



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Systèmes de télécommunications

Thème

Etude et simulation d'un micro-résonateur optique en anneau

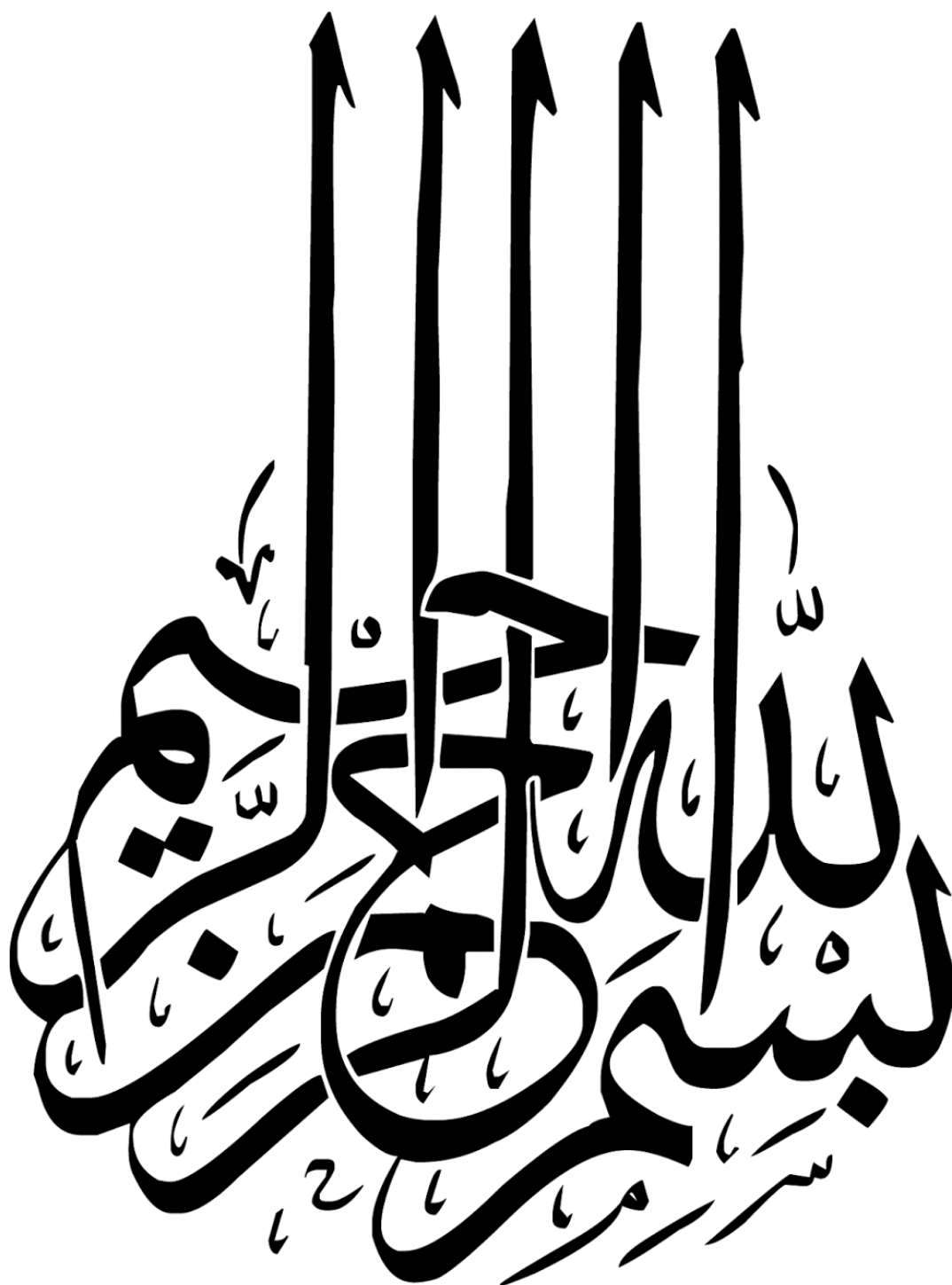
Présenté par :

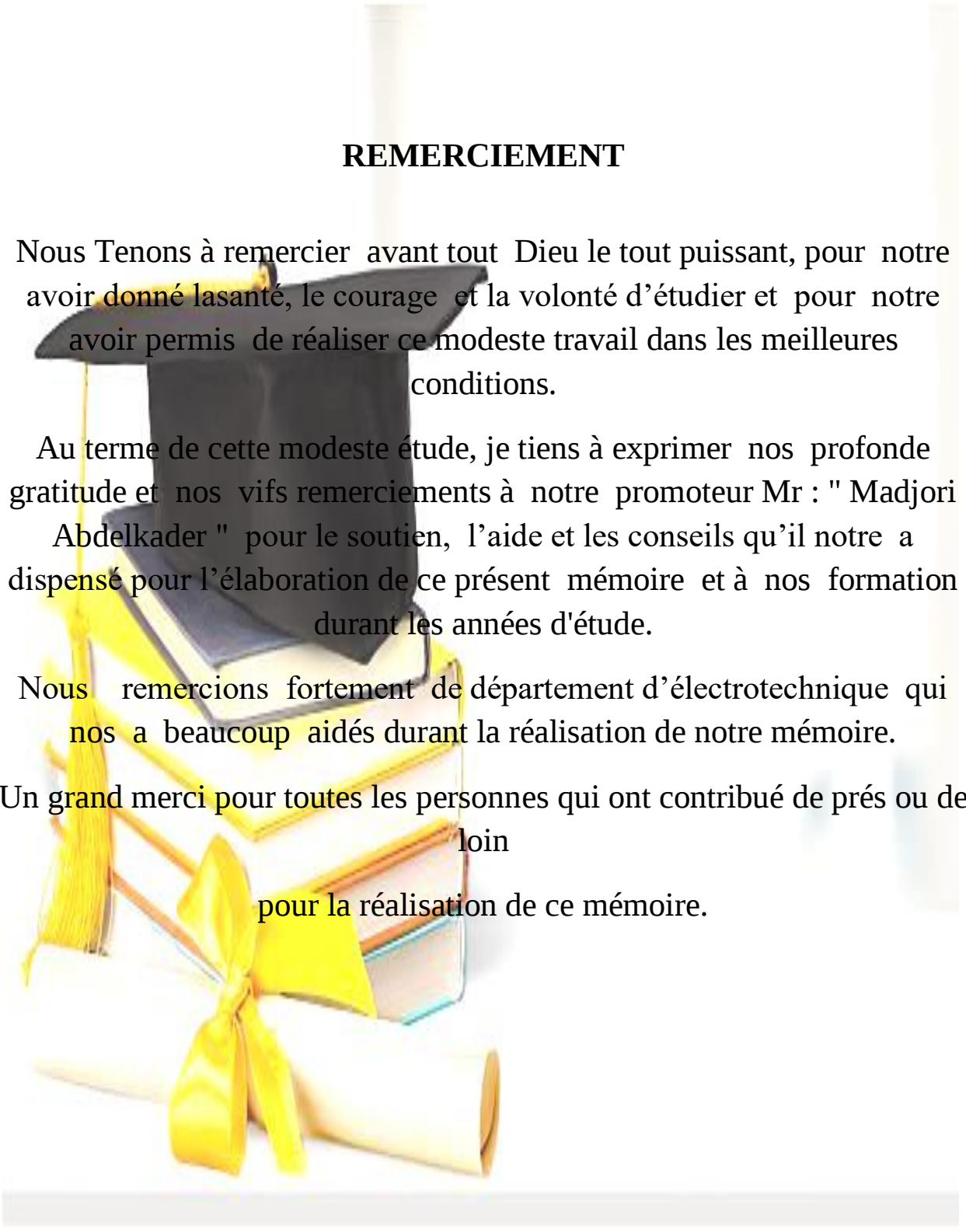
LILA Mohammed Tahar ; **SOUFI** Abdelmoumin et **CHEKIMA** Salah Eddin

Devant les jurys :

MEDJOURI Abdelkader	MCA	Encadreur
GHENDIR Said	MCA	Président
HIMA Abdelkader	MAA	Examineur

Année Universitaire: 2019/2020





REMERCIEMENT

Nous Tenons à remercier avant tout Dieu le tout puissant, pour notre avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour notre avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer nos profonde gratitude et nos vifs remerciements à notre promoteur Mr : " Madjori Abdelkader " pour le soutien, l'aide et les conseils qu'il nous a dispensés pour l'élaboration de ce présent mémoire et à nos formateurs durant les années d'étude.

Nous remercions fortement le département d'électrotechnique qui nous a beaucoup aidés durant la réalisation de notre mémoire.

