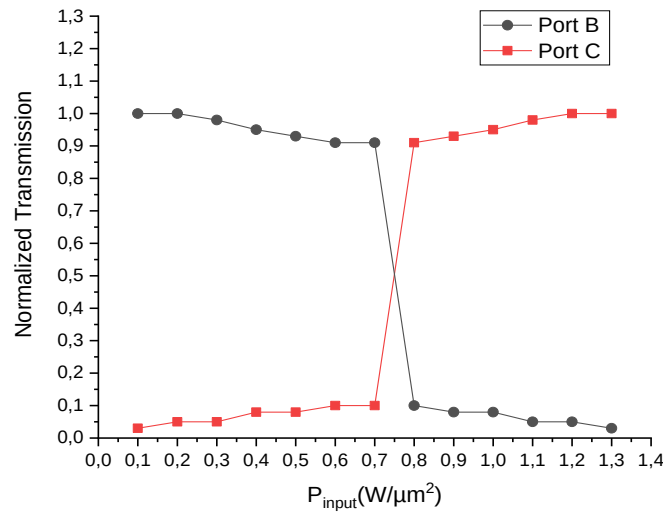


Figure IV.23 : Courbe de transmission en fonction de la puissance d'entrée.

Comme on peut le voir sur la figure (IV.23), pour une faible intensité de la puissance d'entrée ($P_{input} < 0.8 W$), les variations de l'indice de réfraction des tiges non linéaires sont négligeables. Par conséquent, presque tout le signal injecté par le port d'entrée est transmis au port "B". Pour une intensité d'entrée élevée ($P_{input} > 0.8 W$), l'indice de réfraction des tiges 'Si nano-crytsal' augmente en raison de l'effet Kerr, la longueur d'onde de résonance λ varie proportionnellement à la puissance appliquée ; par conséquent, le signal d'entrée est passé par le port "C".

IV.3.1.4 Porte logique NOT tout-optique

Pour tester le processus de la porte logique NOT tout-optique proposée (Figure (IV.24)), nous utilisons la méthode FDTD et nous simulons le signal des deux entrées mentionnées dans le tableau (IV.6).

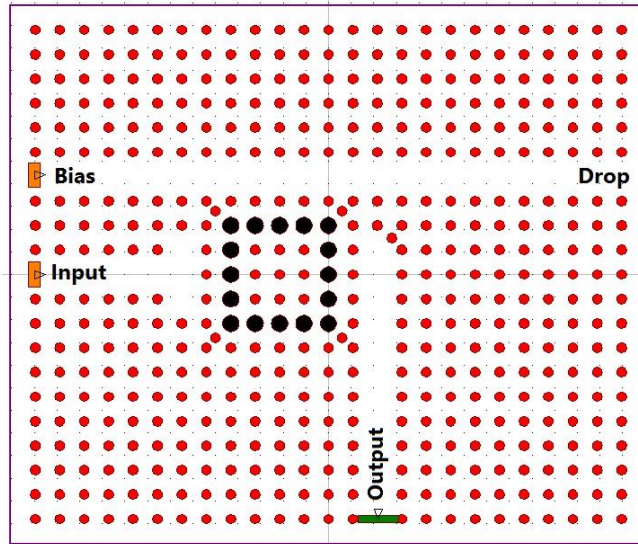


Figure IV.24 : Conception finale de notre proposition de commutateur tout optique.

Si l'intensité normalisée du signal de sortie est supérieure à 50%, le niveau logique est considéré comme « 1 » et si elle est inférieure à 5%, il s'agit du niveau « 0 », comme le montre la figure (IV.25).

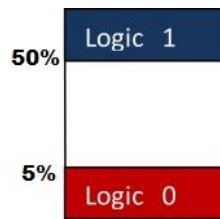


Figure IV.25 : Gamme de niveaux de la puissance logique.

Pour cela une onde optique continue avec $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, nous avons injecté un signal d'une densité de puissance égale à $0,2 \text{ W/m}^2$ via le port de commande (Biais) de la structure (Figure (IV.24)). L'autre source a été placée sur le port d'entrée logique (Input) avec les mêmes spécifications. Comme le montre la figure IV.26 (a), lorsque le port (Input) est désactivé (Input= 0), l'onde optique passe vers le port de sortie à travers le résonateur en anneau ; ce qui correspond niveau logique 1. La simulation est montrée par la distribution du champ électrique illustré dans la figure (IV.26 a). La figure (IV.27a) illustre la courbe de puissance de sortie évoluant dans le temps.

La figure (IV.26 b) montre le cas où l'entrée est activée (INPUT = 1). Dans ce cas, le signal optique de commande (Biais = $0,2 \text{ W/m}^2$) ne puisse pas tomber dans le guide d'ondes de sortie « Output » en raison du décalage de la longueur d'onde de résonance et dirigée vers le port « Droup », ce décalage est dû à l'activation de l'entrée jusqu'au seuil de commutation avec

une intensité (Input = 5 W/m^2) près de l'anneau. Par conséquent, le signal reçu au niveau de sorite de la porte logique « NOT » sera $0,0028 P_{in}$, ce qui correspond un niveau logique « 0 », comme le montre sur la figure (IV.27b).

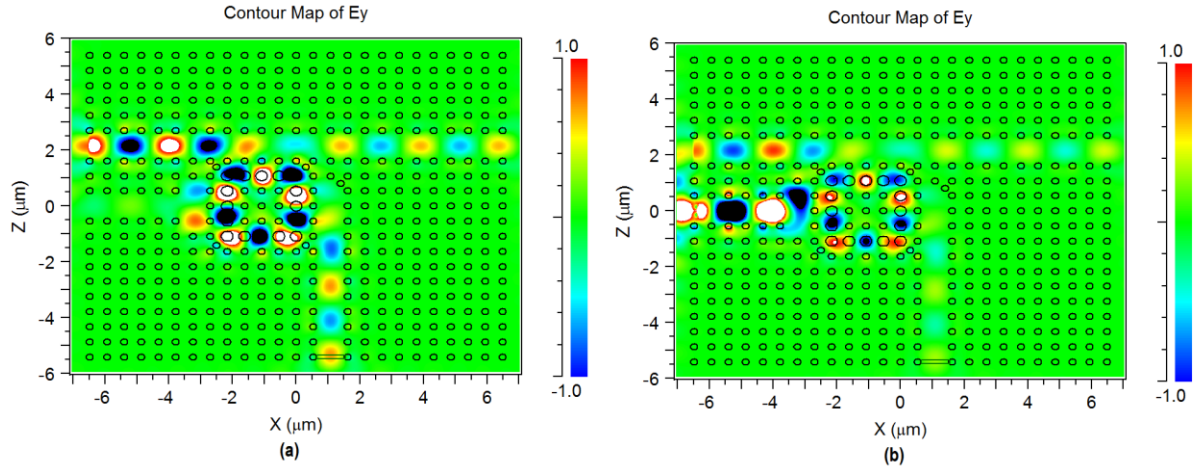


Figure IV.26 : Distribution du champ magnétique d'une porte logique tout-optique « OR » pour différents.

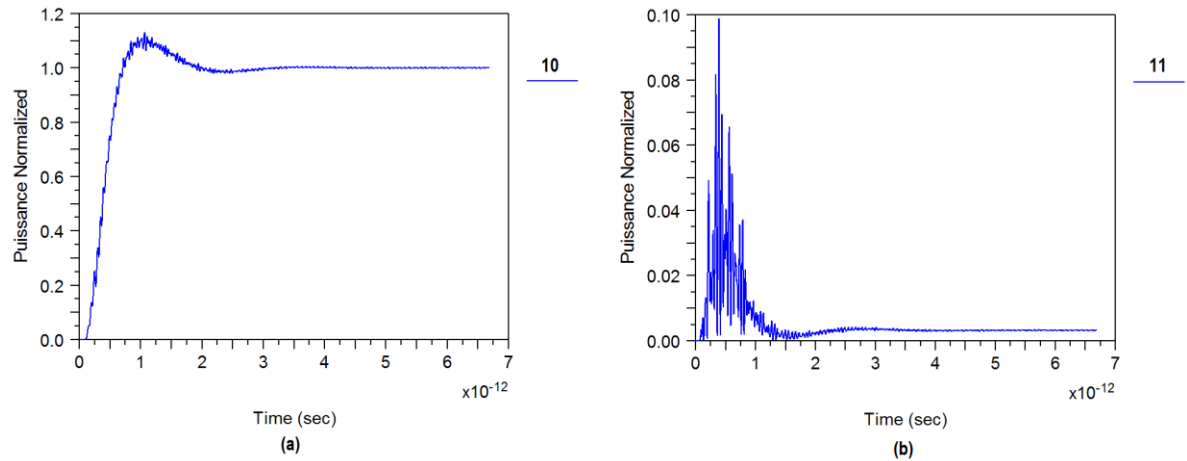


Figure IV.27 : Courbe d'évolution du temps de la porte « NOT » proposée pour différents états.

Table IV-6 : Table de vérité des portes logiques « NOT ».

Bias	Input	Output logic	Contrast ratio	Response period	BIT rate
Power ($\text{W}/\mu\text{m}^2$)	Power ($\text{W}/\mu\text{m}^2$)	Power normalized	25.52 dB	1.5 ps	0.66 Tbit/s
1 (0.2 W)	0 (0 W)	1 (P_{in})			
1 (0.2 W)	1 (5 W)	0 ($0.0028P_{in}$)			

IV.3.1.5 Porte logique OR tout optique

➔ **Cas 1 :** 'Input 1' et 'Input 2' = 0. Absence de transmission « 0 » au niveau du port de sortie comme le montre la figure (IV.28 et 29 (a)) ;

➡ **Cas 2 et 3 :** 'Input 1' = 0, 'Input 2' = 1, et 'Input 1' = 1, 'Input 2' = 0. Lorsqu'un seul des ports d'entrée est excité par une puissance de $0,27 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ à la longueur d'onde de 1550 nm , les spectres de transmission normalisés au port de sortie sont $0,51 P_{\text{in}}$, correspondant au niveau logique 1, comme le montre la figure (IV.28 et 29(b)) et (IV.28 et 29(c)) ;

➡ **Cas 4 :** 'Input 1' = 1, 'Input 2' = 1. Lorsque les deux entrées sont excitées par $0,27 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ à la longueur d'onde de 1550 nm , les spectres de transmission normalisés au niveau du port de sortie sont de $1,3 P_{\text{in}}$, ce qui correspondrait à 1 logique, comme le montre la figure (IV.28 et 29(d)).

