

N° d'ordre : 2953

THESE

Présentée à

l'Université des Sciences et Technologies de Lille

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité: ELECTRONIQUE

par

Jérôme DANGLLOT

**Dispositifs microondes et optiques à base de matériaux à gaps de
photon**

soutenue le 27 juin 2001 devant la commission d'examen

Membres du jury :	M. G. Salmer	Président
	M. D. Lippens	Directeur de thèse
	M. O. Vanbésien	Co-directeur de thèse
	M. J.-M. Lourtioz	Rapporteur
	M. P. Viktorovitch	Rapporteur
	M. P. de Maagt	Examineur
	M. A. Carencu	Examineur
	Mme N. Vodjdani	Examineur

Résumé

Depuis une décennie, une nouvelle classe de matériaux a suscité un très vif intérêt dans le monde de la recherche et ceci dans plusieurs secteurs de la physique. Il s'agit des structures périodiques diélectriques ou métalliques, rencontrées sous les appellations "cristaux photoniques" ou "matériaux à gaps de photon", qui présentent des états photoniques structurés en bandes interdites et passantes. Ces travaux de thèse ont consisté dans un premier temps à étudier les propriétés physiques de ces matériaux et, dans un deuxième temps, à aborder leurs potentielles exploitations pour des applications dans les domaines des hyperfréquences et de l'optique. Dans la plupart des cas, des simulations électromagnétiques ont été menées pour étudier et concevoir des dispositifs de filtrage ou de guidage dédiés à ces domaines accompagnées d'une réflexion sur les développements technologiques associés.

L'étude de réseaux métalliques bi- et tridimensionnels a permis d'analyser le comportement de ces structures utilisées en guide d'onde ou en cavité résonnante et d'introduire l'idée novatrice d'accordabilité basée sur l'insertion de composants actifs permettant le contrôle électrique de leurs propriétés de transmission. Les propriétés de sélectivité angulaire de ces matériaux ont ensuite été exploitées pour l'amélioration des caractéristiques de rayonnement d'antennes. Citons, à titre d'exemple, la conception d'un réflecteur parabolique diélectrique à géométrie plane. Enfin, la structuration périodique bidimensionnelle d'hétérostructures semiconductrices a été exploitée pour la réalisation de dispositifs optiques permettant le couplage directif et sélectif en longueur d'onde de l'énergie électromagnétique pour des applications dans les réseaux multicolores. Deux aspects ont alors été abordés : d'une part la conception d'un coupleur à base de cavités à modes de galerie et d'autre part la fabrication technologique nécessitant la réalisation de gravures profondes de motifs submicroniques.

Mots clés

- Cristaux photoniques
- Couplage directif
- Antennes directives
- Accordabilité
- Gravure profonde
- Résonateurs à modes de galerie

Discipline

Electronique

Intitulé et adresse du laboratoire

Institut d'Electronique et de Microelectronique du Nord (IEMN), Avenue Poincaré BP 69, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Les structures périodiques à bandes interdites photoniques	5
1) Introduction	5
2) Le concept de cristal photonique	5
2-1 : <u>Un concept pas si nouveau</u>	5
2-2 : <u>Généralisation du concept</u>	8
3) Outils d'analyse numérique	11
3-1 : <u>Calcul de structures de bandes</u>	11
3-2 : <u>Méthode des lignes de transmission</u>	13
3-3 : <u>Méthode « Full-Wave »</u>	14
3-3-1 : Temporelle : FDTD	14
3-3-2 : Fréquentielle : FEM	14
4) Caractérisation expérimentale	15
4-1 : <u>Domaines millimétrique et sub-millimétrique</u>	16
4-1-1 : Mesure en transmission	16
4-1-2 : Autres méthodes	16
4-2 : <u>Domaine optique</u>	17
4-2-1 : Injection par fibre lentillée	17
4-2-2 : Photoluminescence guidée	17
5) Applications	18
5-1 : <u>En hyperfréquence</u>	18
5-1-1 : Guides d'onde	18
5-1-2 : Filtres	19
5-1-3 : Réflecteurs d'antenne	19
5-2 : <u>Optique</u>	20
5-2-1 : Guidage de la lumière	20
5-2-2 : Coupleur optique	21
5-2-3 : Sources optiques	21
	22