Un grand merci pour toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIARES

REMERCIEMENT	II
TABLE DES MATIARES.....	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des acronymes	VII
Résumé	VIII
Introduction générale	IX

CHAPITRE I THEORIE DES GUIDES D'ONDE OPTIQUES

I. Généralités	1
I.1. Introduction.....	1
I.2. Historique	1
I.3. Définition	1
I.4. Principe du guide d'onde.....	4
I.5. Types de guide d'onde	5
I.6. Propagation de l'onde électromagnétique dans un guide d'onde	7
I.7. Utilisations du guide d'onde	8
I.8. Les avantages du guide d'onde.....	9
I.9. Les inconvénients du guide d'onde.....	9
I.10. Conclusion	10

CHAPITRE II LES MICRO-RESONATEURS

II.1. Introduction.....	12
II.2. Définition.....	12
II.3. Principe de fonctionnement d'un micro-résonateur	13
II.3.1. Fonction de transfert : caractéristiques spectrales.....	13

TABLE DES MATIARES

II.4. Les avantage des micro-résonateurs	18
II.5. Conclusion	18
CHAPITRE III RESULTATS DE SIMULATIONS	
III.1 Introduction :	20
III.2 La fenêtre principale :	20
III.3 La structure d'un micro-résonateur en anneau :	21
III.4 La théorie :	22
III.5 Résultats numérique:	23
III.6 CONCLUSION :	26
Conclusion générale	X
Référnce.....	XI

LISTE DE TABLEAUX

Liste des figures

N °	Figure	Page
I.1	Construire un guide d'onde en ajoutant des sections quart d'onde reliées par deux fils	3
I.2	Dimensions d'un guide d'ondes rectangulaire, ici une très courte section avec un raccord à piège pour des fréquences de 18,0 à 26,5 GHz	3
I.3	Quelques exemples de guide d'ondes	4
I.4	Guide d'onde rectangulaire	4
I.5	Représentation graphique d'un guide d'onde planaire	5
I.6	Représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire	5
I.7	Représentation graphique d'une fibre optique	6
I.8	Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé	7
II.1	Représentation d'un micro-résonateur	13
II.2	Représentation du fonctionnement d'un micro-résonateur : (a) Schéma d'un micro-résonateur en forme d'hippodrome, (b) Fonction de transfert ou Transmission du micro-résonateur	14
II.3	Transmission spectrale d'un micro-résonateur	18
II.4	Coupe Transversale D'un Résonateur (A) SAW, (B) BAW Et (C) D'un Micro Résonateur. (D) Schéma Electrique Equivalent Des Résonateurs SAW Et BAW, (E) Et D'un Micro Résonateur	18
III.1	Fenêtre principale de Mode Solutions	21
III.2	micro-résonateur en anneau	21
III.3	Distribution de champ optique et variation de l'indice effectif de mode en fonction de la longueur d'onde.	24
III.4	L'image représente l'évolution du canal de réfraction en fonction de la longueur d'onde	24
III.5	Intensité de champ électrique pour le mode TE	24
III.6	Un résonateur en anneau à quatre ports.	25
III.7	La réponse fréquentielle en puissance calculé par différentes méthodes	26

LISTE DE TABLEAUX

Liste des tableaux

N °	Tableaux	Page
1	Les Différentes Caractéristiques De Micro Résonateur	22

LISTE DES ACRONYMS

Liste des acronymes

LISTE DES ACRONYMES	
SIW	Substrata Integrates Waveguide
OEM	Ondes Électromagnétiques
TE	Transverse Électrique
TEM	Électromagnétique Transversale
TM	Transverse Magnétique
ISL	Intervalle Spectral Libre
FSR	Free Spectral Range
WDM	Wavelength Division Multiplexing
FWHM	Full Width At Half Maximum
SOI	Silicon On Insulator (Le Silicium Sur Isolant)
FDTD	Finite Difference Time Domain

Résumé

Les micro-résonateurs sous forme de disques, anneaux ou hippodromes, sont devenus les éléments constitutifs clés de nombreux composants photoniques de haute performance. Ces composantes sont d'importance capitale dans les réseaux de transmission optique. L'objectif de ce projet de fin d'étude est l'étude théorique et numérique d'un micro résonateur optique passif intégrée destinée aux fonctions de traitement optique de signal

Mots clés : Optique intégrée, filtrage optique, réseaux de télécommunications optiques.

Abstract

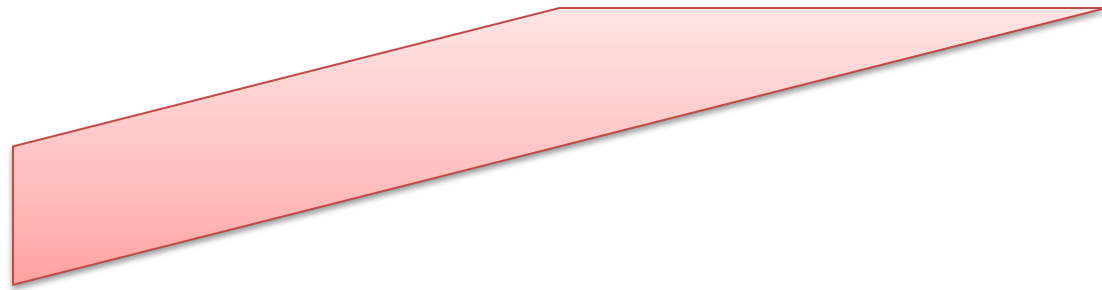
Micro-resonators in the form of discs, rings or racetracks are having become the key building blocks of many photonic components of high performance. These components are of paramount importance in optical transmission networks. The objective of this end of study project is the theoretical and digital study of an integrated passive optical micro resonator intended for optical signal processing functions.

Key words: Integrated optics, optical filtering, and optical telecommunications networks.

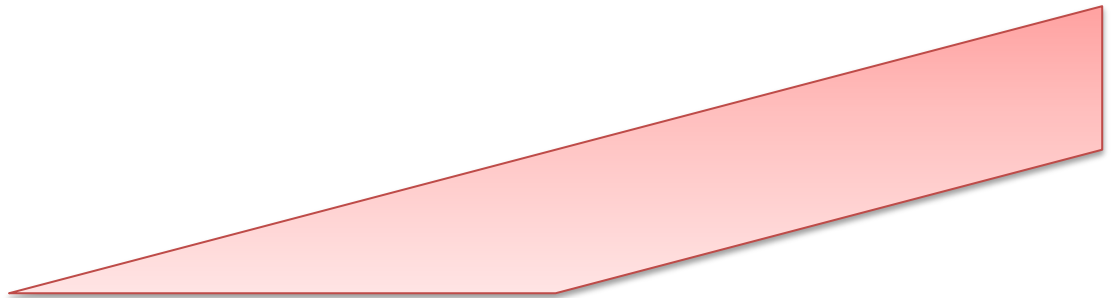
الملخص

أصبحت الرنانات الدقيقة على شكل أقراص أو حلقات أو حلبات السباق اللبانات الأساسية للعديد من المكونات الضوئية عالية الأداء. هذه المكونات لها أهمية قصوى في شبكات النقل البصرية. الهدف من مشروع نهاية الدراسة هذا هو الدراسة النظرية والرقمية لمرنان دقيق بصري سلبي متكامل مخصص لوظائف معالجة الإشارات الضوئية

الكلمات المفتاحية: بصريات متكاملة، تصفية بصرية، شبكات اتصالات بصرية.



INTRODUCTION GENERALE



Introduction general

Introduction général

La technologie des télécommunications est un domaine vaste et précieux, on trouve dans l'histoire beaucoup des savants qui l'ont traité et ils l'ont ajouté des inventions, des idées, alors qu'elle devienne très importante et indispensable dans tous les établissements, les écoles les instituts etc.

Dans ce travail, nous étudions une puce optique appelée micro résonateur. Il est considéré comme un guide d'onde résonateur.

Dans la première partie, on va exposer l'ensemble des théories des guides d'ondes ainsi que les équations permettant la description des phénomènes de propagations des ondes électromagnétiques au sein d'un milieu diélectrique

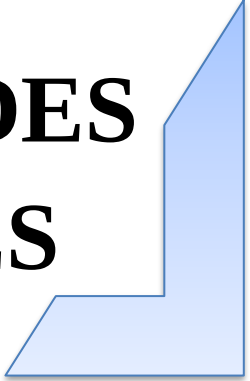
Quant à la deuxième partie, nous avons traité plus précisément du micro résonateur, où nous avons découvert ses composants de base et la méthode de leur composition, en plus le principe de son travail et de ses fonctions. Et pour cette raison, dans la première partie, nous avons étudié les guides d'ondes et nous avons connu, les caractéristiques de ses différents types, son fonctionnement, en plus des avantages et des inconvénients. Et avec cela, nous avons une idée d'un micro.

Dans la troisième partie, nous nous sommes familiarisés avec un programme appelé « Lumerical mode solution » qui nous permet de concevoir la pièce, de l'étudier. Il s'agit d'une simulation de la réalité pour obtenir de meilleurs résultats. Enfin, nous avons présenté les résultats obtenus grâce au programme .

CHAPITRE I



THEORIE DES GUIDES D'ONDE OPTIQUES



I. Généralités

I.1. Introduction

La technologie des guides d'ondes intégrées au substrat permet d'exploiter les propriétés de la propagation guidée pour transformer un substrat en un guide d'onde. De ce fait, Il est important de comprendre le fondement théorique derrière ce phénomène physique. Ce dernier consiste à canaliser un signal électromagnétique dans un volume délimité par des interfaces réfléchissantes. L'énergie électromagnétique du signal est alors transmise avec un faible taux d'atténuation. Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser seulement sur les théories générales qui concernent les guides d'ondes.

I.2. Historique

Le fondateur de l'électromagnétisme moderne et les bases théoriques de microondes c'est Jaunes Clark Maxwell qui formula les équations qui porte son nom « Équations de Maxwell » dans son traité sur l'électricité et magnétisme, c'était en 1873.

Une quinzaine d'années plus tard, le savon Heinrich Hertz produira et détectera les ondes électromagnétisme expérimentalement à une fréquence d'ordre 1 GHz, ces ondes portent son nom « Ondes Hertziennes ».

En 1897 Lord Rayleigh démontra la possibilité de faire propager des ondes dans des tuyaux métalliques creux à section rectangulaire ou circulaire que l'on appel guides ondes [1].

I.3. Définition

I.3.1. guides d'onde

Le guide d'ondes est une forme particulière de la ligne de transmission utilisée pour les applications micro-ondes. Il s'agit de tubes métalliques fait de matériaux de haute qualité (cuivre et laiton - partiellement argenté ou même plaqué or). Dans la technologie récente, ces guides sont composés de cuivre plaqué électriquement d'une mince couche de fibres de carbone.