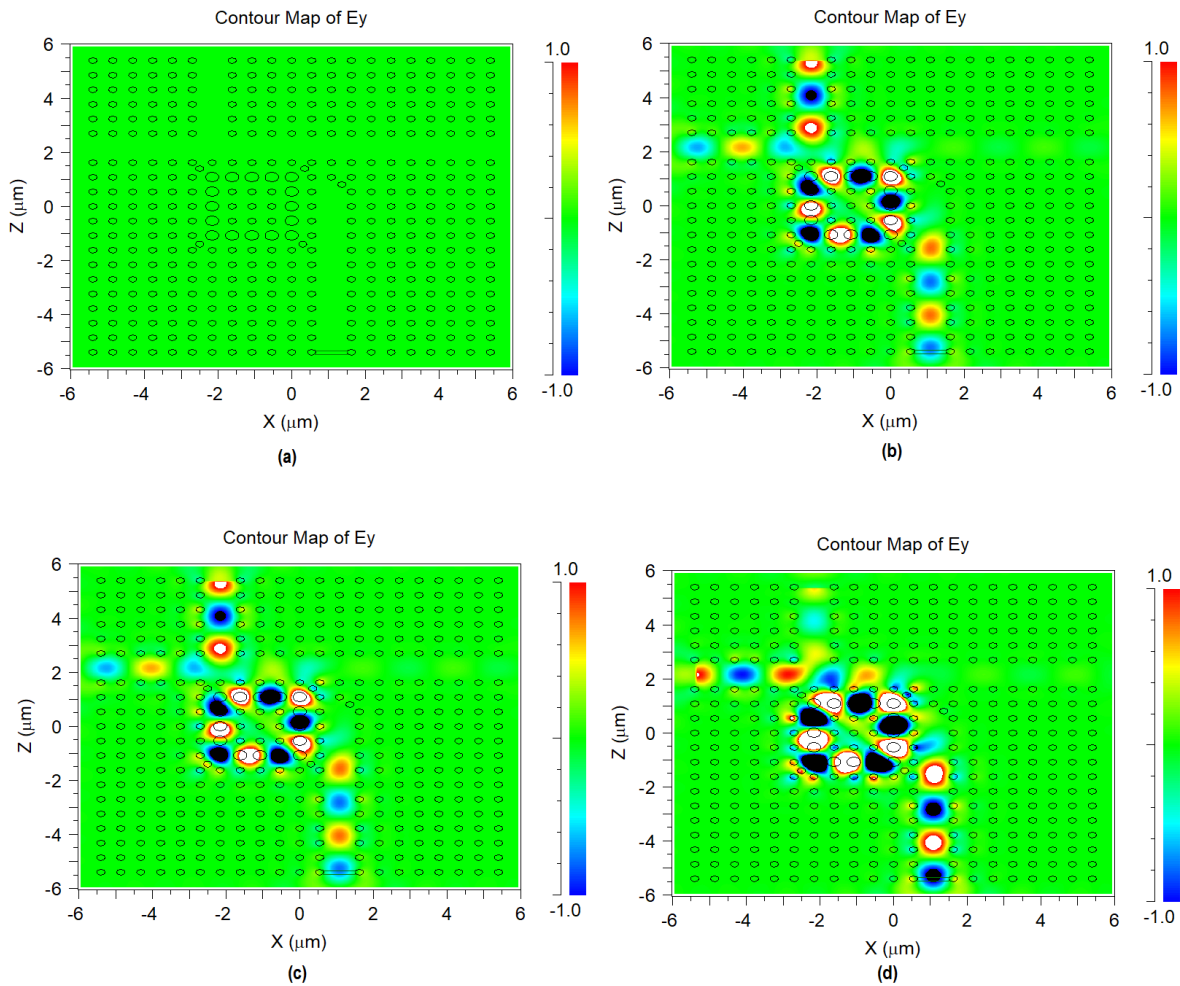


Figure IV.28 : Distribution du champ magnétique d'une porte logique tout-optique « OR » pour différents états.

Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires

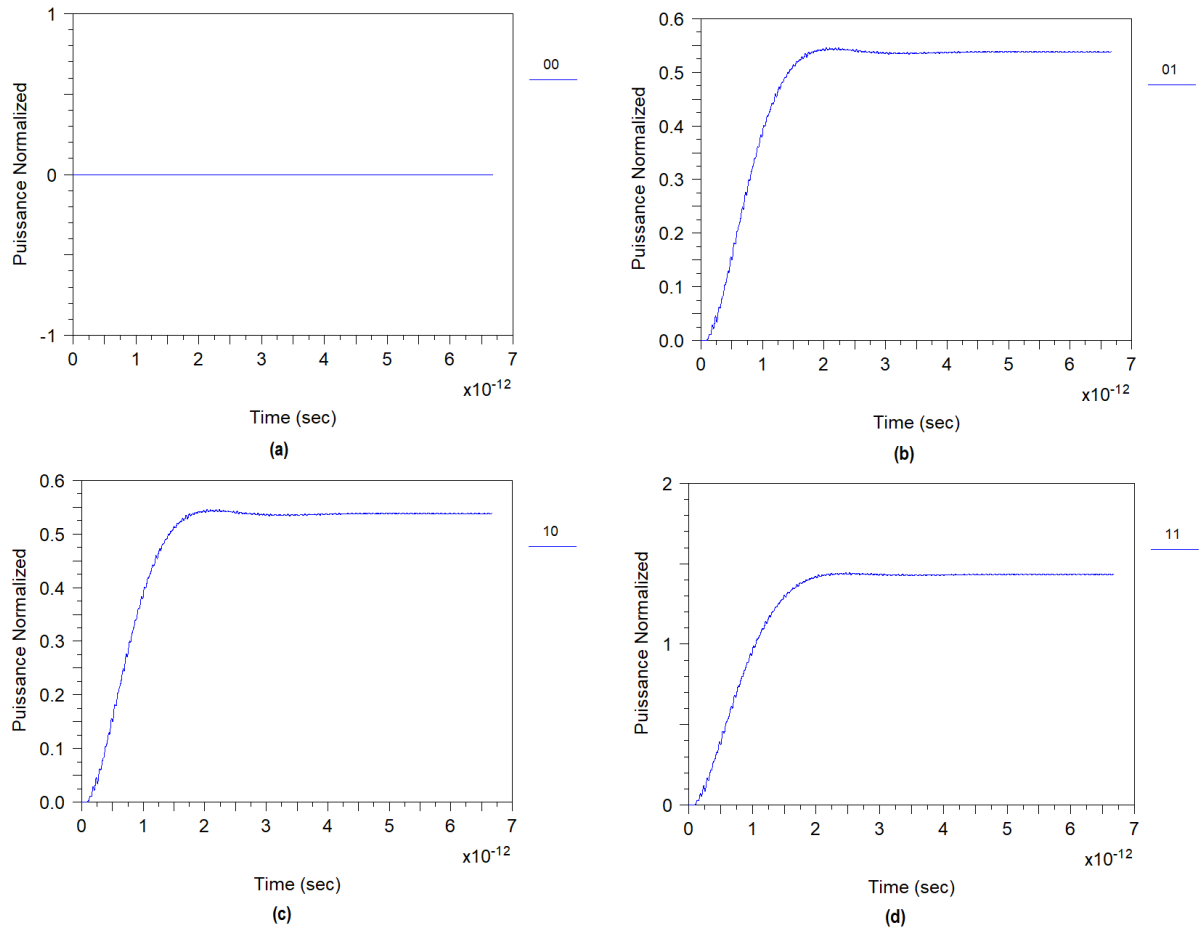


Figure IV.29 : Courbe d'évolution du temps de la porte « OR » proposée pour différents états.

Table IV-7 : Table de vérité des portes logiques « NOT ».

Input 1 Power (W/ μm)	Input 2 Power (W/ μm)	Output logic		Response period	BIT rate
		Transmission P_{out}/P_a	Output		
0	0	0	0	2 ps	0.5 Tbit/s
0	1 (0.27 W/ μm)	0.54	1		
1 (0.27 W/ μm)	0	0.54	1		
1 (0.27 W/ μm)	1 (0.27 W/ μm)	1.42	1		

Table IV-8 : Tableau de comparaison Porte « OR ».

	LA LONGUEUR D'ONDE DE FONCTIONNEMENT	LA TAILLE DE LA STRUCTURE	TEMPS DE RÉPONSE	DÉBIT BINAIRE
NOTRE PORTE OR	1550 nm	168 μm^2	0.9 ps	1.11 Tbit /s
REF [39]	1492 nm	1628 μm^2	3 ps	333 Gbit/s
REF [40]	1550 nm	433.5 μm^2	3 ps	333 Gbit/s
REF [41]	1550 nm	567 μm^2	-	-

Comme le montre le tableau (IV.8), cette structure est comparée à plusieurs portes logiques présentées dans [39, 40 et 41]. La porte logique proposée est plus petite en taille que les autres portes et elle possède un temps de réponse très rapide et un haut débit binaire.

IV.3.1.6 Conclusion

Les portes logiques NOT et OR tout optique sont basées sur le concept d'un commutateur tout optique avec effet Kerr, qui est composé de tiges $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ suspendues dans l'air avec un résonateur en anneau non linéaire créé en intégrant des tiges en nanocristal de silicium « Si-nc ». La porte logique « NOT » est caractérisée par un rapport de contraste très élevé et un débit binaire d'environ 25,52 dB et 0.66 Tbit/s, respectivement avec un temps de réponse de 1.5 ps. Le temps de réponse pour la porte logique « OR » est obtenu à 2 ps ce qui correspond un débit binaire 0.5 Tbit/s μm . La structure proposée est adaptée aux circuits intégrés photoniques, à faible perte, à faible consommation d'énergie et facile à fabriquer grâce à la simplicité de sa géométrie.

IV.3.2 Évaluation des performances des portes logiques tout-optiques NOT, XOR, NOR et XNOR basées sur des cristaux photoniques non linéaires à cavité résonante en 2D.

IV.3.2.1 Introduction

Les portes et les dispositifs logiques tout-optiques sont les principaux composants du traitement du signal tout-optique qui jouent un rôle très important dans les circuits intégrés modernes [42]. Dans le cadre des efforts déployés pour augmenter et optimiser la vitesse de ces circuits, l'utilisation des portes logiques tout-optique a été considérée comme importante au cours des dernières décennies [43-45]. Elles ont été conçues de différentes façons. Certaines d'entre elles ont été représentées par des résonateurs en anneau [46,47], par des guides d'ondes en Niobate de Lithium à pôles périodiques [48-49], par des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) [51,52]. Ces méthodes présentent plusieurs inconvénients, à savoir une consommation d'énergie très élevée, une faible vitesse et une bande passante étroite centrée à la longueur d'onde opérationnelle, une intégration à l'échelle de la puce, une grande taille, ... etc.

Récemment, pour éviter ces inconvénients, la technologie des cristaux photoniques (PhCs) est apparue comme une technologie alternative, qui se caractérise par sa consommation d'énergie, sa petite taille et sa vitesse de fonctionnement élevée [53-57]. Ils peuvent également être très efficaces dans le développement des circuits logiques tout-optiques en raison de la présence de la bande interdite photonique (PBG) [58-61]. Grâce à cette caractéristique, plusieurs portes logiques ont été proposées, basées sur certains phénomènes optiques, tels que l'interféromètre de Mach-Zehnder [62], le faisceau auto-collimaté [63], différentes formes de structures résonantes [64], les effets Kerr non linéaires [65], les phénomènes d'interférence d'ondes [66].

Dans certains travaux, basés sur l'interférence des ondes [67-68], il existe un problème important dans la conception des portes logiques, c'est le changement de phase des entrées. Cette conception est l'un des problèmes non résolus, dans la pratique, il est impossible de la réaliser et de l'utiliser, en raison de la nécessité d'un élément supplémentaire pour changer la phase de chaque entrée.

Dans cette partie de ce chapitre, nous avons proposé des structures optimisées et plus performantes pour les portes logiques tout-optiques NOT, XOR, NOR et XNOR basées sur la cavité résonante non linéaire et l'effet d'interférence destructif. Une table de vérité pour

chaque porte logique a été vérifiée et adaptée à la longueur d'onde 1,55 μm . Les résultats trouvés ont été comparés aux résultats déjà publiés pour valider les performances des structures proposées. Les paramètres fonctionnels tels que la taille de la structure, le rapport de contraste, la consommation d'énergie, la simplicité de conception et de fabrication ont été optimisés. Le fait que cette structure puisse être utilisée pour plusieurs portes est un avantage par rapport aux autres structures précédemment étudiées.

IV.3.2.2 Résultats et discussion

Un cristal photonique bidimensionnel de tiges circulaires en Silicium "Si", avec une permittivité relative de $\epsilon_{Si} = n_{Si}^2 = (3.43)^2$, suspendues dans l'air dans un réseau de géométrie carrée. Le nombre de bâtonnets dans les directions X et Z est respectivement de 14×14 et le rapport entre le rayon des tiges « R » et la constante du réseau « a » est de 0.2, comme le montre la figure (IV.30a).