5-2-3-1 : Diode électroluminescente	22
5-2-3-2 : Laser sans seuil	22
5-3 : <u>Gap Terahertz</u>	22
6) Fabrication du cristal photonique à gap complet	23
6-1 : <u>La structure tas-de-bois</u>	23
6-2 : <u>Les opales</u>	24
6-3 : <u>Autres réalisations</u>	24
7) Conclusion	27
Références bibliographiques	33
CHAPITRE II : Dispositifs de guidage pour les hyperfréquences	33
1) Introduction	33
2) Choix de la structure	34
2-1 : <u>Géométrie</u>	35
2-2 : <u>Caractérisation</u>	35
2-2-1 : Spectres de transmission et de réflexion	36
2-2-2 : Aspect fini de la structure BIP	38
2-3 : <u>Défauts de structure</u>	38
2-3-1 : Défauts ponctuels	41
2-3-2 : Défauts linéiques	42
3) Caractérisation d'un guide BIP :	42
3-1 : <u>Mesure champ intermédiaire/champ proche</u>	44
3-2 : <u>Transition adiabatique</u>	44
3-2-1 : Sans transition	44
3-2-2 : Avec transition	45
3-3 : <u>Pertes</u>	45
3-3-1 : Pertes de retour	45
3-3-2 : Pertes radiatives (diffraction)	46
4) Analyse par raccordement de modes	46
4-1 : <u>Homogénéisation</u>	47

4-2 : <u>Décomposition en ondes planes</u>	48
4-3 : <u>Raccordement aux interfaces</u>	49
5) Quelques exemples	49
5-1 : <u>Guide d'onde avec stub</u>	49
5-1-1 : Caractérisation	50
5-1-2 : Etude théorique	50
5-1-2-1 : Raccordement de modes	52
5-1-2-2 : Cartes de champ électrique	53
5-2 : <u>Coupleur directif</u>	53
5-2-1 : Principe	53
5-2-1-1 : Coupleur simple branche	55
5-2-1-2 : Coupleur double branche	56
5-2-2 : Caractérisation	58
5-2-3 : Analyse	60
6) Conclusion	61
Références bibliographiques	63
CHAPITRE III : Accordabilité des dispositifs en gamme millimétrique	63
1) Introduction	63
2) Bases physiques de l'accordabilité	64
2-1 : <u>Du réseau 2D vers le réseau 3D</u>	65
2-2 : <u>Aspect capacitif de la transmission</u>	66
2-3 : <u>Réseau 2D $\frac{1}{2}$</u>	66
2-3-1 : Réalisation	67
2-3-2 : Caractérisation expérimentale	69
3) Principe d'accordabilité	69
3-1 : <u>Idée de base</u>	69
3-2 : <u>Simulation électromagnétique</u>	70
3-3 : <u>Modulation de capacité ou de conductance</u>	70
3-3-1 : La diode varactor	72
3-3-2 : Le transistor à effet de champ	73
3-4 : <u>Simulation de type circuit</u>	73
3-4-1 : Principe	74

3-4-2 : Résultats	74
3-4-2-1 : Modulation de capacité	75
3-4-2-2 : Modulation de conductance	76
4) Conception de dispositifs accordables	77
4-1 : <u>Cavité</u>	77
4-1-1 : agilité en fréquence	78
4-1-2 : Modulation de la sélectivité	79
4-2 : <u>Guide à retard de phase</u>	79
4-2-1 : Caractéristique de transmission	80
4-2-2 : Caractéristique de dispersion	81
4-3 : <u>Guide d'onde avec stub modulable</u>	82
4-4 : <u>Interrupteur électromagnétique</u>	82
4-4-1 : Idée	83
4-4-2 : Transmission	84
4-4-3 : Répartition du champ	85
5) Conclusion	87
Références bibliographiques	89
CHAPITRE IV : Conformation de systèmes rayonnants	89
1) Introduction	89
2) Phénomènes de diffraction dans les BIPs	90
2-1 : <u>BIP en réflexion</u>	92
2-2 : <u>BIP en transmission</u>	93
2-2-1 : Caractérisation	95
2-2-2 : Simulation	96
3) Réflecteur parabolique	97
3-1 : <u>Concept de plan réflecteur équivalent</u>	99
3-2 : <u>Idée : Variation du facteur de remplissage</u>	99
3-2-1 : Analyse qualitative	99
3-2-1-1: structure générique	100
3-2-1-2 : Spectre de transmission	100
3-2-1-3 : Cartes de champ	101
3-2-2 : Problème 3D	101
3-2-3 : Etude préliminaire : cas 2D	102