Le guide onde est invariant par translation dans une direction qui sera la direction de propagation de l'OEM [2]

Il existe un très grand nombre de guides d'ondes, les uns métalliques, les autres diélectriques. Ce sont, dans tous les cas, des structures qui restent invariantes quand on effectue une translation selon un axe qui constitue la direction de propagation de la puissance active [3]

Le milieu 1 où se propagent les ondes est toujours un milieu diélectrique. Dans les guides d'ondes métalliques, ce milieu est limité par une interface diélectrique-conducteur (milieu 2, métallique) tandis que, dans les guides d'ondes diélectriques, ce milieu est limité par une interface diélectrique-diélectrique (milieu 2, diélectrique) [4]

Les guides diélectriques sont très peu utilisés dans les circuits passifs micro-ondes. En effet [5] :

- ✚ le guide diélectrique à section circulaire est surtout utilisé pour les télécommunications aux fréquences optiques.
- ✚ les guides diélectriques à structure planaire sont utilisés pour les circuits intégrés en ondes millimétriques où ils se prêtent bien à l'intégration des composants actifs et passifs. Ils servent aussi à réaliser des circuits passifs.

Une ligne de transmission à deux fils ordinaire devrait être soutenue à intervalles réguliers par des isolateurs. À la jonction avec la ligne, les isolateurs doivent avoir une très haute impédance à la terre pour un fonctionnement correct. Un meilleur isolant à haute fréquence est une terminaison de résonance, à savoir une section quarte d'onde appariée à la ligne de transmission et en court-circuit à une extrémité. Si l'adaptation est bonne, ce genre d'isolateurs va transformer le court-circuit de très haute impédance de la ligne de transmission à deux fils [6].

La figure 1 prouve que nombreuses moignons de résonance de chaque côté d'une ligne de transmission à deux fils. Lorsque des moignons sont ajoutés, chaque section est en contact avec l'autre, et un guide d'onde rectangulaire est formé. L'ancienne ligne de transmission à deux fils se trouve intégrée dans les parois de celui-ci. Ce guide a maintenant une largeur de $\lambda/2$.

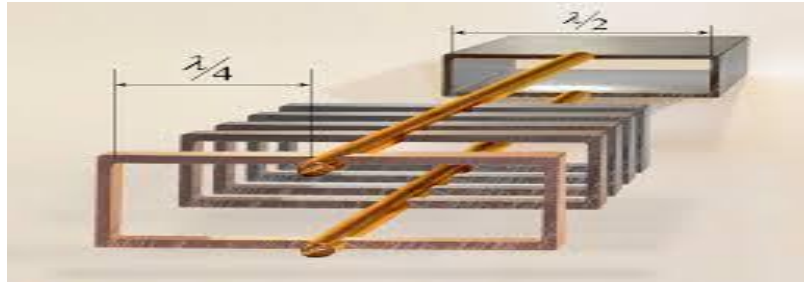


Figure I.1 : Construire un guide d'onde en ajoutant des sections quart d'onde reliées par deux fils. [6].

On notera que les moignons de résonance sont des isolants à une seule fréquence. Cela limite grandement la largeur de bande et l'efficacité. Les signaux peuvent se propager dans le guide d'ondes seulement au-dessus d'une certaine fréquence. Celle-ci est fonction des dimensions du guide d'ondes, en particulier du mur «a». La propagation se produit seulement si la longueur d'onde à transférer est inférieure à la longueur d'onde dite de coupure (λ_{coupe}).

La longueur d'onde de coupure d'un guide d'ondes rectangulaire est obtenue à partir de la formule :

$$\lambda_{\text{coupe}} = 2 \cdot a \quad (\text{I-1})$$

λ_{coupe} = longueur d'onde de coupure [m]

a = côté le plus grande du guide [m] (figure 2)

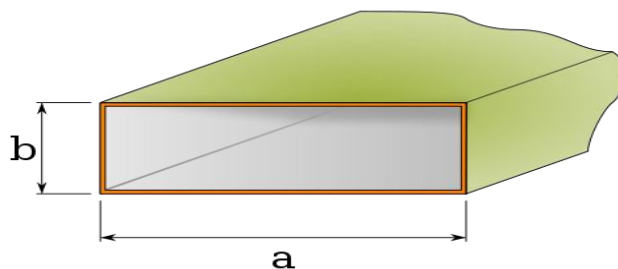


Figure I.2 : Dimensions d'un guide d'ondes rectangulaire, ici une très courte section avec un raccord à piège pour des fréquences de 18,0 à 26,5 GHz. [6]

Les ondes de cette longueur ne peuvent pas passer efficacement dans le guide d'ondes. Ce dernier doit être d'environ 30% plus grand que cette demi-longueur d'onde afin de fonctionner

efficacement ce qui rend l'utilisation de guides d'ondes à des fréquences inférieures à 1000 mégahertz graduellement moins pratique.



Figure I.3 : Quelques exemples de guide d'ondes. [6]

I.4. Principe du guide d'onde

Afin d'éviter les formules complexes et éviter de faire face aux équations théoriques trop compliquées, on se concentre sur l'étude des caractéristiques de la propagation d'une onde électromagnétique dans un guide d'onde de section rectangulaire réalisé par quatre plans parfaitement conducteurs. Cette géométrie illustrée par la figure II.1, fait que les ondes y sont relativement simples à décrire. De plus, c'est ce guide d'onde qui nous intéresse.

Cependant, ce qui est vrai pour un guide de section rectangulaire reste valable aussi pour les autres types de guide, par exemple de section circulaire. En outre, on a les mêmes caractéristiques sauf pour les équations qui deviennent plus complexes. Dans cette partie, on se focalise a une solution dite solution fondamentale transverse électrique TE polarisée rectiligne. Puis, dans un paragraphe suivant, on remonte à la solution générale [7].

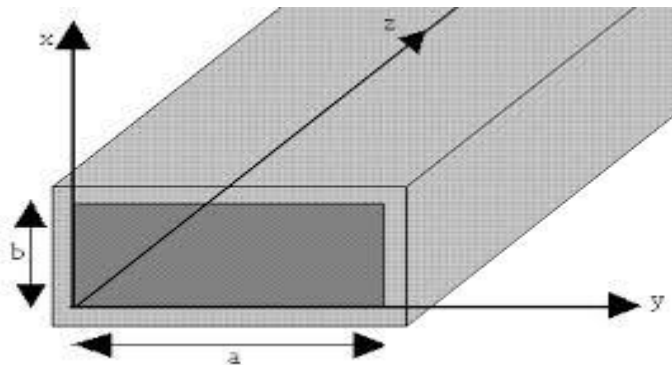


Figure I.4 : Guide d'onde rectangulaire [7]

I.5. Types de guide d'onde

I.5.1. Guide d'onde planaire

Le guide d'onde plan est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents figure (I.5). La lumière se propage préférentiellement dans la couche d'indice de réfraction n_b si celle-ci est entourée de deux couches : une couche inférieure de substrat d'indice de réfraction n_s et une couche supérieure de couverture d'indice de réfraction n_c . La lumière est confinée selon l'axe vertical (x) et se propage dans la direction (z). De fait de l'invariance de cette structure dans la direction (y), la lumière ne peut être confinée dans cette direction. [8]

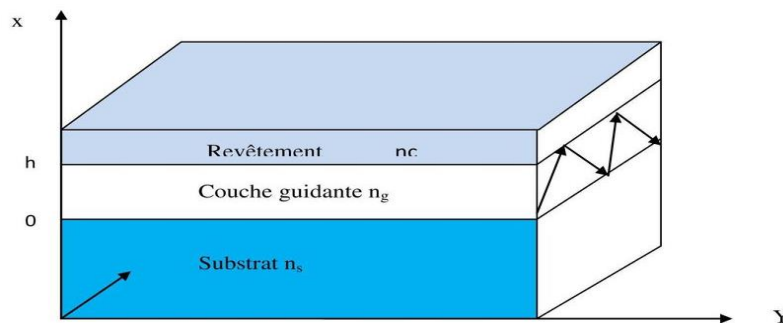


Figure I.5 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire [8]

I.5.2. Guide d'onde rectangulaire

Le guide d'onde rectangulaire est constitué de quatre parois conductrices (généralement parfaits) comme illustré sur la figure (06). Donc, ce type de guide d'onde possède une section conductrice fermée, donnant la forme d'un conducteur simple et creux.

Le guide d'onde rectangulaire est définie transversalement (selon x) par la largeur a et verticalement (selon y) par l'épaisseur b . Un diélectrique-souvent de l'air-remplit l'intérieur du conducteur creux. La lumière se déplace dans le diélectrique, mais il est confiné dans l'espace par les quatre parois conductrices. L'axe (z) définit toujours la direction de la propagation [9].

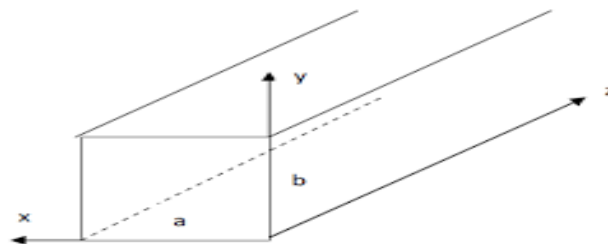


Figure I.6 : Représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire [9]

I.5.3. Fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire telle que schématisée sur la figure (7). Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre de silice ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. Elle présente des meilleures qualités de transmissions et elle permet de faire passer un très grand nombre d'information (large bande passante). On peut avoir plusieurs canaux de transmission simultanément sur une fibre [9].