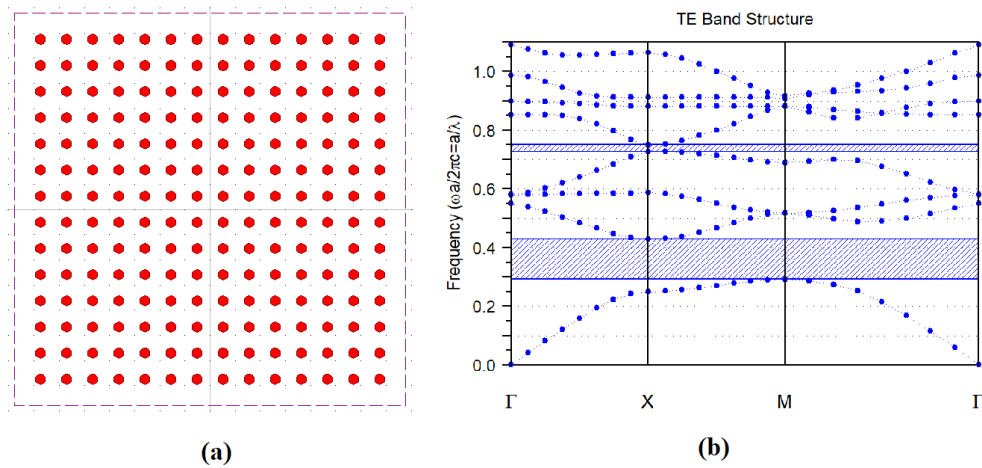


Figure IV.30 : (a) Structure initiale proposée, (b) Diagramme bande en mode TE.

Selon les paramètres suscités, la figure (IV.30b), montre l'existence de deux BIPs en mode TE. Les plages de fréquences normalisées (a/λ) pour les deux bandes sont $[0.29 - 0.435]$ et $[0.73 - 0.75]$. La première plage de longueur d'onde du PBG est comprise entre 1195,4 et 1793,1 nm, ce qui convient à la conception de la porte logique proposée car elle appartient à la troisième fenêtre des télécommunications optiques.

IV.3.2.3 Simulations et analyse des résultats pour la porte logique NOT

Pour modéliser la porte logique optique NOT, nous avons trois ports à considérer : Port 1 pour le signal de référence 'Bias', Port 2 pour le signal 'Input', et Port 3 pour le signal 'Output'. Le matériau non linéaire utilisé pour les tiges diélectriques de la cavité est $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$.

$x\text{As}$ ($0 < x < 1$) avec les indices de réfraction linéaire et non linéaire de $n_0 = 3,1$ et $n_2 = 1,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, respectivement. Le rayon de la tige de la cavité est de 56 nm pour obtenir des performances très élevées à la longueur d'onde de 1550 nm.

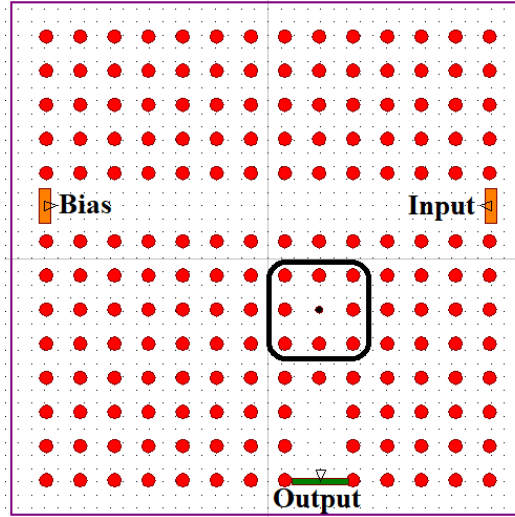


Figure IV.31 : Structure 'NOT' conçue.

La figure (IV.33) montre le modèle du champ magnétique de la porte logique 'NOT' à deux états suivants :

- ➡ Cas 1 : 'Bias'=1 (410 mW) et 'Input'=0. Le signal optique est transmis à la sortie. Comme le montre la figure (IV.32), environ 96,2% de la puissance d'entrée est atteinte au niveau du port de sortie. Par conséquent, cette puissance optique (Bias=410 mW) a été choisie pour obtenir une transmission très élevée en cas d'absence du signal d'entrée.
- ➡ Cas 2 : 'Bias'='Input'=1 (410 mW). Le signal au port 'Input' s'interfère destructivement avec le signal de référence 'Bias' au centre de la structure. Dans ce cas, le moniteur de sortie ne collecte que 0,02 % (figure IV.32) de la puissance d'entrée, comme le montre la figure IV.32, ce qui correspond au niveau logique « 0 ». Les figure (IV.33a) et (IV.33b) montre le champ électromagnétique et l'intensité de la sortie. Les résultats obtenus par la simulation de la porte logique 'NOT' sont résumés dans le tableau (IV.9). La table (IV.10) compare les paramètres fonctionnels de notre conception proposée avec les conceptions étudiées et présentées dans [44, 45, 74, 75].

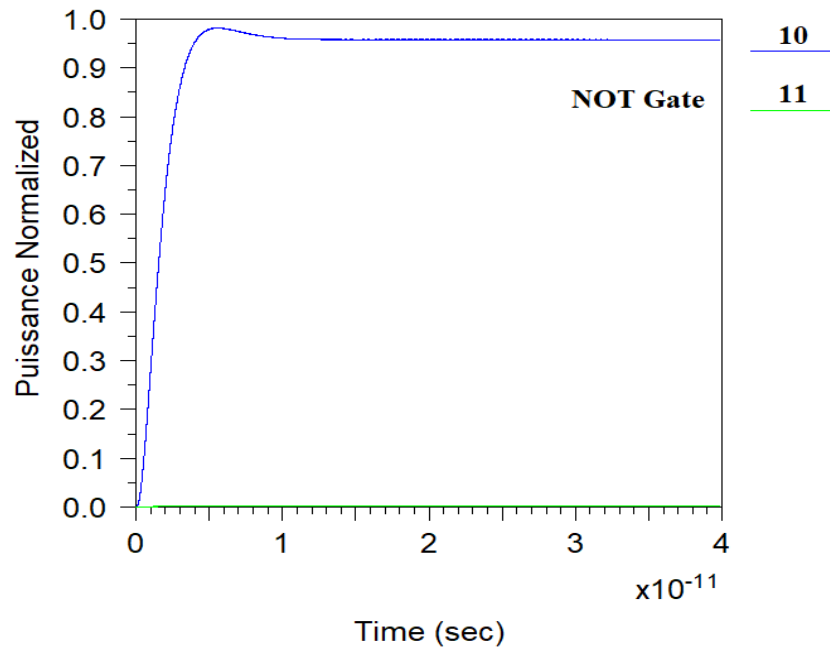


Figure IV.32 : Réponse temporelle de la sortie de la porte 'NOT' proposée.

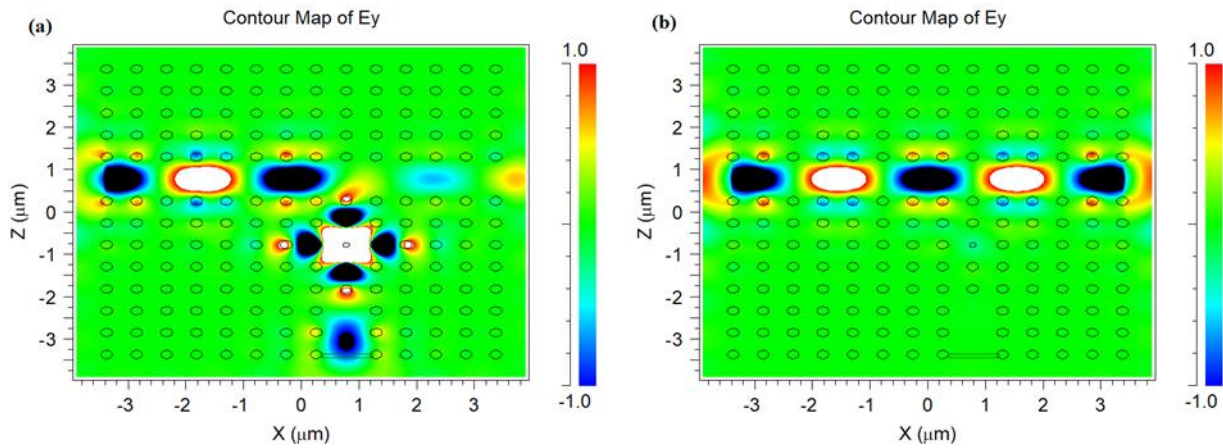


Figure IV.33 : Comportement optique de la porte 'NOT' : (a) : 'Bias'=1 (410 mW) et 'Input'=0 ; (b) : 'Bias'='Input'=1 (410 mW).

Table IV-9 : Niveaux de puissance et table de vérité pour la porte 'NOT'.

Bias		Input		Output	
Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance
1	410 mW	0	0 mW	0	0.962 Pin
1	410 mW	1	410 mW	1	0.002 Pin

Table IV-10 : Comparaison entre notre structure et les structures des travaux de recherches précédemment étudiées de la porte 'NOT'.

Références	Linéarité	Rapport de contraste (dB)	Taille (μm^2)	Temps de réponse (ps)
Our work	Non Linéaire	26.82	54.7	8.5
[44]	Non-Linéaire	25.52	168	0.66
[45]	Linéaire	25.08	85.8	8.33
[74]	Linéaire	15	60.2	0.14
[75]	Non-Linéaire	20.7	104	0.17

IV.3.2.4 Simulation et analyse des résultats pour la porte logique XOR

La structure 'NOT' conçue peut également être utilisée comme une porte logique 'XOR' tout-optique.

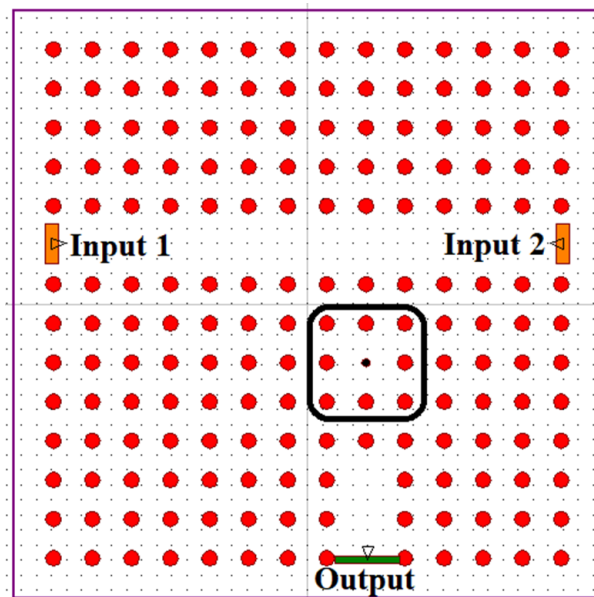


Figure IV.34 : Structure 'XOR' conçue.

Selon la table de vérité de la porte logique XOR, comme indiqué dans la table IV.11, les ports 'Input 1' et 'Input 2' sont considérés comme des ports d'entrée.

- ➡ Cas 1 : 'Input 1 = Input 2 = 0', la puissance de sortie est nulle (Figure (IV.36a) car aucune lumière ne pénètre dans la structure (Figure (IV.34)).
- ➡ Cas 2 et Cas 3 : Input 1 = 0' (0 mW), 'Input 2 = 1' (410 mW) et 'Input 1 = 1' (410 mW), 'Input 2 = 0' (0 mW), le signal passe de la cavité résonante non linéaire et atteint la sortie comme indiqué sur la Figure (IV.35). Le moniteur reçoit jusqu'à 95,2% pour le

cas 2 (Figure (IV.36b)) et 96,2% pour le cas 3 (Figure (IV.36c)) de la puissance d'entrée du signal.