3-3 : <u>Analyse</u>	102
3-3-1 : Evolution de la phase	103
3-3-2 : Profil de d	103
3-3-3 : D'autres voies d'analyse	105
4) effet d'auto-collimation dans une cavité résonnante à BIPs	105
4-1 : <u>Cavité à miroirs de Bragg</u>	105
4-1-1 : Définition de la cavité	107
4-1-2 : Sources anisotropes	109
4-2 : <u>Analogie quantique</u>	109
4-2-1 : Défaut dans un super-réseau	110
4-2-2 : Sélectivité angulaire et directivité	112
5) Conclusion	115
Références bibliographiques	117
CHAPITRE V : Intégration optique par ingénierie de bandes interdites	117
1) Introduction	118
2) Confinement optique	118
2-1 : <u>Les différentes options</u>	119
2-2 : <u>Confinement vertical : Hétérostructure GaInAsP/InP</u>	120
2-3 : <u>Confinement latéral</u>	123
3) Faisabilité technologique : Etude préliminaire	123
3-1 : <u>Séquence epitaxiale avec couche active</u>	123
3-2 : <u>Méthode de transfert de masque</u>	125
3-3 : <u>Lithographie électronique</u>	127
3-4 : <u>Gravure nitrure</u>	127
3-5 : <u>Gravure InP</u>	129
4) Guide d'onde	129
4-1 : <u>Choix du guide</u>	129
4-2 : <u>Injection de modes</u>	130
4-2-1 : Injection d'ondes planes	131

4-2-2 : Injection par modes guidés	133
4-3 : <u>Pertes</u>	134
4-3-1 : Injection 3D	135
4-3-2 : Pertes d'insertion	136
4-3-3 : Pertes de désadaptation	136
4-3-4 : Pertes de conversion de mode	137
4-3-5 : Pertes radiatives	139
5) Cavités surdimensionnées	139
5-1 : <u>Définition</u>	140
5-2 : <u>Résolution aux valeurs propres : cavité fermée</u>	141
5-3 : <u>Problème de l'injection</u>	142
5-3-1 : Cavité semi-ouverte	143
5-3-2 : Cavité ouverte	144
6) Coupleur directif et sélectif	144
6-1 : <u>Etudes préliminaires</u>	146
6-2 : <u>Dispositif envisagé</u>	147
6-3 : <u>Premiers résultats</u>	148
6-4 : <u>Discussion</u>	148
6-4-1 : Origine de la sélectivité	149
6-4-2 : Origine de la directivité	149
7) Conclusion	151
Références bibliographiques	153

CONCLUSION GENERALE

Introduction générale

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit ont été effectués dans l'équipe Composants Quantiques et Dispositifs Terahertz de l'Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord. Depuis la mise en évidence en 1987 des propriétés électromagnétiques des cristaux photoniques par E. Yablonovitch, une véritable dynamique s'est créée autour de cette nouvelle catégorie de matériaux la comparant parfois même pour l'optique à la révolution scientifique qu'a connue l'électronique avec l'exploitation des propriétés des matériaux semiconducteurs. Cette comparaison, bien que pouvant paraître excessive, s'explique par la forte analogie qui s'établit naturellement entre les deux domaines. En effet, ces cristaux photoniques, s'appuyant sur la structuration périodique de matériaux diélectriques ou métallo-diélectriques, octroient aux photons un comportement analogue à celui des électrons dans les semiconducteurs. C'est ainsi que les états photoniques se structurent en bandes spectrales séparées par des bandes interdites (ou gaps) complètement dépourvues d'états. On comprend alors que ces matériaux apparaissent comme un véritable moyen, par ingénierie de bandes interdites, de contrôler la propagation et/ou le rayonnement des ondes électromagnétiques et de modifier parfois même certaines grandeurs fondamentales de la physique, comme l'émission spontanée. Ces concepts de structure à bandes interdites photoniques (BIP) sont issus directement de la résolution des équations de Maxwell dans un milieu diélectrique périodique, homothétique par rapport aux variables spatiales. Par conséquent, ils ont la formidable propriété d'être transposable dans différents domaines de la physique, de l'acoustique à l'optique en passant par le domaine des hyperfréquences. La seule limitation de ces concepts est issue de la technologie à mettre en œuvre pour atteindre la gamme de fréquence ou la longueur d'onde désirée. Il s'agit, par exemple pour un fonctionnement dans le spectre optique, d'atteindre des dimensions submicroniques pour les périodes et les motifs de ces structures.