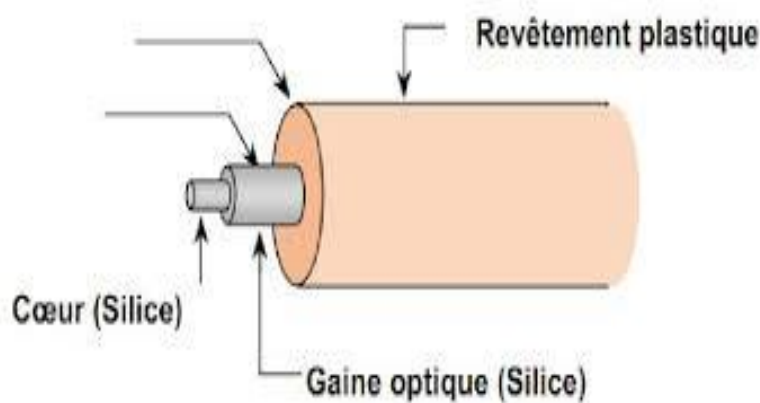


Figure I.7 : Représentation graphique d'une fibre optique [9]

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière et sert dans la transmission de données et de lumière. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la Visio conférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporates).

I.5.4. Guide d'onde diffuse

Nous représentons sur la figure (8) le schéma de principe d'un guide d'onde de type diffusé. Ce type de guide définit par une région de substrat semi-infinie y_0 d'indice de réfraction n_0 [10]

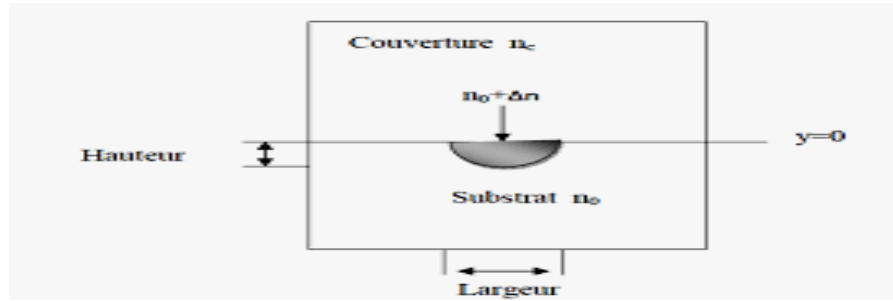


Figure I.8 : Représentation graphique d'un guide d'onde diffusé

I.6. Propagation de l'onde électromagnétique dans un guide d'onde

Lorsque l'énergie est introduite dans un guide d'ondes, un champ électrique (*champ E*) est induit dans le centre de la paroi large «a». Ce champ électrique est plus fort au centre du guide d'ondes et diminue dans la direction de la paroi étroite «b». Il a une forme sinusoïdale vu en coupe. Un champ magnétique est également induit et, comme ce champ ne peut être maintenu verticalement sur un conducteur métallique, il prend la direction orthogonale.

Le champ électrique varie dans le temps selon la fréquence du signal et donne dans la direction longitudinale du guide d'ondes des maxima et des minima aux endroits correspondant à la moitié de la longueur d'onde. L'énergie à haute fréquence qui est introduite dans un guide d'onde, génère une onde électromagnétique transversale (mode TEM) dont les champs électrique et magnétique sont perpendiculaires les uns aux autres. Ces champs ne restent pas dans leur état respectif et se propagent ainsi dans les guides

D'onde. Avec le temps, ils changent l'intensité et de polarité au rythme du signal d'entrée. Cette onde électromagnétique se propage dans le guide d'ondes à une vitesse proche de celle de la lumière (environ 300 millions de mètres par secondes). Leur interaction permet ainsi de transmettre l'énergie du signal d'entrée vers sa destination [11].

Les champs électriques et magnétiques changent d'intensité et de puissance façon permanente, mais ils sont toujours perpendiculaires les uns aux autres en chaque point du guide. Si le champ électrique est dans la direction de propagation, il est appelé en mode E ou onde de TM (transverse magnétique). Si le champ magnétique est dans la direction de propagation, il est appelé en mode H ou ondes TE (transverse électrique) [12]

I.6.1. Longueurs d'onde dans un guide d'ondes

En pratique, les valeurs maximales et minimales du champ E dans un guide d'onde sont le résultat des multiples interférences des ondes réfléchies par tous les murs. Les « paquets » se déplaçant vers la droite peuvent ainsi avoir une distance inter-maxima différente que celle en espace libre avec la même longueur d'onde λ_0 .

On calcule la différence inter-maxima avec

$$\lambda_h = \frac{\lambda_0}{\sin \varphi} \quad (\text{I-2})$$

Où la longueur d'onde de l'oscillation dans un guide d'onde (λ_h) est différente de celle en espace libre λ_0 . Comme l'angle d'incidence est difficile à mesurer, le rapport entre la longueur d'onde optimale et l'angle d'incidence de la formule 1 de l'extraire en espace libre. Par la suite, la longueur d'onde dans le guide d'onde peut être calculée en utilisant les formules 1 et 2 donne la formule suivante :

$$a = 0.5 \frac{\lambda_0}{\cos \theta} \quad (\text{I-3})$$

Le résultat est une vitesse de phase qui se propage comme une oscillation uniforme avec un facteur de $\sin \varphi$ plus élevé que la vitesse de la lumière. Conséquemment, la longueur d'onde λ_h dans le guide d'onde est souvent plus grande de manière significative que dans l'espace libre. Le transport d'énergie, et donc le changement local d'Epar une modulation de l'onde, se fait cependant à une vitesse plus petite que la vitesse de la lumière [13]

I.7. Utilisations du guide d'onde

Les guides d'onde de section rectangulaire ou circulaire sont utilisés dès l'instant que le transport des ondes fait apparaître des affaiblissements exagérés. Ils sont employés conjointement avec d'autres pièces. En effet, une ligne de transmission est toujours associée à des équipements localisés qui permettent de faire subir au signal électrique transmis les modifications envisagées par la technique servie (modulation, amplification, détection, changement de fréquences, affaiblissement, filtrage, etc.). La mise en œuvre des guides s'accompagne de celle d'organes actifs ou passifs (amplificateurs à ondes progressives, oscillateur à klystron, cavité résonnante, etc.). La ligne de transmission n'est plus un fil

métallique sur lequel on peut mesurer une intensité ou un potentiel, mais elle limite aux parois du guide un espace en tout point duquel les phénomènes électriques se manifestent par des champs magnétique et électrique. [14].

Les guides d'onde sont utilisés dans les techniques de transmission par faisceaux hertziens, dans les gammes hyperfréquences, dans les techniques de détection d'obstacles (radar, navigation aérienne et maritime), dans les techniques de diffusion à grandes puissances et sur ondes très courtes. Les informations transmises, à la fois par l'onde porteuse et par le guide, sont de nature variée : signaux téléphoniques simples ou multiplex, signaux de télévision, impulsions numériques, données [15].

I.8. Les avantages du guide d'onde

Parmi les avantages des guides ondes ; la grande surface des guides en cuivre réduit les pertes métalliques, Les lignes de transmission à deux fils en cuivre ont une surface relativement petite présentent des pertes importantes, Aussi la transmission d'un câble coaxial de grande puissance est moins efficace que celle dans leurs guides ondes.

Les pertes diélectriques sont également inférieurs dans les guides vides (de transmission) que dans les lignes de transmission parce que dans les lignes à deux fils et coaxiales, ces pertes sont provoquées par le chauffage du matériau isolant entre les conducteurs. Il se comporte comme le diélectrique d'un condensateur, cette application provoque une perte de puissance. Le diélectrique dans le guide onde vide est l'air présentant une perte de puissances plus faible que les matériaux isolants.

Les guides ondes sont soumis à des pannes diélectriques provoquées par les ondes stationnaires qui produisent les arcs entraînant la diminution de l'efficacité de transmission d'énergie lorsque les champs électromagnétiques sont complètement contenus dans le guide, les pertes de radiation sont faibles. [16].

I.9. Les inconvénients du guide d'onde

Guides ondes sont soumis à des pannes diélectriques provoquées par les ondes stationnaires, les dimensions physiques du guide d'onde constituent la première limitation aux basses fréquences micro-ondes. La largeur du guide (section transversales) doit être approximativement

la moitié de la longueur d'onde de l'onde transportée, Aussi la fréquence de travail augmente plus la longueur d'onde diminue, imposant également des dimensions plus réduites du guide. Donc à certain moment ; la réalisation des guides ondes confrontés à un problème technologie.

La surface métallique interne du guide est souvent recouvert avec de l'argent ou de l'or pour réduire les pertes dues à l'effet de peau, Ce besoin augmente le cout et diminue leur utilisation [17]

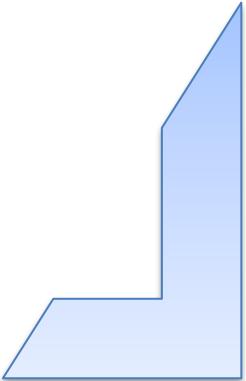
I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, les diverses structure des guides d'ondes a été exposée. Puis, l'influence de la géométrie sur les modes guidés tels que : la biréfringence et les conditions de coupure monomode/multi mode a été décrit en détaillant, nous avons présenté quelques fonctions et tâches réalisés par les guides d'ondes. Enfin ses avantages et inconvénients.