- ➡ Cas 4 : 'Input 1 = Input 2 = 1' (410 mW), selon la simulation, les deux signaux optiques d'entrée s'interfèrent destructivement de sorte qu'aucune lumière ne passe (Figure (IV.35)) et le moniteur de sortie ne reçoit que 0,02% (Figure (IV.36d)) de la puissance du signal d'entrée.

Les tableaux (IV.11) et (IV.12) résument, respectivement, les états de fonctionnement de la structure 'XOR' que nous proposons et la comparaison des résultats de la simulation avec les conceptions précédemment publiées.

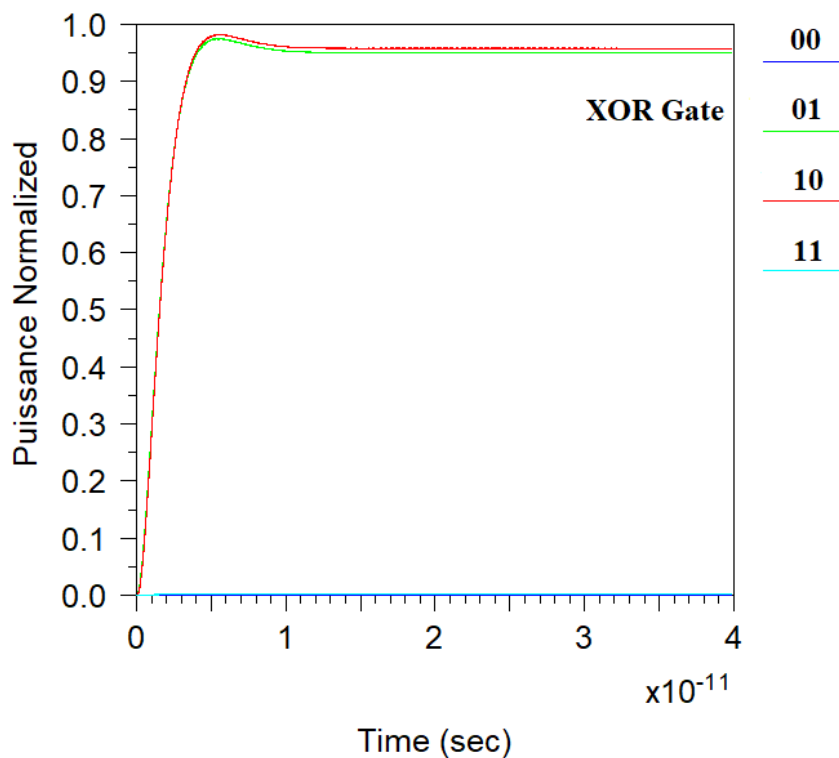


Figure IV.35 : Réponse temporelle de sortie de la porte 'XOR' proposée.

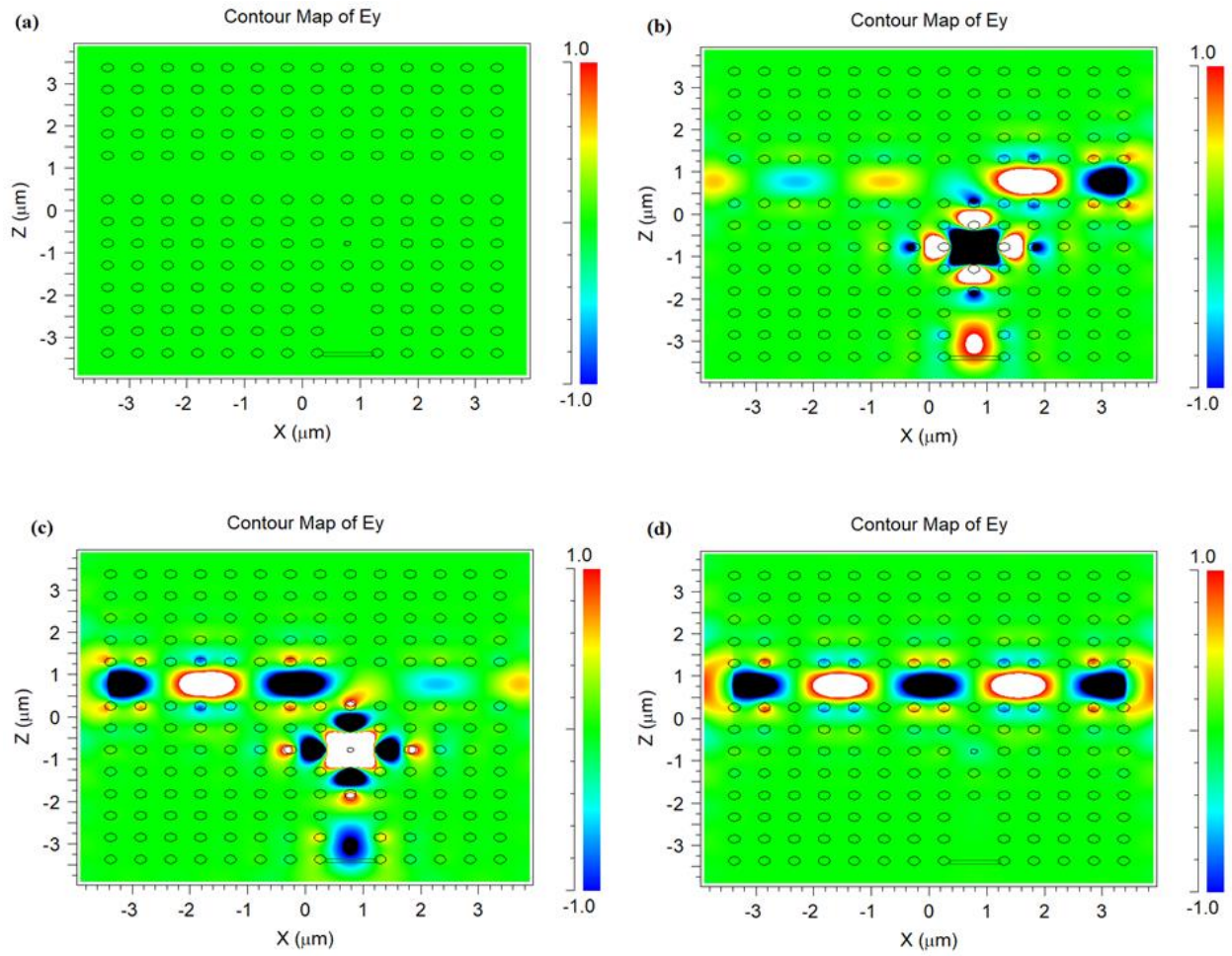


Figure IV.36 : Le comportement optique de la porte 'XOR' : (a) : 'Input 1' = 'Input 2'=0 ; (b) : 'Input 1'=0, 'Input 2'=1 (410 mW) ; (c) : 'Input 1'=1 (410 mW) et 'Input 2'=0 ; (d) : 'Input 1'= 'Input 2'=1 (410 mW).

Table IV-11 : Niveaux de puissance et table de vérité et pour les portes logiques 'XOR'.

Input 1		Input 2		Output	
Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance
0	0 mW	0	0 mW	0	0 Pa
0	0 mW	1	410 mW	1	0.952 Pa
1	410 mW	0	0 mW	1	0.962 Pa
1	410 mW	1	410 mW	0	0.002 Pa

Table IV-12 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte logique 'XOR'.

Références	Linéarité	Rapport de contraste (dB)	Taille (μm^2)	Temps de réponse (ps)
Notre structure	Non- Linéaire	26.77	54.7	8.5
[44]	Non- Linéaire	25	104	0.2
[45]	Linéaire	25.03	85.8	8.33
[74]	Linéaire	14.7	60.2	0.14
[76]	Linéaire	19.95	252	0.46
[77]	Linéaire	20	558	-

IV.3.2.5 Simulations et analyse des résultats pour la porte logique NOR

Une porte logique 'NOR' tout optique peut être construite en combinant deux portes logiques 'NOT' avec le même signal de référence, comme le montre la figure (IV.37). 'Input 1' et 'Input 2' sont les ports d'entrée, 'Bias' est le signal de référence qui existe toujours et joue le rôle du 'signal de contrôle', 'Output' est le port de sortie.

Des simulations dans le domaine temporel des différences finies non linéaires (FDTD-NL) ont été effectuées pour démontrer le fonctionnement de notre porte logique 'NOR'. Les distributions logiques équivalentes pour les trois différentes entrées, de la porte logique 'NOR' proposée, sont illustrées sur la figure (IV.39) et listées dans la table IV.13. la table IV.14 compare les résultats de notre structure avec ceux des articles [37-40,44] publiés ces dernières années.

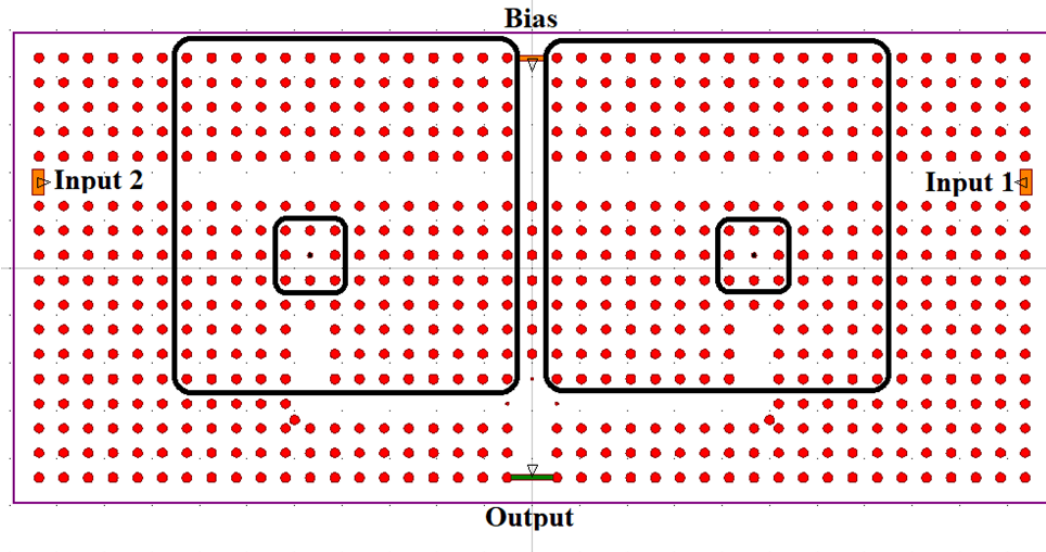


Figure IV.37 : Conception de la structure 'NOR'.

- ➡ Cas 1 : 'Bias' = 1, 'Input 1' = 0, 'Input 2' = 0. Le signal de référence 'Bias' avec une puissance de 610 mW va se diriger vers le port de sortie 'Output' à travers les deux cavités résonantes non linéaires en exploitant les deux phénomènes de piégeage et de couplage respectivement. Dans ce cas, la puissance obtenue par le moniteur du port de sortie est de 0,558 Pa (logique 1). Comme le montrent les figures (IV.38) et (IV.39a).
- ➡ Cas 2 : 'Bias' = 1, 'Input 1' = 0, 'Input 2' = 1. Le signal de référence 'Bias' d'une puissance de (610 mW) interfère de manière destructive au centre de la structure avec le signal d'entrée 'Input 2' d'une puissance de 305 mW. Dans ce cas, la puissance de sortie est de 0,08 Pa (logique 0). Comme le montrent les figures (IV.38) et (IV.39b).
- ➡ Cas 3 : 'Bias' = 1, 'Input 1' = 1, 'Input 2' = 0. Les signaux d'entrée 'Bias' d'une puissance de 610 mW et 'Input 1' d'une puissance de 305 mW subissent des interférences destructives au centre de la structure, ce qui donne une puissance de sortie de 0,08 % (logique 0). Comme le montrent les figures (IV.38) et (IV.39c).
- ➡ Cas 4 : 'Bias' = 1, 'Input 1' = 1, 'Input 2' = 1. Le signal de commande 'Bias' d'une puissance de 610 mW produit une interférence destructive au centre des deux structures combinées avec les signaux d'entrée 'Input 1' et 'Input 2' qui ont une puissance de 305 mW. Dans ce cas, la puissance de sortie est de 0,08% ce qui correspond à un niveau logique 0. Comme le montrent les figures (IV.38) et (IV.39d).