CHAPITRE II



LES MICRO- RESONATEURS



II.1. Introduction

Les micro-résonateurs permettent de réaliser des structures très sensibles, miniaturisées, s'intégrant dans des systèmes « lab.-on-chip », ce qui permet aussi de réduire le volume des molécules à détecter. La majorité des micro-résonateurs utilisent la propagation lumineuse dans la structure guidant et résonante, composée d'une cavité résonante en anneau couplée à un guide d'onde rectiligne servant d'entrée et de sortie à la lumière d'excitation et d'extraction des modes guidés. Cette propagation est modifiée lorsque le substrat est modifié par la présence de molécules. Les capteurs optiques utilisent l'onde évanescente pour la détection de molécules, soit greffées à la surface du micro-résonateur (détection surfacique), soit réparties de manière homogène dans le milieu de détection en contact avec le micro-résonateur (détection homogène).

II.2.Définition

Un micro-résonateur est un ensemble de guides d'ondes dans lequel au moins l'un est une boucle fermée couplée à une sorte d'entrée et de sortie de lumière. (Ceux-ci peuvent être, mais sans s'y limiter, des guides d'ondes.) Les concepts derrière les résonateurs optiques en anneau sont les mêmes que ceux derrière les galeries de chuchotement, sauf qu'ils utilisent la lumière et obéissent aux propriétés derrière l'interférence constructive et la réflexion interne totale. Lorsque la lumière de la longueur d'onde de résonance passe à travers la boucle à partir du guide d'ondes d'entrée, elle s'accumule en intensité sur plusieurs allers-retours en raison d'interférences constructives et est émise vers le guide d'ondes du bus de sortie qui sert de guide d'ondes de détecteur. Du fait que seules quelques longueurs d'onde sélectionnées seront en résonance dans la boucle, le résonateur en anneau optique fonctionne comme un filtre. De plus, comme indiqué précédemment, deux guides d'ondes en anneau ou plus peuvent être couplés les uns aux autres pour former un filtre optique d'ajout / suppression. [17]

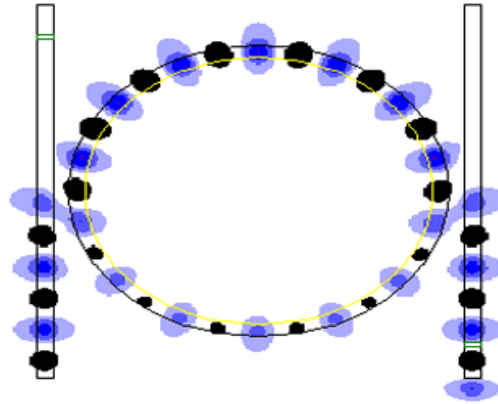


Figure II.1: Représentation d'un micro-résonateur

II.3. Principe de fonctionnement d'un micro-résonateur

Les micro-résonateurs étudiés dans la suite sont des micro-résonateurs dont la cavité résonante, en forme d'anneau ou d'hippodrome, est couplée à un seul guide d'onde rectiligne, dit d'accès. Dans cette étude, nous utilisons des guides d'onde monomodes, l'indice effectif du mode fondamental guidé $n_{\text{eff}} f_0$ est noté $n_{\text{eff}} f$ dans la suite. En sortie de ce guide d'onde d'accès, l'intensité lumineuse transmise, mesurée en fonction de la longueur d'onde, est la réponse du micro-résonateur, aussi appelée fonction de transfert. La fonction de transfert présente des raies de résonance dont la forme est décrite par différentes caractéristiques définies dans un premier temps. Le micro-résonateur, dans ces travaux, est à la base d'un capteur optique intégré. Le principe de détection, les méthodes d'analyse et les grandeurs d'un capteur sont, dans un deuxième temps définis. [18]

II.3.1. Fonction de transfert : caractéristiques spectrales

Un micro-résonateur en forme d'hippodrome est composé d'un guide d'accès couplé à une cavité résonante. Ces deux guides sont séparés d'une distance g appelée gap. La cavité résonante est en forme d'hippodrome défini par ses dimensions R , le rayon, et L_c , la longueur de couplage, représentées sur la figure 11. On parle d'anneau lorsque L_c est nulle. [19]

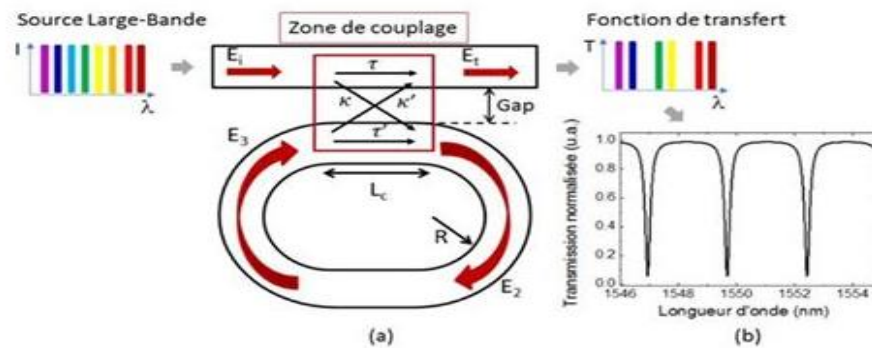


Figure II.2: Représentation du fonctionnement d'un micro-résonateur : (a) Schéma d'un micro-résonateur en forme d'hippodrome, (b) Fonction de transfert ou Transmission du micro-résonateur

Un champ optique incident E_i , provenant d'une source large-bande, est injecté à l'entrée du guide d'accès et se propage dans le guide jusqu'à rencontrer une zone, appelée zone de couplage. Le champ optique se sépare alors en deux parties. Une première partie E_t est directement transmise, avec un coefficient de transmission τ , vers la sortie du guide d'accès. L'autre partie E_2 est couplée dans la cavité avec un coefficient de couplage κ . Après s'être propagé pendant un tour dans la cavité, le champ subit des pertes optiques prises en compte dans un facteur d'atténuation noté a ainsi qu'un retard ϕ pendant le tour. Le champ après un tour dans la cavité est noté E_3 . Une partie de ce champ est couplée vers le guide rectiligne d'accès, avec un coefficient de couplage κ' et se propage vers la sortie du guide d'accès. L'autre partie est transmise dans la cavité avec un coefficient de transmission τ' modélisation d'un résonateur en anneau .[20]

Les longueurs d'onde en phase avec les longueurs d'onde incidentes après un tour dans la cavité, résonnent par interférences constructives dans la cavité. Les longueurs d'onde couplées de la cavité résonante vers le guide d'onde d'accès interfèrent destructivement avec les longueurs d'onde incidentes dans le guide d'onde d'accès. [21]

Le spectre observé en sortie du guide rectiligne d'accès présente des extinctions de la transmission pour chaque longueur d'onde résonante comme représenté sur la figure 05., le formalisme des matrices de transfert [22] permet de relier le champ E_t au champ E_i en fonction

des coefficients de couplage (κ pour guide rectiligne-cavité et κ_0 pour cavité-guide rectiligne), des coefficients de transmission (τ pour guide rectiligne-guide rectiligne et τ_0 pour cavité-cavité) et des pertes de couplage α . La matrice de transfert est de la forme :

$$\begin{pmatrix} E_t \\ E_2 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \tau & jk' \\ jk & \tau' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_i \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II-1})$$

Le développement de cette équation donne les relations suivantes :

$$E_t = \alpha(\tau E_i + jk' E_3) \quad (\text{II-2})$$

$$E_2 = \alpha(jk E_i + \tau' E_3) \quad (\text{II-3})$$

Le champ E_3 correspond au champ E_2 qui a parcouru un tour dans la cavité. Son expression est :

$$E_3 = \alpha E_2 \exp(j\phi) = \alpha E_2 \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} L\right) \quad (\text{II-4})$$

Avec a le facteur d'atténuation du champ défini comme :

$$a = \exp\left(-\frac{\alpha_{pertes} L}{2}\right) \quad (\text{II-5})$$

Où α_{pertes} est le facteur des pertes linéiques optiques et L la circonférence de la cavité définie par :

$$L = 2\pi R + 2L_c \quad (\text{II-6})$$

La transmission complexe $t(\lambda)$ du micro-résonateur, égale au rapport entre le champ de sortie E_t et le champ incident E_i , est obtenue en résolvant par substitution les équations (5) et (6). Elle est de la forme :

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{\alpha\tau - (kk' + \tau\tau')\alpha^2 a \exp\left(j\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)}{1 - \alpha a \tau' \exp\left(j\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)} \quad (\text{II-7})$$

Dans la suite, nous supposons que la zone de couplage du micro-résonateur est symétrique et sans pertes, c'est à dire que le couplage de la cavité vers le guide rectiligne et le couplage du guide rectiligne vers la cavité sont identiques ainsi que la transmission cavité-cavité et guide rectiligne-guide rectiligne : $\kappa_0 = \kappa$ et $\tau_0 = \tau$ et que les pertes de couplage sont négligées, $\alpha = 1$. Dans cette hypothèse, la loi de conservation de l'énergie donne pour un coupleur symétrique et sans pertes :

$$\mathbf{K}^2 + \tau^2 = 1 \quad (\text{II-8})$$

L'équation (9) devient :

$$t(\lambda) = \frac{\tau - a \exp\left(j\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)}{1 - a \tau \exp\left(j\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)} \quad (\text{II-9})$$

La transmission s'exprime aussi en intensité. Les intensités lumineuses du champ optique incident E_i et du champ transmis E_t sont définies par $I_i = |E_i|^2$ et $I_t = |E_t|^2$ respectivement. La transmission en intensité s'exprime alors par :

$$T(\lambda) = |t(\lambda)|^2 = \frac{I_t}{I_i} = \left|\frac{E_t}{E_i}\right|^2 = \frac{\tau^2 + a^2 - 2a\tau \cos\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)}{1 + a^2\tau^2 - 2a\tau \cos\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}L\right)} \quad (\text{II-10})$$

La transmission dépend donc des paramètres de couplage $\tau = \sqrt{1 - \kappa^2}$, des pertes optiques linéiques apertes liées au facteur d'atténuation a , de la longueur d'onde λ , du périmètre de la cavité L et de l'indice effectif n_{eff} du mode propagé dans la cavité. La résonance est obtenue lorsque le retard accumulé après un tour est un multiple de 2π :

$$\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} L = p2\pi \quad (\text{II-11})$$

p est un nombre entier.

Ainsi, la longueur d'onde de résonance s'exprime :

$$\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} L = p2\pi \quad (\text{II-12})$$

D'après cette relation, la longueur d'onde de résonance dépend de l'indice effectif du mode propagé dans les guides d'onde. Ce paramètre optique n_{eff} est utilisé pour réaliser une application de détection avec des micro-résonateurs. L'ajout de molécules cibles à la surface du micro-résonateur va venir modifier l'indice effectif n_{eff} et donc la position de la longueur d'onde de résonance λ_{res} . Ce décalage est exploité pour remonter à la concentration de molécules cibles. [20]

La fonction de transfert $T(\lambda)$ est la réponse du micro-résonateur. Cette fonction de transfert peut être optimisée, afin d'obtenir les applications souhaitées, en modifiant les dimensions du micro-résonateur, les dimensions des guides d'onde et en choisissant les matériaux selon leurs indices de réfraction. Pour cela, différentes caractéristiques importantes sont définies à savoir, l'intervalle spectral libre ISL, le facteur de qualité Q , la finesse F et le contraste C . La figure 06 représente les paramètres caractéristiques du micro-résonateur déduits directement de la transmission spectrale :

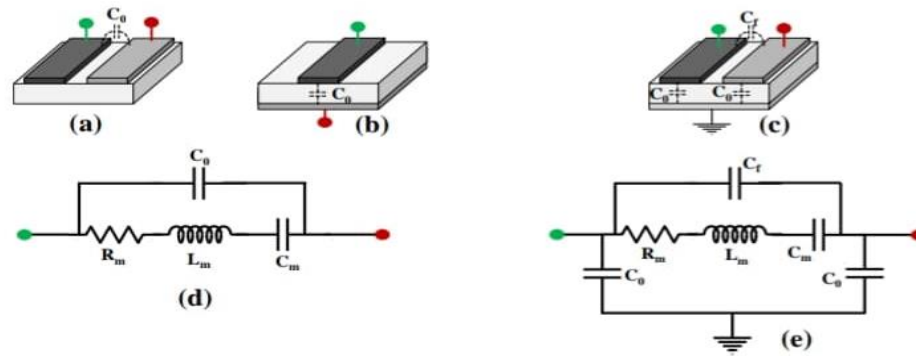


Figure II.3: Transmission spectrale d'un micro-résonateur

II.4. Les avantages des micro-résonateurs

Les micro-résonateurs offrent plusieurs avantages. Pour établir cette comparaison, les schémas électriques équivalents des trois technologies sont présentés figure 4.

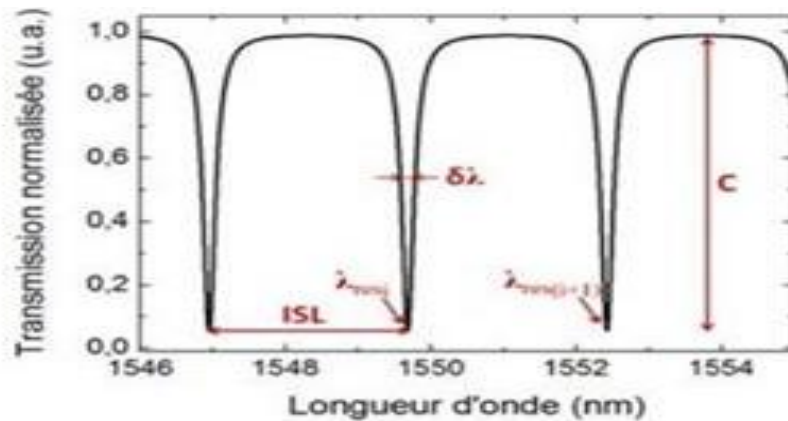


Figure II.4: Coupe transversale d'un résonateur (a) SAW, (b) BAW et (c) d'un micro résonateur. (d) Schéma électrique équivalent des résonateurs SAW et BAW, (e) et d'un micro résonateur

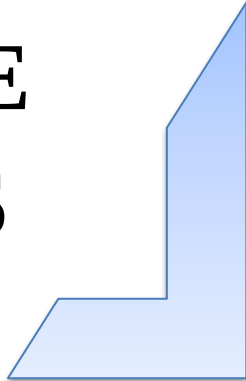
II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on définit la micro résonateur et son principe de fonctionnement qui on étudie fonction de transfert ' caractéristiques spectrales 'et en fin Les avantages par utilisation le micro résonateur.

CHAPITRE III



RESULTATS DE SIMULATIONS



III.1 Introduction :

Dans cette partie, nous simulons un micro - résonateur en anneau pour faciliter l'étude. Dans le processus de simulation, nous avons utilisé le logiciel Mode Solution, qui est produit par une société canadienne appelée Lumerical (Depuis avril 2020, cette société a été fusionnée dans la société américaine Ansys).



III.2 La fenêtre principale :

Lorsque vous ouvrez le programme, la fenêtre principale apparaît, qui se compose de plusieurs icônes. Là où en haut se trouve une barre multifonction, le côté gauche est réservé pour le design de la structure, et à côté se trouvent les paramètres de simulation.

Sur la droite, il y a une icône pour démarrer la simulation. En milieu se trouve la place de la visionneuse 3D de structure et l'éditeur de fichier script. Ci-dessous la fenêtre de commandes. Ce programme nous permet de simuler les différents types de guides « rectangulaire, circulaire, fibre optique » et comparer le micro résonateur qui fait l'objet de notre étude. La figure suivante représente La fenêtre principale de Mode Solution.

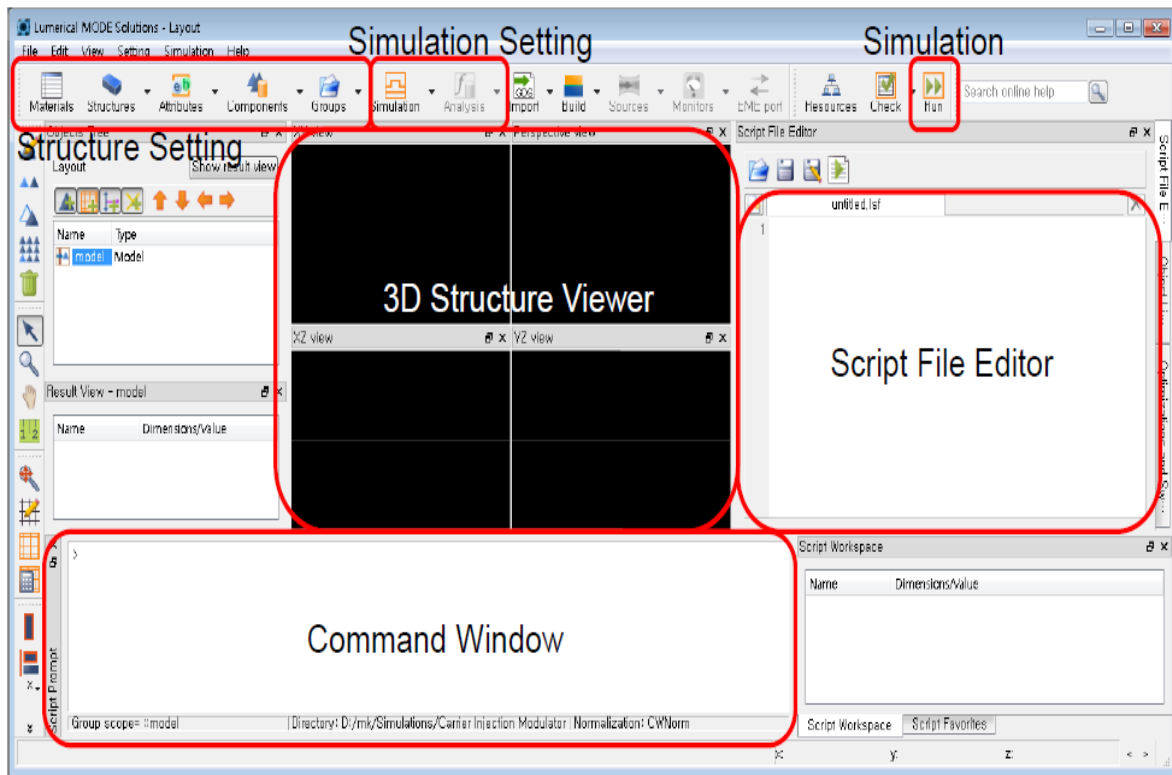


Figure III.1 : Fenêtre principale de Mode Solutions

III.3 La structure d'un micro-résonateur en anneau :

La figure suivante représente la structure du micro-résonateur en anneau qu'on va simuler :