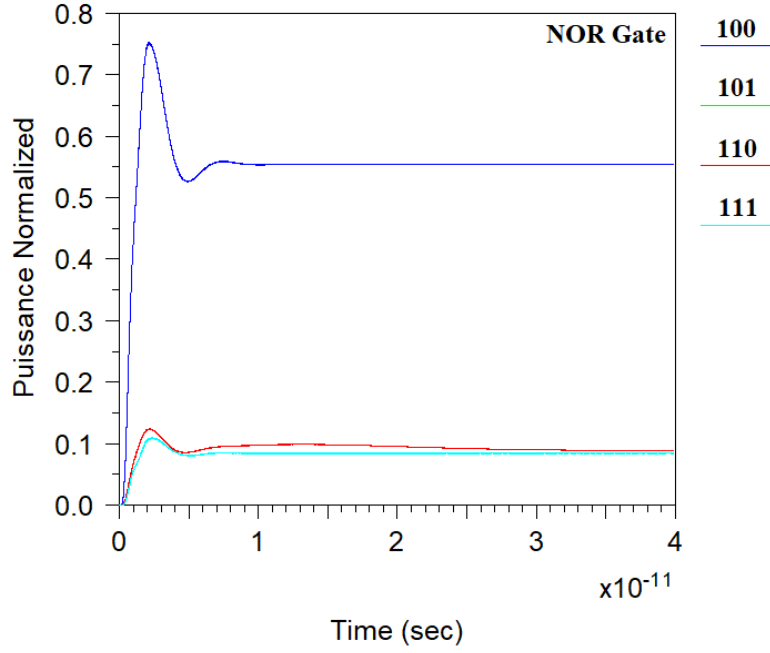


Figure IV.38 : Réponse temporelle de la sortie de la porte 'NOR' proposée.

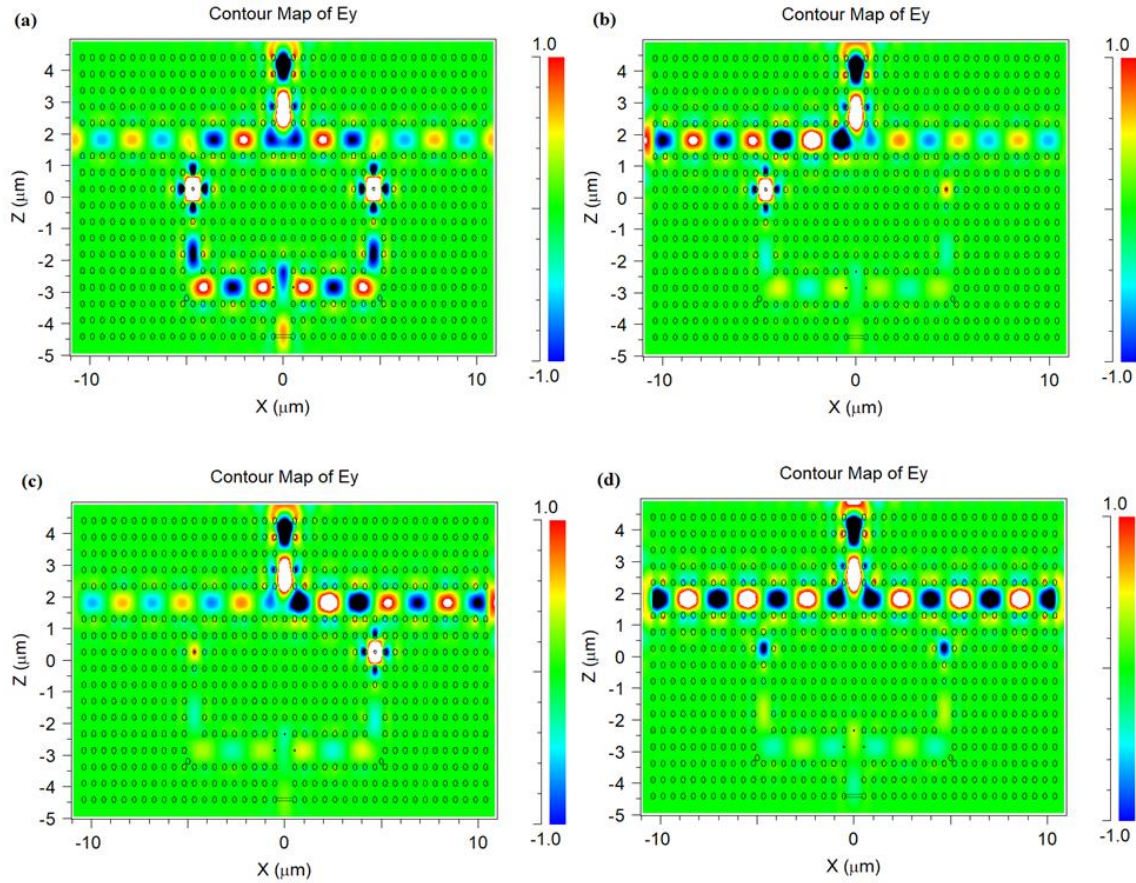


Figure IV.39 : Comportement optique de la porte 'NOR' : (a): 'Bias' = 1 (610 mW) and 'Input 1' = 'Input 2' = 0; (b): 'Bias' = 1 (610 mW), 'Input 1'=0, and 'Input 2'=1 (305 mW); (c): 'Bias' = 1 (610 mW), 'Input 1'=1 (305 mW) and 'Input2'=0; (d): 'Bias' = 1 (610 mW), 'Input 1' = 'Input 2'=1 (305 mW).

Chapitre IV : Les portes logiques optique à base cristaux photoniques non-linéaires

Comme le montre la figure (IV.38), le temps de réponse de la structure proposée est d'environ 8,5 ps avec un débit binaire de 0,11 Tbit/s.

Table IV-13 : Niveaux de puissance et table de vérité de la porte 'NOR'.

Bias		Input 1		Input 2		Output	
Logical level	Power level	Logical level	Power level	Logical level	Power level	Logical level	Power level
1	610 mW	0	0 mW	0	0 mW	1	0.558 Pa
1	610 mW	0	0 mW	1	305 mW	0	0.08 Pa
1	610 mW	1	305 mW	0	0 mW	0	0.08 Pa
1	610 mW	1	305 mW	1	305 mW	0	0.08 Pa

Table IV-14 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte 'NOR'.

References	Linearity	Contrast ratio (dB)	Size (μm^2)	Response time (ps)
Notre porte	Nonlinear	8.43	205.9	8.5
[78]	Nonlinear	-	988	1.5
[79]	Linear	7.88	348.5	0.388
[80]	Nonlinear	11.91	471.32	-
[81]	Linear	2.97	424.7	-
[85]	Linear	6.8	144	0.1

IV.3.2.6 Simulations et analyse des résultats pour la porte logique XNOR

Pour modéliser une porte 'XNOR' tout-optique, nous avons utilisé trois sources optiques (Bias, Input 1, Input 2) avec une puissance de $470\text{mW}/\mu\text{m}^2$ à la longueur d'onde de 1550 nm comme le montre la figure (IV.40). Le port 'Bias' est toujours activé pour faire fonctionner notre dispositif lorsque les ports 'Input 1' et 'Input 2' sont désactivés. L'idée principale pour le fonctionnement de la porte 'XNOR' est basée sur l'utilisation d'une cavité résonante non linéaire et l'effet d'interférence destructive. Pour décrire le fonctionnement de cette porte logique, nous examinons les scénarios suivants :

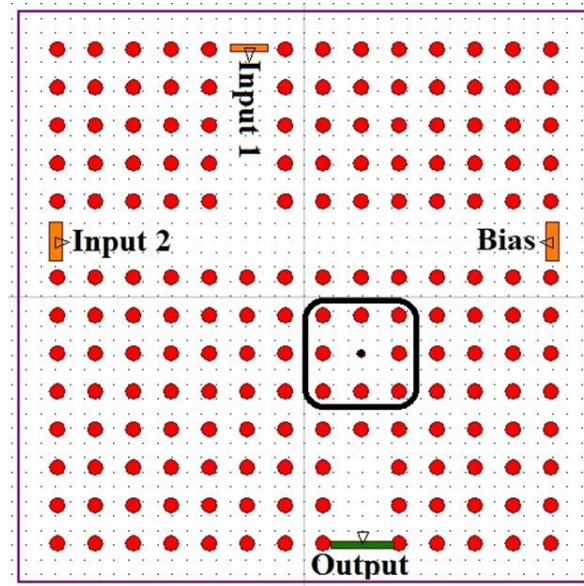


Figure IV.40 : Structure 'XNOR' conçue.

- ➡ Cas 1 : Bias = 1 (470 mW), Input 1 = Input 2 = 0 (0 mW). Le signal optique d'entrée 'Bias' est couplé au guide d'ondes de sortie à travers la cavité résonante non linéaire et dirigé vers le port de sortie (Output) avec une transmission du niveau logique de sortie « 1 » égale à 51,2%. Comme le montrent les figures (IV.41) et (IV.42a).
- ➡ Cas 2 : 'Bias' = 1 (470 mW), 'Input 1' = 0 (0 mW) et 'Input 2' = 1 (470 mW). Le signal optique 'Bias' fait interfère destructivement avec le signal d'entrée 'Input 2' au centre de la structure, le signal couplé avec la cavité résonante non-linéaire est presque nul (0.005%) ce qui correspond au niveau logique « 0 ». Comme le montrent les figures (IV.41) et (IV.42b).
- ➡ Cas 3 : 'Bias' = 1 (470 mW) et 'Input 1' = 1 (470 mW), 'Input 2' = 0 (0 mW). Le signal optique 'Bias' interfère de manière destructive avec le signal d'entrée 'Input 1' au centre de la structure, de sorte que la cavité résonante ne peut laisser passer les ondes optiques que d'environ 0,005% dans le guide d'ondes de sortie, ce qui correspond au niveau logique « 0 ». Comme le montrent les figures (IV.41) et (IV.42c).
- ➡ Cas 4 : 'Bias' = 1 (470 mW) et 'Input 1' = 1 (470 mW), 'Input 2' = 1 (470 mW). Les deux signaux optiques 'Input 1' et 'Input 2' sont couplés ensemble et dirigés vers la sortie à travers la cavité résonnante non linéaire avec un pourcentage de transmission de 62,2% qui correspond à un niveau logique « 1 » en raison de l'absence des interférences destructives au centre de la structure. Comme le montrent les figures (IV.41) et (IV.42d).

La puissance normalisée et les contrastes des logiques 0 et 1 pour la porte ‘XNOR’ sont résumés dans le tableau IV.15. Selon le tableau IV.16, on peut conclure que la structure ‘XNOR’ proposée est caractérisée par un rapport de contraste très élevé avec une taille ultra-compacte par rapport aux travaux précédents [45, 82, 83, 84]. Cette caractéristique est un avantage très important pour les dispositifs tout-optiques.

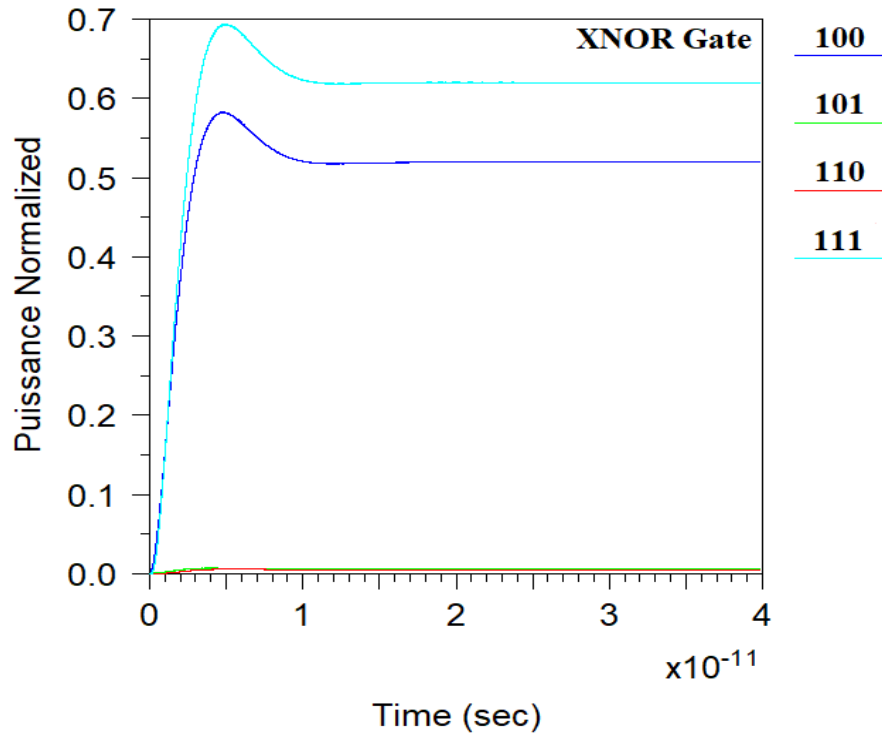


Figure IV.41 : Réponse temporelle de sortie de la porte ‘XNOR’ proposée.

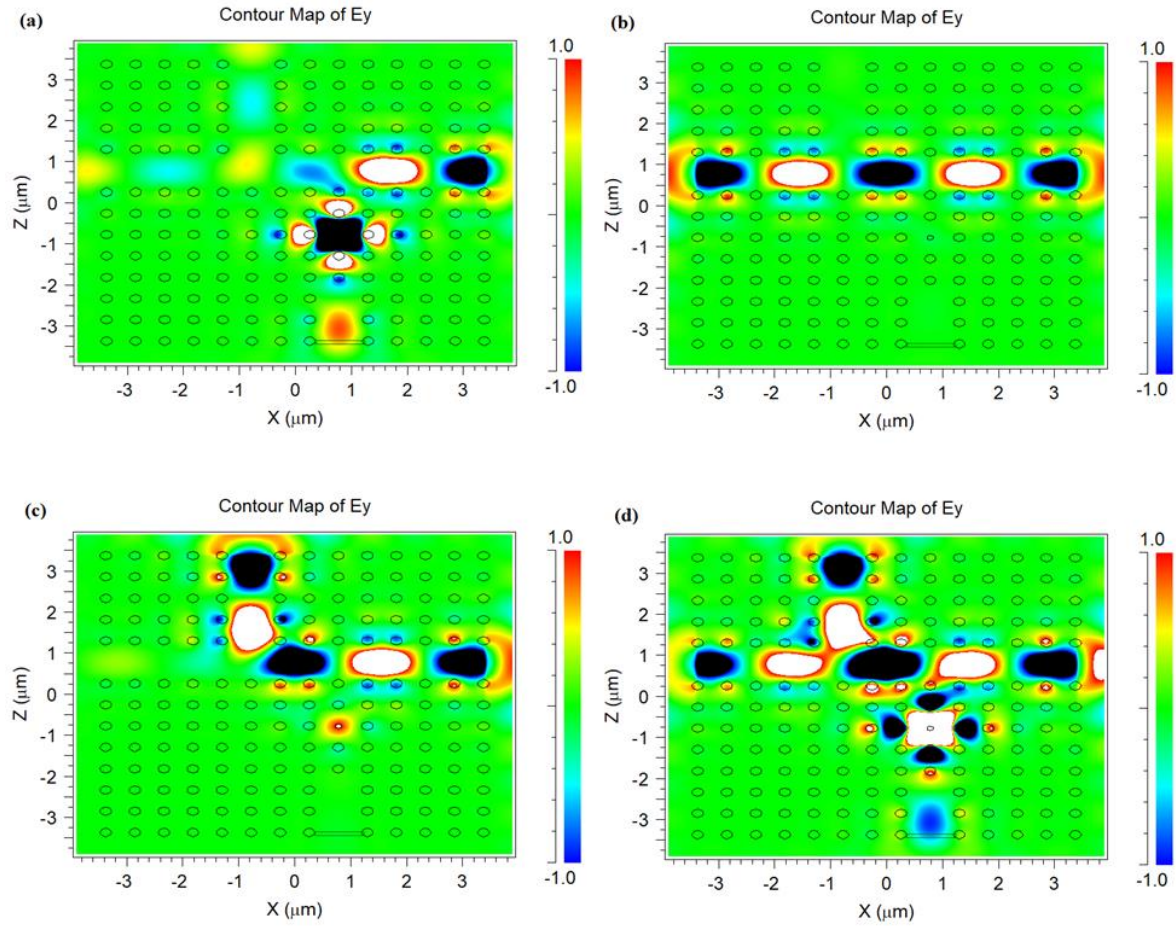


Figure IV.42 : Comportement optique de la porte ‘XNOR’: (a): ‘Bias’ = 1 (470 mW) and ‘Input 1’= ‘Input 2’ = 0; (b): ‘Bias’ = 1 (470 mW), ‘Input 1’=0, and ‘Input 2’=1 (470 mW); (c): ‘Bias’ = 1 (470 mW), ‘Input 1’=1 (470 mW) and ‘Input2’=0; (d): ‘Bias’ = 1 (470 mW), ‘Input 1’= ‘Input 2’=1 (470 mW).

Table IV-15 : Niveaux de puissance et table de vérité de la porte ‘XNOR’.

Bias		Input 1		Input 2		Output	
Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance	Niveau logique	Niveau de puissance
1	470 mW	0	0 mW	0	0 mW	1	0.521 Pa
1	470 mW	0	0 mW	1	470 mW	0	0.005 Pa
1	470 mW	1	470 mW	0	0 mW	0	0.005 Pa
1	470 mW	1	470 mW	1	470 mW	1	0.622 Pa

Table IV-16 : Comparaison entre notre structure et celles des articles précédents concernant la porte 'XNOR'.

References	Linéarité	Rapport de contraste (dB)	Taille (μm^2)	Temps de réponse (ps)
Notre porte	Nonlinear	20.17	54.7	8.5
[45]	Linear	14.47	85.8	8.33
[80]	Linear	10.52	38.88	-
[81]	Linear	-	625	-
[82]	Linear	-	735	-

IV.3.2.7 Conclusion

Dans cette partie, nous avons développé et analysé des portes logiques NOT, XOR, NOR et XNOR basées sur des cristaux photoniques bidimensionnels, et leurs caractéristiques de performance fonctionnelle ont été étudiées à l'aide de la méthode FDTD-NL à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$. Le rapport de contraste des portes logiques tout-optiques NOT, XOR, NOR et XNOR est respectivement de 26,82 dB, 26,77 dB, 8,34 dB et 20,17 dB. Grâce à la simplicité de conception et de fonctionnement, la taille de chaque structure ultra-compacte, un rapport de contraste très élevé, ces portes logiques offrent donc la possibilité d'une application pratique et elles sont utilisées pour les traitements optiques à grande échelle pour les processeurs optiques.

IV.4 Références

- [1] Kouddad E, Vigneswaran D, Naoum R, Deepika K, Dekkiche.L (2022). All Optical Logic Gates Function By Ring Resonator Properties Aiding Photonic Crystal. Soumis
- [2] Singh, J. J., Dhawan, D., & Gupta, N. (2020). All-optical photonic crystal logic gates for optical computing: an extensive review. *Optical Engineering*, 59(11), 110901.
- [3] Wang, B., Li, C., Chen, C. H., Yu, K., Fiorentino, M., Beausoleil, R. G., & Palermo, S. (2016). A compact Verilog-A model of silicon carrier-injection ring modulators for optical interconnect transceiver circuit design. *Journal of Lightwave Technology*, 34(12), 2996-3005.
- [4] Ouahab, I., &Naoum, R. (2016). A novel all optical 4×2 encoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Optik*, 127(19), 7835-7841.
- [5] Elhachemi, K., Rafah, N., & Leila, D. (2021). High Sensitivity And Ultra-High Quality Factor For An All-Optical Temperature Sensor Based On Photonic Crystal Technology.
- [6] Benmerkhi, A., Bouchemat, M., &Bouchemat, T. (2020). Design of two-dimensional photonic crystal biosensor using DNA detection. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 195(11), 960-964.
- [7] Berry, A., Anand, N., Anandan, S., & Krishnan, P. (2021). High-Performance Eight-Channel Photonic Crystal Ring Resonator-Based Optical Demultiplexer for DWDM Applications. *Plasmonics*, 1-8.
- [8] Dekkiche, L., Naoum, R., &Hamam, H. (2011). A novel all optical and logic gate based on nonlinear photonic crystal. *Sensor Letters*, 9(6), 2162-2164.
- [9] Kouddad, E., &Naoum, R. (2020). Optimization of an all-optical photonic crystal NOT logic gate using switch based on nonlinear Kerr effect and ring resonator. *Sensor Letters*, 18(2), 89-94.
- [10] Elhachemi, K., & Rafah, N. (2020). A novel proposal based on 2D linear resonant cavity photonic crystals for all-optical NOT, XOR and XNOR logic gates. *Journal of Optical Communications*.
- [11] Derdour, R., Lebbal, M. R., Mouetsi, S., &Hocini, A. (2021). A novel connected structure of all-optical high speed and ultra-compact photonic crystal OR logic gate. *Journal of Optical Communications*.
- [12] Li, G. L., & Yu, P. K. L. (2003). Optical intensity modulators for digital and analog applications. *Journal of lightwave technology*, 21(9), 2010.
- [13] Chang, T. W., & Wu, C. J. (2013). Analysis of tuning in a photonic crystal multichannel filter containing coupled defects. *Optik*, 124(15), 2028-2032.