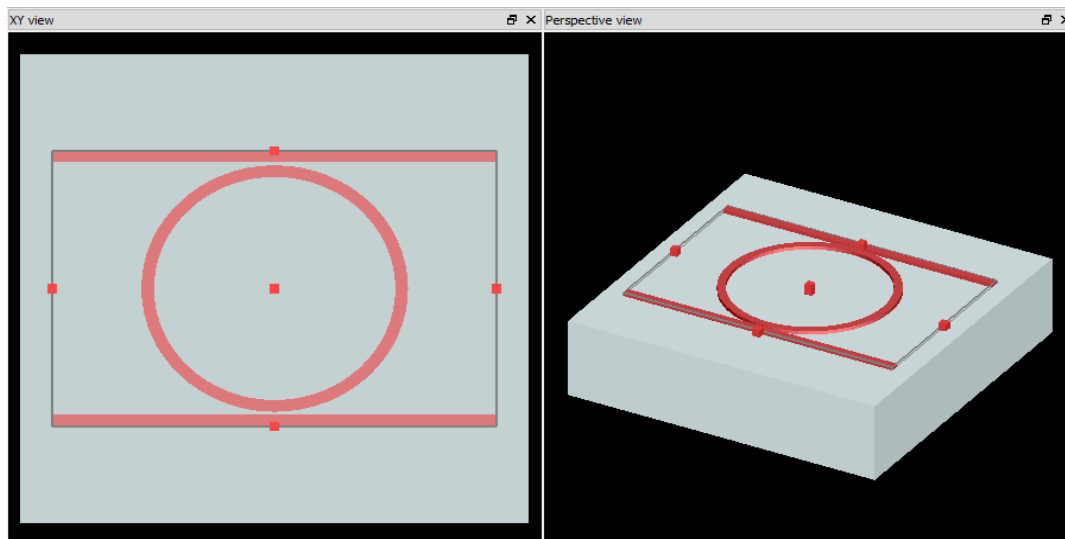


Figure III.2 : micro-résonateur en anneau

Un micro-résonateur se compose de deux guides d'ondes et d'un anneau. La lumière se propageant à travers les guides d'ondes dans un résonateur optique en anneau reste dans les guides d'ondes en raison de l'optique géométrique phénomène connu sous réflexion interne totale. Les différentes caractéristiques de notre micro résonateur sont définies dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Les différentes caractéristiques de micro résonateur [26]

Propriété	Valeur
x, y, z (μm)	-7, 0,0.09
Lc (μm)	0
écart (μm)	0,1
rayon (μm)	4
Matériau	Si (silicium)
largeur de base (μm)	0,4
hauteur de base (μm)	0,18
x portées (μm)	14
angle de base	90

III.4 La théorie :

Pour le cas du guide d'ondes en forme d'anneau couplé à deux guides d'ondes optiques, la puissance optique perdue peut être exprimée comme suit :

$$P_D = P_{IN} \frac{|\tau_{12}|^4}{|1 - \tau_{11}^2 e^{i\beta L}|^2} \quad (\text{III-1})$$

En résonance, la phase acquise par l'onde après un aller-retour complet est un multiple entier de 2π , soit $\beta L = 2\pi N$, avec N comme numéro de mode. Si l'indice de réfraction effectif est indépendant de la longueur d'onde, alors la longueur de l'anneau (également appelée périmètre) est un multiple entier de la longueur d'onde effective à la résonance, ou $L = N\lambda_0 / n_{eff}$, où l'indice de réfraction effectif est défini comme $n_{eff} = c\beta / \omega$ et $\lambda_0 = c / f_0$ est la longueur d'onde en espace libre à la fréquence de résonance f_0 .

En réalité, l'indice effectif dépend de la longueur d'onde et les résonances sont séparées par la plage spectrale libre (FSR) qui, en unités de longueur d'onde, est donnée par

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (III-2)$$

Où $n_g = c (d\beta / d\omega)$ est l'indice de groupe.

Comme la perte de flexion est faible pour les guides d'ondes à indice élevé et que nous ignorons les autres sources de perte, le facteur Q est approximativement donné par

$$Q = \frac{\lambda}{2\delta\lambda} = \frac{n_g L \pi}{\lambda} \frac{|\tau_{11}|}{1 - |\tau_{11}|^2} \quad (III-3)$$

Nous allons maintenant utiliser les formules ci-dessus pour concevoir un résonateur en anneau pour un système WDM avec un espacement des canaux de 200 GHz (1,6 nm à 1550 nm). Nous voulons concevoir le système pour supprimer tous les 16 canaux. Le FSR doit donc être de 3200 GHz (25,6 nm à 1550 nm). Nous aimerions que le FWHM de la goutte soit de 100 GHz, ce qui correspond à un Q d'environ $1550 \text{ nm} / 0,8 \text{ nm} \sim 2000$.

Nous utiliserons un système constitué d'un guide d'ondes SOI. Le guide d'ondes a une largeur de 400 nm et une hauteur de 180 nm.[26]

III.5 Résultats numérique:

Dans la première simulation, on va visualiser la distribution de champ optique dans le guide en utilisant un algorithme basé sur la méthode des différences finies :

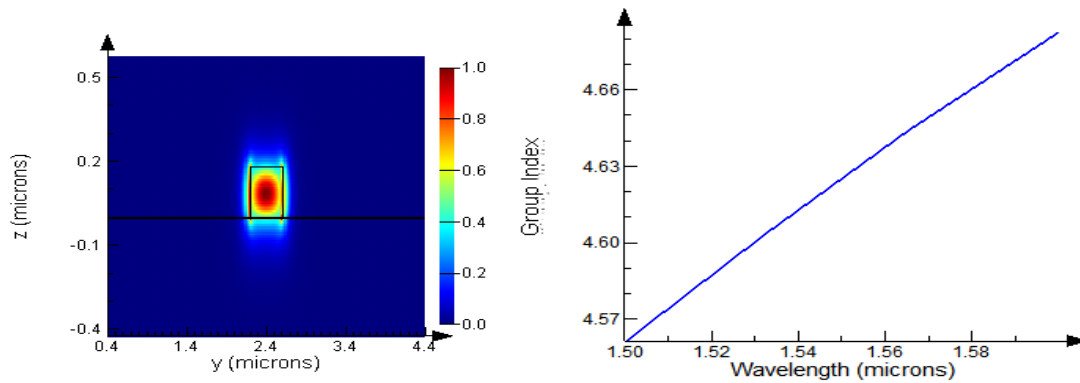


Figure III.3 : Distribution de champ optique et variation de l'indice effectif de mode en

- ✚ L'image représente une coupe transversale du guide d'onde, où l'on constate que la lumière est concentrée à l'intérieur du guide, ce qui signifie que la majorité de la puissance lumineuse se trouve à l'intérieur.

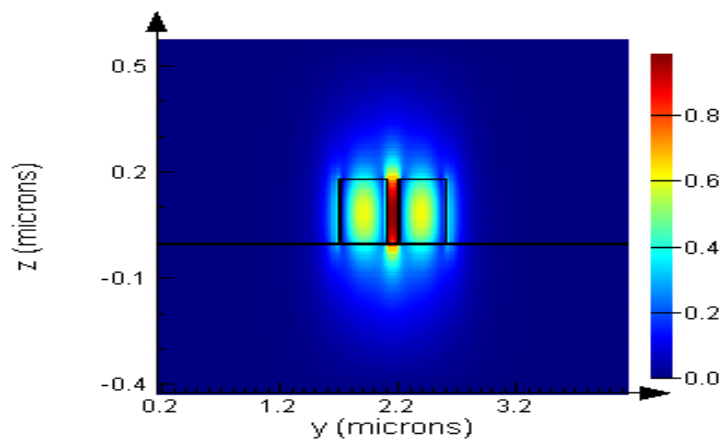


Figure III.4: L'image représente l'évolution du canal de réfraction en fonction de la longueur d'onde

- ✚ L'image représente une section transversale dans la région de couplage entre le guide d'ondes et l'anneau où nous remarquons qu'il y a un couplage de la lumière dans la région de centrage de puissance

La deuxième simulation on va visualiser la propagation du champ optique dans le guide on utilisant un algorithme basé sur la méthode de différence finies dans le domaine temporel.

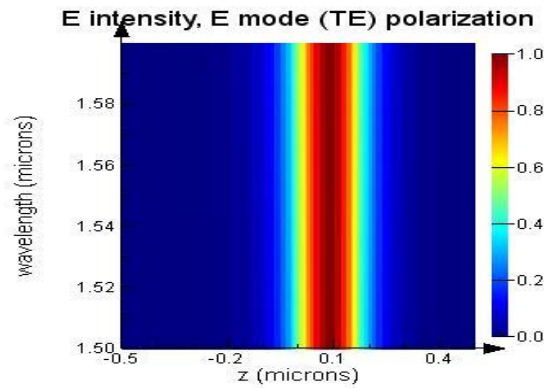


Figure III.5 : Intensité de champ électrique pour le mode TE

✚ D'après l'image, l'intensité du champ lumineux est centrée au milieu tout le long du guide.

Nous pouvons aussi utiliser l'environnement de MODE pour visualiser la propagation du champ optique dans le guide ainsi que couplage.

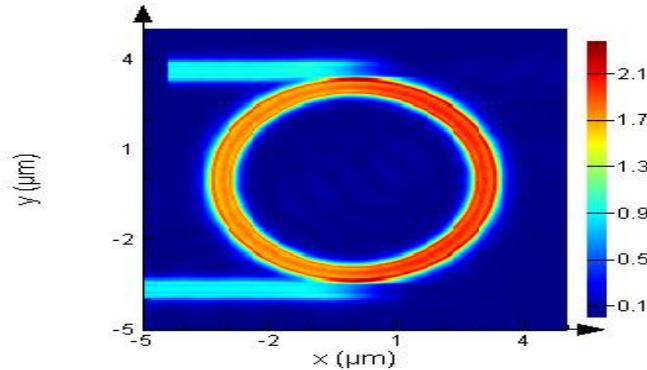


Figure III.6 : Un résonateur en anneau à quatre ports

✚ Cette coupe montrant le chemin du champ lumineux dans un micro résonateur

Le résonateur annulaire est un appareil à Q élevé qui emprisonne la lumière pour de nombreux allers-retours dans l'anneau. Ces dispositifs à Q élevé nécessitent des temps de simulation plus longs dans le domaine temporel que les dispositifs non résonants. Nous commencerons par un temps de simulation de 5000fs, bien que plus de temps puisse être nécessaire. Notez que c'est plus long que notre temps de simulation par défaut (1000fs). Il est

important d'augmenter le temps de simulation car les résultats du moniteur de domaine fréquentiel sont incorrects si le temps de simulation n'est pas défini suffisamment longtemps pour que les champs se désintègrent.