- [14] Abel, S., Stöferle, T., Marchiori, C., Rossel, C., Rossell, M. D., Erni, R., ... &Fompeyrine, J. (2013). A strong electro-optically active lead-free ferroelectric integrated on silicon. *Nature communications*, 4(1), 1-6.
- [15] Zhao, Y., Zhang, Y. N., Lv, R. Q., & Li, J. (2017). Electric field sensor based on photonic crystal cavity with liquid crystal infiltration. *Journal of Lightwave Technology*, 35(16), 3440-3446.
- [16] Yang, D., Tian, H., & Ji, Y. (2011). The study of electro-optical sensor based on slotted photonic crystal waveguide. *Optics Communications*, 284(20), 4986-4990.
- [17] L. KassaBaghdouche, T. Boumaza, M. Bouchemat, Optimization of Q-factor in nonlinear planar photonic crystal nanocavity incorporating hybrid silicon polymer material, *Phys. Scripta* 90 (2015) 065504.
- [18] Y. Zhao, Y. Ying, Q. Wang, Latest research progress on methods and technologies for tunable photonic crystals, *Optic Laser. Technol.* 64 (2017) 278–287.
- [19] Bernasconi, P., Zgonik, M., & Günter, P. (1995). Temperature dependence and dispersion of electro-optic and elasto-optic effect in perovskite crystals. *Journal of applied physics*, 78(4), 2651-2658.
- [20] Johnson, S. G., &Joannopoulos, J. D. (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis. *Optics express*, 8(3), 173-190.
- [21] O.Faolain, L., Beggs, D. M., White, T. P., Kampfrath, T., Kuipers, K., & Krauss, T. F. (2010). Compact optical switches and modulators based on dispersion engineered photonic crystals. *IEEE Photonics Journal*, 2(3), 404-414.
- [22] Shirdel, M., & Mansouri-Birjandi, M. A. (2016). Photonic crystal all-optical switch based on a nonlinear cavity. *Optik*, 127(8), 3955-3958.
- [23] S. Rebhi and M. Najjar, "Hourglass nonlinear photonic crystal cavity for ultra-fast all-optical switching" *Optik*, vol.180, pp.858–865, 2019.
- [24] Robinson, S., &Nakkeeran, R. (2013). Two dimensional photonic crystal ring resonator based add drop filter for CWDM systems. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 124(18), 3430-3435.
- [25] Lin, P. T., Liu, Z., & Wessels, B. W. (2009). Ferroelectric thin film photonic crystal waveguide and its electro-optic properties. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11(7), 075005.
- [26]. Nozhat, N.; Alikomak, H.; Khodadadi, M. All-optical XOR and NAND logic Gate Based on Plasmonic nanoparticle. *Opt. Commun.* 2017, 392, 208–213.

- [27] J. Baoa et al., “All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator,” *J. Opt. Commu.*, vol. 329, no. 15, pp. 109–112, Oct. 2014.
- [28] Mehdizadeh F, Alipour-Banaei H. Bandgap management in twodimensional photonic crystal thue-morse structures. *J OptCommun.* 2013;34:61–5.
- [29] Noori M, Soroosh M. A comprehensive comparison of photonic band gap and self-collimation based 2D square array waveguides. *Opt Int J Light Electron Opt.* 2015;126:4775–81.
- [30] Ouahab, I., &Naoum, R. (2016). A novel all optical 4× 2 encoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Optik*, 127(19), 7835-7841.
- [31] Serajmohammadi, S., Alipour-Banaei, H., &Mehdizadeh, F. (2015). All optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Optical and Quantum electronics*, 47(5), 1109-1115.
- [32] Surendar, A., Asghari, M., &Mehdizadeh, F. (2019). A novel proposal for all-optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs. *Photonic Network Communications*, 38(2), 244-249.
- [33] Karkhanehchi, M. M., Parandin, F., & Zahedi, A. (2017). Design of an all optical half-adder based on 2D photonic crystals. *Photonic Network Communications*, 33(2), 159-165.
- [34] Fallahi, V., Seifouri, M., Olyaei, S., &Alipour-Banaei, H. (2017). Four-channel optical demultiplexer based on hexagonal photonic crystal ring resonators. *Optical Review*, 24(4), 605-610.
- [35] Mehdizadeh, F., Soroosh, M., &Alipour-Banaei, H. (2016). A novel proposal for optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Optical and Quantum Electronics*, 48(1), 20.
- [36] Dekkiche, L., Naoum, R., &Hamam, H. (2011). A Novel All Optical AND Logic Gate Based on Nonlinear Photonic Crystal. *Sensor Letters*, 9(6), 2162-2164.
- [37] Kouddad, E., &Naoum, R. (2020). Optimization of an All-Optical Photonic Crystal NOT Logic Gate Using Switch Based on Nonlinear Kerr Effect and Ring Resonator. *Sensor Letters*, 18(2), 89-94.
- [38] In this paper, fullwave commercial software developed by Rsoft design group (<http://www.rsoftdesign.com>) is used for linear and nonlinear FDTD simulations, v. 2014, 09,license–16849450.
- [39] Salmanpour, A., Mohammadnejad, S., &Omran, P. T. (2015). All-optical photonic crystal NOT and OR logic gates using nonlinear Kerr effect and ring resonators. *Optical and Quantum Electronics*, 47(12), 3689-3703.

- [40] Salmanpour, A., Mohammadnejad, S., &Bahrami, A. (2015). All-optical photonic crystal AND, XOR, and OR logic gates using nonlinear Kerr effect and ring resonators. *Journal of Modern Optics*, 62(9), 693-700.
- [41] Pashamehr, A., Zavvari, M., &Alipour-Banaei, H. (2016). All-optical AND/OR/NOT logic gates based on photonic crystal ring resonators. *Frontiers of Optoelectronics*, 9(4), 578-584.
- [42] Yablonovitch, E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical review letters*, 58(20), 2059.
- [43] Dekkiche, L., Naoum, R., &Hamam, H. (2011). A novel all optical and logic gate based on nonlinear photonic crystal. *Sensor Letters*, 9(6), 2162-2164.
- [44] Kouddad, E., &Naoum, R. (2020). Optimization of an all-optical photonic crystal NOT logic gate using switch based on nonlinear Kerr effect and ring resonator. *Sensor Letters*, 18(2), 89-94.
- [45] Elhachemi, K., & Rafah, N. (2020). A novel proposal based on 2D linear resonant cavity photonic crystals for all-optical NOT, XOR and XNOR logic gates. *Journal of Optical Communications*, 1(ahead-of-print).
- [46] Sethi, P., & Roy, S. (2014). All-optical ultrafast XOR/XNOR logic gates, binary counter, and double-bit comparator with silicon microring resonators. *Applied optics*, 53(28), 6527-6536.
- [47] Nozhat, N., &Granpayeh, N. (2015). All-optical logic gates based on nonlinear plasmonic ring resonators. *Applied optics*, 54(26), 7944-7948.
- [48] Wang, J.; Sun, J.; Sun, Q. Experimental Observation of a 1.5 Microm Band Wavelength Conversion and Logic NOT Gate at 40 Gbit/s Based on Sum-Frequency Generation. *Opt. Lett* 2006, 31 (11), 1711–1713.
- [49] Wang, J.; Sun, J.; Sun, Q. Proposal for All-Optical Switchable OR/XOR Logic Gates Using Sum-Frequency Generation. *IEEE Photonics Technol. Lett* 2007, 19 (8), 541–543.
- [50] Wang, J.; Sun, J.; Sun, Q.;Wang, D.; Zhang, X.; Huang, D.; Fejer, M.M. PPLN-Based Flexible Optical Logic and Gate. *IEEE Photonics Technol. Lett* 2008, 20 (3), 211–213.
- [51] Zhang, X.;Wang, Y.; Sun, J.; Liu,D.;Huang,D. All-Optical AND Gate at 10 Gbit/s Based on Cascaded Single-Port- Couple SOAs. *Opt. Express* 2004, 12 (3), 361–366.
- [52] Feng, Y., Zhao, X., Wang, L., & Lou, C. (2009). High-performance all-optical or/nor logic gate in a single semiconductor optical amplifier with delay interference filtering. *Applied optics*, 48(14), 2638-2641.

- [53] Parandin, F., Kamarian, R., & Jomour, M. (2021). A novel design of all optical half-subtractor using a square lattice photonic crystals. *Optical and Quantum Electronics*, 53(2), 1-10.
- [54] Olyaei, S., & Dehghani, A. A. (2013). Ultrasensitive pressure sensor based on point defect resonant cavity in photonic crystal. *Sensor Letters*, 11(10), 1854-1859.
- [55] Olyaei, S., & Najafgholizadeh, S. (2013). A high quality factor and wide measurement range biosensor based on photonic crystal nanocavity resonator. *Sensor Letters*, 11(3), 483-488.
- [56] Parandin, F., Kamarian, R., & Jomour, M. (2021). Optical 1-bit comparator based on two-dimensional photonic crystals. *Applied Optics*, 60(8), 2275-2280.
- [57] Fard, S. R., Salehi, M. R., & Abiri, E. (2021). Ultra-fast all-optical ADC using nonlinear ring resonators in photonic crystal microstructure. *Optical and Quantum Electronics*, 53(2), 1-14.
- [58] Rani, P., Kalra, Y., & Sinha, R. K. (2013). Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide. *Optics Communications*, 298, 227-231.
- [59] Olyaei, S., Seifouri, M., Mohebzadeh-Bahabady, A., & Sardari, M. (2018). Realization of all-optical NOT and XOR logic gates based on interference effect with high contrast ratio and ultra-compacted size. *Optical and Quantum Electronics*, 50(11), 1-12.
- [60] Ibrahim, M. S. S., Mohammed, M., Hamed, M. K. G., Obayya, S. S. A., & Hameed, M. F. O. (2020). Ultracompact tunable bifunctional XOR and XNOR photonic crystal logic gates. *Optical Engineering*, 59(2), 027106.
- [61] Prabha, K. R., Arunkumar, R., & Robinson, S. (2020). Investigation on two dimensional photonic crystal based two/three input all optical AND gate. *Frequenz*, 74(11-12), 417-426.
- [62] Kumar, S., & Raghuwanshi, S. K. (2016). Design of optical reversible logic gates using electro-optic effect of lithium niobate based Mach-Zehnder interferometers. *Applied optics*, 55(21), 5693-5701.
- [63] Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, B. (2007). Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals. *Optics Express*, 15(15), 9287-9292.
- [64] Sharifi, H., Hamidi, S. M., & Navi, K. (2016). A new design procedure for all-optical photonic crystal logic gates and functions based on threshold logic. *Optics Communications*, 370, 231-238.
- [65] Sami, P., Shen, C., & Sani, M. H. (2020). Ultra-fast all optical half-adder realized by combining AND/XOR logical gates using a nonlinear nanoring resonator. *Applied Optics*, 59(22), 6459-6465.

- [66] Rao, D. G. S., Swarnakar, S., & Kumar, S. (2020). Design of all-optical reversible logic gates using photonic crystal waveguides for optical computing and photonic integrated circuits. *Applied Optics*, 59(35), 11003-11012.
- [67] Rani, P., Kalra, Y., & Sinha, R. K. (2013). Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide. *Optics Communications*, 298, 227-231.
- [68] Parandin, F., Malmir, M. R., Naseri, M., & Zahedi, A. (2018). Reconfigurable all-optical NOT, XOR, and NOR logic gates based on two dimensional photonic crystals. *Superlattices and Microstructures*, 113, 737-744.
- [69] Rani, P., Kalra, Y., & Sinha, R. K. (2015). Design of all optical logic gates in photonic crystal waveguides. *Optik*, 126(9-10), 950-955.
- [70] Rani, P., Fatima, S., Kalra, Y., & Sinha, R. K. (2017). Realization of all optical logic gates using universal NAND gates on photonic crystal platform. *Superlattices and Microstructures*, 109, 619-625.
- [71] haq Shaik, E., & Ranganaswamy, N. (2016). Improved design of all-optical photonic crystal logic gates using T-shaped waveguide. *Optical and Quantum Electronics*, 48(1), 33.
- [72] Lavrinenko, A., Borel, P. I., Frandsen, L. H., Thorhauge, M., Harpøth, A., Kristensen, M., ... & Chong, H. M. H. (2004). Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components. *Optics Express*, 12(2), 234-248.
- [73] Wu, C. J., Liu, C. P., & Ouyang, Z. (2012). Compact and low-power optical logic NOT gate based on photonic crystal waveguides without optical amplifiers and nonlinear materials. *Applied Optics*, 51(5), 680-685.
- [74] Kordi, S. E., Yousefi, R., Ghoreishi, S. S., & Adrang, H. (2020). All-optical OR, NOT and XOR gates based on linear photonic crystal with high port-to-port isolation. *Applied Physics B*, 126(10), 1-9.
- [75] Mohebbi, Z., Nozhat, N., & Emami, F. (2015). High contrast all-optical logic gates based on 2D nonlinear photonic crystal. *Optics Communications*, 355, 130-136.
- [76] Mohebzadeh-Bahabady, A., & Olyaei, S. (2018). All-optical NOT and XOR logic gates using photonic crystal nano-resonator and based on an interference effect. *IET Optoelectronics*, 12(4), 191-195.
- [77] Fu, Y., Hu, X., & Gong, Q. (2013). Silicon photonic crystal all-optical logic gates. *Physics letters A*, 377(3-4), 329-333.

- [78] Mamnoon-Sofiani, H. &Javahernia, S. (2021). All optical NAND/NOR and majority gates using nonlinear photonic crystal ring resonator. Journal of Optical Communications, (). <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0246>
- [79] Yan, Q. B., Wu, R., Liu, Z., & Zhang, L. Y. (2020). All-optical non-gate and NOR gate design of two-dimensional photonic crystal ring resonator. Optoelectronics Letters, 16(2), 154-160.
- [80] Kumar, A., &Medhekar, S. (2020). All optical NOR and NAND gates using four circular cavities created in 2D nonlinear photonic crystal. Optics & Laser Technology, 123, 105910.
- [81] Saranya, D., &Anbazhagan, R. (2020). Design and analysis of optical logic gates based on trifurcation structured 2D photonic crystals. Optical and Quantum Electronics, 52(8), 1-21.
- [82] Rao, D. G. S., Swarnakar, S., & Kumar, S. (2020). Performance analysis of all-optical NAND, NOR, and XNOR logic gates using photonic crystal waveguide for optical computing applications. Optical Engineering, 59(5), 057101.
- [83] Xiao-Wen, S., Xiu-Lun, Y., Xiang-Feng, M., Ji-Nan, Z., Yu-Rong, W., Yong-Kai, Y., & Guo-Yan, D. (2018). Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect. Quantum Electronics, 48(2), 178.
- [84] Moniem, T. A. (2017). All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators. Quantum Electronics, 47(2), 169.
- [85] Parandin, F., Malmir, M. R., Naseri, M., & Zahedi, A. (2018). Reconfigurable all-optical NOT, XOR, and NOR logic gates based on two dimensional photonic crystals. Superlattices and Microstructures, 113, 737-744.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale et perspectives

Un effort particulier a été fourni pour le développement d'un calculateur « tout-optique », un système optique serait plus digne de confiance qu'un système électronique. Notons également que l'optique permet un stockage très dense de l'information : En effet, une unité de logique optique doit occuper une surface de l'ordre de la longueur d'onde au carré, ce qui dans le domaine visible ou du proche infrarouge, permet d'envisager des densités de l'ordre de 100 Mo par cm^2 .

Le cristal photonique est un matériau optique conçu artificiellement dans lequel la constante diélectrique change périodiquement. Certaines longueurs d'onde ne peuvent pas se propager à travers la structure et forment la bande interdite photonique. Le flux de lumière peut être contrôlé en manipulant la BIP.

En raison de leurs propriétés particulières, les portes logiques à base des cristaux photoniques présentent de nombreux avantages par rapport aux portes logiques classiques, tels qu'une vitesse très élevée et un confinement optimal, une taille ultra-compacte et une simplicité de la conception. La taille de la porte logique optique basée sur le cristal photonique est de l'ordre de la longueur d'onde. Ces structures logiques sont les composants clés pour les réseaux optiques et les systèmes de communication optique. En raison de leurs nombreux avantages, elles sont prometteuses à l'utilisation des futurs processeurs de signaux optiques et ordinateurs optiques. Par conséquent, cette thèse se concentre sur la conception de portes logiques à cristaux photoniques. La simulation des conceptions proposées est effectuée par des calculs FDTD et PWM, réalisés à l'aide des logiciels « FULLWAVE » et « BandSOLVE » de RSoft disponible au niveau de notre laboratoire TTNS.

Dans cette thèse, une analyse complète et appropriée des portes logiques optique à base des cristaux photoniques linéaires et non-linéaires est présentée. En outre, plusieurs structures de portes logiques ont été conçues et simulées.

Dans un premier temps, nous avons proposé une nouvelle classe de portes logiques tout-optique NOT, XOR et XNOR basées sur un cristal photonique bidimensionnel linéaire. Cette structure 3 en 1 (1 structure avec 3 fonctions : NOT, XOR et XNOR) est caractérisée par une taille de $85,8 \mu\text{m}^2$, des rapports de contraste de 25,08, 25,03 et 14,47 dB, respectivement. Le temps de réponse pour les trois portes logiques est de 8,33 ps, et le débit binaire est calculé à environ 0,12 Tbit/s.

Par la suite, nous avons introduit une plateforme hybride d'Arséniure de Gallium et de Titanate de Baryum (GaAs- BTO) pour un accord électro-optique ultra-efficace basé sur des cristaux photoniques bidimensionnels. Ces portes logiques optiques basées sur l'effet Pockels sont des éléments clés des réseaux de communication optique et de l'informatique quantique, car elles sont très efficaces et ultrarapides. La seule structure multifonctionnelle proposée est utilisée pour réaliser diverses portes logiques photoniques à très haute performance telles que BUFFER, NOT, AND, NAND, NOR, OR, XOR, XNOR. Les paramètres fonctionnels de ces portes logiques miniatures sont analysés et optimisés numériquement par la méthode FDTD. Les résultats de simulation montrent que le rapport de contraste est très élevé, avec une surface très faible de $157 \mu\text{m}^2$, le temps de réponse est ultrarapide 1 ps ce qui correspond à un débit binaire de 1 Tbps.

La deuxième optimisation consiste, à concevoir toutes les autres portes telles que XOR, NOR, et XNOR à partir de la porte logique NOT. Ces portes logiques sont basées sur des cristaux photoniques bidimensionnels, une cavité résonante non-linéaire (Effet Kerr), l'effet d'interférence destructive, et un choix approprié des paramètres optogéométriques de telle sorte que les portes logiques sont fonctionnelles à la longueur d'onde de 1550 nm avec une consommation d'énergie réduite. Les rapports de contraste pour les portes NOT, XOR, NOR et XNOR sont, respectivement, 26,82 dB, 26,77 dB, 8,34 dB et 20,17 dB. Le temps de réponse des différentes portes logiques est d'environ 8,5 ps, ce qui donne un débit binaire de 0,117 Tb/s.

En exploitant la non-linéarité à effet Kerr, nous avons conçu deux portes logiques tout-optique NOT et OR dans un réseau carré bidimensionnel de tiges de $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ dans un cristal photonique. Le principe de fonctionnement de ces portes est basé sur le concept du commutateur tout-optiques. L'idée consiste en la conception d'un nouveau résonateur en anneau non linéaire simple, basé sur la combinaison « Si-Nc / $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.40}\text{P}_{0.60}$ » et ce pour créer le décalage de fréquence pour différentes valeurs de puissance d'entrée. Les portes logiques conçues sont caractérisées par une faible consommation d'énergie, une réponse ultra-rapide, une taille compacte égale à $168 \mu\text{m}^2$ et une intégration facile.

Perspectives

Les résultats, encourageants, obtenus dans cette thèse nous poussent à approfondir nos travaux de recherche dans le domaine de l'optique intégrée. Lorsque des dispositifs tout-optiques doivent être utilisés dans la prochaine génération de circuits intégrés optiques, il est important de réduire leurs dimensions. Les problèmes de fabrication qui empêchent l'intégration de structures compactes ont conduit à l'utilisation de structures plasmoniques. L'étude de ce type de composant utilise l'effet plasmonique dans la structure à base des cristaux photoniques afin de piéger davantage la lumière et d'augmenter le guidage dans les ondes de la structure cristalline photonique.

Résumé :

En raison de notre dépendance croissante à l'égard de la technologie informatique, des ordinateurs performants sont nécessaires. Par conséquent, l'optique est la meilleure solution par rapport à l'électronique, car elle peut traiter des données en parallèle jusqu'à 10 000 fois plus rapidement que les ordinateurs électroniques au moindre coût. Les portes logiques optiques sont des éléments de base dans la conception d'ordinateurs optiques qui répondent aux besoins des utilisateurs, ainsi qu'à l'utilisation accrue d'internet représentée par les ultra-hauts débits et les larges bandes passantes. Notre travail, dans cette thèse, comprend une étude, une contribution, une optimisation, et une modélisation par simulation de différents types de portes logiques optiques à base de cristaux photoniques en exploitant la linéarité et la non-linéarité optique. Différentes techniques et paramètres de performances ont été utilisés pour construire et examiner ces portes logiques optiques, tels que le rapport de contraste, la taille du dispositif, le débit binaire, le temps de réponse, et l'énergie consommée. La conception des portes logiques présentée dans cette thèse a été réalisée par le logiciel « RSoft CAD » disponible au niveau du laboratoire TTNS, les résultats obtenus sont comparés et très performants à d'autres travaux récents.

Mots clé : Optique linéaire, Optique non-linéaire, Cristaux photoniques, Portes logiques optiques, Effet Pockels, Effet Kerr, FullWAVE, BandSOLVE.

Abstract:

Because of our increasing dependence on computer technology, powerful computers are needed. Therefore, optics is the better solution compared to electronics, as it can process data in parallel up to 10,000 times faster than electronic computers at the lowest cost. Optical logic gates are basic elements in the design of optical computers that meet the needs of users, as well as the increased use of the internet represented by ultra-high speed and high bandwidth. Our work in this thesis includes a study, contribution, optimization, and simulation modeling of different types of photonic crystal-based optical logic gates exploiting optical linearity and non-linearity. Different techniques and performance parameters were used to construct and examine these optical logic gates, such as contrast ratio, device size, bit rate, response time, and power consumption. The design of the logic gates presented in this thesis was carried out using the "RSoft CAD" software available at the TTNS laboratory, and the results obtained are compared and found to be very good in comparison with other recent works.

Key words: Linear optics, Non-linear optics, Photonic crystals, Optical logic gates, Pockels effect, Kerr effect, FullWAVE, BandSOLVE.

ملخص:

نظرا لإعتمادنا المتزايد على تكنولوجيا الحاسوب ، هناك حاجة إلى أجهزة الحواسيب عالية الأداء. لذلك ، فإن الحواسيب البصرية هي الحل الأفضل مقارنة بالحواسيب الإلكترونية ، حيث يمكنها معالجة البيانات بسرعة تصل إلى 10000 مرة أسرع من أجهزة الحواسيب الإلكترونية و بأقل تكلفة. تعد الدوائر المنطقية البصرية عناصر أساسية في تصميم أجهزة الحواسيب الضوئية التي تلبي احتياجات المستخدمين ، بالإضافة إلى الاستخدام المتزايد للإنترنت المتمثل في سرعات التدفق و النطاق الترددي العالي. يتضمن عملنا ، في هذه الأطروحة ، دراسة ومساهمة وتحسين ومحاكاة لأنواع مختلفة من الدوائر المنطقية البصرية القائمة على البلورات الفوتونية من خلال إستغلال الظواهر البصرية الخطية منها وغير الخطية. تم استخدام مختلف التقنيات وضوابط الأداء لبناء وفحص هذه الدوائر المنطقية البصرية ، مثل نسبة التباين وحجم الجهاز ومعدل التدفق ووقت الإستجابة والطاقة المستهلكة. تم تصميم الدوائر المنطقية المقدمة في هذه الأطروحة بواسطة برنامج «RSoftCAD» والمتواجد في مختبر البحث TTNS ، وأثبتت النتائج المتحصل عليها أنها متطورة وذات فعالية وجودة عالية مقارنة مع نتائج أخرى حديثة النشر في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: البصريات الخطية ، البصريات غير الخطية ، البلورات الفوتونية ، البوابات المنطقية البصرية ، تأثير ظاهرة Pockels ، تأثير ظاهرة Kerr ، FullWAVE ، BandSOLVE.