Après avoir exécuté la simulation, nous pouvons considérer l'intensité du champ E près d'une résonance de goutte.

Nous pouvons comparer le résultat avec la courbe théorique basée sur notre objectif FSR et Q. Notez que nous avons ajusté la phase du coefficient de couplage pour aligner les pics près de 1550nm, puisque seule l'amplitude du coefficient de couplage est donnée par Q.

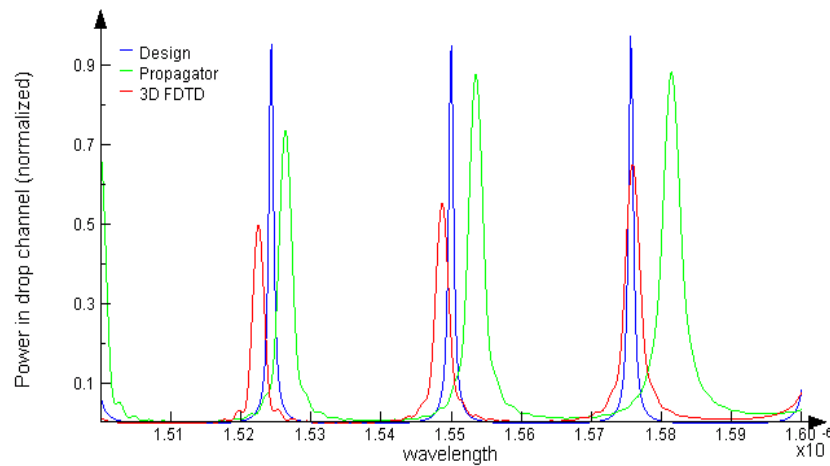
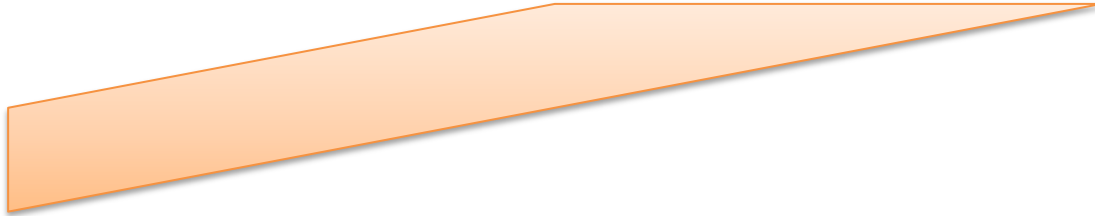


Figure III.7 :La réponse fréquentielle en puissance calculé par différentes méthodes

III.6 CONCLUSION :

L'objectif de ce chapitre était la simulation numérique de la propagation dans un micro-résonateur en anneau. Les résultats sont en accord raisonnable pour le FSR théorique. La simulation 3D FDTD montre une transmission totale plus faible car elle représente plus de sources de perte. Notez que nous avons ajusté les pics théoriques pour donner un maximum à 1550 nm. La position précise de ce pic est très sensible à la longueur optique exacte de l'anneau.



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

L'optique intégrée permet la réalisation de composants de communication principalement, que ce soit dans la transmission de signaux optiques tels que les fibres optiques, ou dans le domaine du traitement de ce signal tels que des filtres, des multiplexeurs, des comparateurs ... etc. Mais aussi des capteurs optiques pour des mesures de grandeurs physiques, astrophysiques, chimiques et biologiques

Sur la base de ces informations, nous avons mené une étude sur de micro-résonateur en anneau qui est un ensemble de guides d'ondes , dans lequel au moins l'un est un circuit fermé couplé à une sorte d'entrée de lumière et de sortie. Il utilise la lumière et obéisse aux propriétés derrière une constructive et la réflexion interne totale . Lorsque la lumière de la résonance longueur d'onde passe à travers la boucle de guide d' ondes d'entrée, il se forme de l'intensité sur plusieurs allers - retours en raison de l' interférence constructive et est émis vers le guide d' ondes de bus de sortie qui sert de guide d'ondes de détecteur. Etant donné que seuls quelques - uns seulement des longueurs d'onde seront à la résonance à l'intérieur de la boucle, les fonctions de résonateur optique en anneau comme un filtre.

À la fin du travail, nous avons utilisé un programme de simulation pour clarifier la structure de l'élément en plus d'une compréhension précise de son fonctionnement

RÉFÉRENCE

- [1]. Djebbari L et Barkat L , (2014). Conception, simulation et la réalisation d'un guide d'onde rectangulaire en bande X .Université de Tlemcen, Mai 2014.
- [2]. Boukaddid S (2007) . Ondes électromagnétiques.
- [3] Nouri K , (2013).Thèse de magister en Electronique .
- [4] Grenier D ,(2015). Electromagnétisme et transmission des ondes", Thèse de doctorat pp.51, Université LAVAL.
- [5] Szachowicz M (2006).Réalisation et études spectroscopiques de guides d'ondes monocristallins de Y3Al5O12et YAlO3dopés terres rares pour la conversion de fréquence. Université Claude bernard-lyon I .
- [6] Messaad K, (2009).Contribution à la conception de guides optiques à fortes susceptibilités non-linéaires d'ordre 3, université Rennes.
- [7] Vincent Coudé du FOREST0,(1997) . Optique guide monomode et interférométrie stronomique , Université de Paris VII Observatoire de Meudon.
- [8] Vasilief I, (2003). Guide d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopés erbium : spectroscopie et amplification optique, Université CLAUDE BERNARD-Lyon I, 2003
- [9] Meriche F (2008). Structuration 1D et 2D de matériaux diélectriques par ablation laser nanoseconde. Thèse de doctorat . Constantine .
- [10] Grenier D ,(2012) Electromagnétique et transmission des ondes .Université de Lavale . Québec .
- [11] Kdrouci et Boughazi (2014). "Conception, simulation et la réalisation d'un guide d'onde circulaire en bande X ", Université de Tlemcen.
- [12] RSoft CAD 5.19.User guide RSoft design group, 200 exécutive Blvd NY.
- [13] Vander A et Vorst D(2013) .Bases de l'ingénierie micro-onde.
- [14] Szachowicz M (2006), réalisation et études spectroscopiques de guides d'ondes monocristallins de Y3Al5O12et YAlO3dopés terres rares pour la conversion de fréquence. Université Claude bernard-lyon I .

REFERENCES

- [15] Poffo L,(2011). Interaction Acousto-optique En Optique Intégrée Sur Verre Et Applications,
- [16] Maalouf A,(2007) . Contribution a l'étude des procédés de réalisation de circuits intégrés optiques en matériaux polymères ,Université Rennes1 .
- [17] MICRO-OPTICAL RESONATORS FOR MICROLASERS AND INTEGRATED OPTOELECTRONICS Recent advances and future challenges Trevor M. Benson¹ , Svetlana V.Boriskina¹ , Phillip Sewell¹ , Ana Vukovic¹ , Stephen C. Greedy¹ and Alexander I. Nosich^{1,2}
1.George Green Institute for Electromagnetics Research, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK; 2 Institute of Radio Physics and Electronics NASU, Kharkov 61085, Ukraine
- [18] Fan X, White I, Shopova S, Zhu H, Suter, (2008) . Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review. *Analytica Chimica Acta.*, vol. 620, pp. 8-26, 2008.
- [19] Carlborg C, Gylfason K, Kazmierczak A, Dortu, (2010),A packaged optical slot-waveguide ring resonator sensor array for multiplex label-free assays in labs-on-chips,“ Royal Society of Chemistry, vol 10, pp 257-396.
- [20] Girault P, Lemaitre J, Guendouz M, N and Bosc D, (2014).Micro-resonators based on integrated polymer technology for optical sensing. vol 9141, pp 76, 2014.
- [21] Jiang, J (2013), “Cascaded silicon-on-insulator doubling sensors operating in high-sensitivity transverse-magnetic mode”, *Optics Letters*, t. 38, no 8, p. 1349.
- [22] Jin L,(2011).Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect. *Optics Communications*, t. 284, p. 156..
- [23] Claes T,Bogaerts W et Bienstman P,(2010).Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit”, *Optics Express*, t. 18, no 22, p. 22 747.
- [24] Zamora V, Lützow P, Weiland M et Pergande D,(2013).A highly sensitive refractometric sensor based on cascaded sin microring resonators, *Sensors*, t. 13, p. 14 601.
- [25] Barrios C,Gylfason K, Sánchez B, Griol A, Sohlström H, Holgado M et. Casquel R,(2007). Slot-waveguide biochemical sensor”, *Optics Letters*, t. 32, no 21, p. 3080.
- [26] Hammer, M. et Hiremath, KR et Stoffer, R. (2004) Approches analytiques de la description des dispositifs de microrésonateur optique. (Invité) In: *Microresonators as Building Blocks for VLSI Photonics*, 18-25 octobre 2003, Erice, Italie. 48-71. Actes de la conférence AIP 709. Springer. ISSN 0094-243X ISBN 978-0-7354-0184-6