Depuis, dans le domaine optique, la perspective de pouvoir réaliser un laser sans seuil ou des diodes électroluminescentes ultra performantes a généré un véritable engouement dans la communauté scientifique. On cherche notamment à créer un cristal photonique tridimensionnel dit « à gap complet », c'est-à-dire commun à toutes les incidences et polarisations de l'onde. En parallèle, d'autres domaines tels que les hyperfréquences ou l'acoustique se sont inspirés des propriétés des structures BIPs dans le but de réaliser de nouvelles fonctions ou d'améliorer celles remplies par les dispositifs classiques existants. On peut citer, à titre d'exemple et de façon non exhaustive, les réflecteurs d'antennes permettant d'améliorer considérablement les caractéristiques de gain et de directivité mais également les dispositifs de filtrage contrôlant les propriétés harmoniques des lignes de propagation ou des composants actifs. En optique, une alternative à l'utilisation de structures BIP tridimensionnelles réside dans le choix de topologies qui permettent de s'affranchir de la troisième dimension. Les propriétés établies de guidage à angle droit ou de filtrage de ces cristaux apparaissent alors comme des outils intéressants pour la conception d'objets passifs dédiés aux applications WDM (Wavelength Division Multiplexing) via une approche toute intégrée, basée sur la structuration périodique d'hétérostructures semiconductrices.

L'ensemble du spectre électromagnétique est donc en passe d'être couvert par ce recours aux structures périodiques pour définir de nouvelles fonctionnalités. Signalons que pour certains membres de la communauté scientifique, principalement dans le domaine des microondes, cet engouement nouveau est quelque peu factice dans la mesure où les structures périodiques font partie intégrante de l'électromagnétisme depuis plusieurs décennies. Néanmoins, deux aspects paraissent réellement novateurs : tout d'abord, la recherche d'une véritable structuration tridimensionnelle ;

ensuite, de manière complémentaire, l'intérêt porté sur les potentialités d'accordabilité de ces structures. Ceci peut être réalisé soit par utilisation de matériaux présentant des propriétés non-linéaires tels que les matériaux ferroélectriques ou les cristaux liquides ou parfois même de composants actifs intégrés à la structure.

Ainsi, réellement nouveau dans le domaine de l'optique, l'utilisation des « cristaux photoniques » sur l'ensemble du spectre électromagnétique a relancé bon nombre de travaux de recherches dans des domaines connexes. Si l'on prend comme exemple les propriétés de filtrage et de guidage des ondes électromagnétiques, il apparaît clairement, que hormis les spécificités propres de fabrication dans chacun des domaines, nombre de concepts soient communs des microondes à l'optique. En conséquence, la transversalité des connaissances doit permettre la progression dans chacun des domaines. C'est dans ce but que ce manuscrit sera rédigé, embrassant aussi bien les hyperfréquences que le domaine optique et en tâchant d'identifier chaque fois que cela sera possible la continuité des concepts.

Dans cet ensemble, nos travaux ont consisté principalement à étudier les propriétés électromagnétiques propres aux structures BIPs diélectriques et métal-diélectriques ainsi que les propriétés de guidage et de filtrage dérivées quel que soit le domaine spectral visé. Les outils mis en place ont été à la fois théoriques et expérimentaux. La caractérisation expérimentale de réseaux BIPs métalliques a été assurée, dans le domaine des hyperfréquences à l'aide d'analyseurs de réseau, par des mesures en transmission permettant d'étudier le comportement de l'onde à la fois en module et en phase. L'outil numérique principal utilisé est le logiciel commercial HFSS permettant la résolution tridimensionnelle des équations de Maxwell pour des structures quelconques par discrétisation de celles-ci en éléments finis. Des codes de calculs dérivés du domaine de l'électronique quantique et développés dans notre équipe ont permis également de réaliser un grand nombre d'études en s'appuyant sur l'analogie existant entre l'équation de Schrödinger pour l'électron et l'équation d'Helmholtz pour le photon. Enfin, des procédés technologiques ont du être mis en place pour réaliser ces structures BIPs. Dans le domaine des hyperfréquences, des structures métalliques 2D1/2 ont ainsi été obtenues à l'aide des procédés technologiques utilisés couramment pour la réalisation de circuits imprimés. Des premiers essais de gravures profondes, basés sur les procédés utilisés cette fois pour les micro- et nanotechnologies, ont également été entrepris pour la structuration périodique d'hétérostructures semiconductrices permettant la réalisation de cristaux photoniques 2D dédiés à l'optique intégrée.

Ce mémoire sera divisé en cinq chapitres.

Le premier sera consacré à une présentation générale des matériaux à gap de photons. Différents points seront successivement abordés, en partant d'une « zoologie » des structures et de leurs principales caractéristiques pour envisager ensuite les domaines potentiels d'application. Loin d'être exhaustive, cette présentation tachera néanmoins, comme indiqué précédemment, d'adresser l'ensemble du spectre fréquentiel en précisant dans chacun des cas les spécificités propres aux domaines étudiés, principalement en termes de fabrication.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de structures métalliques bidimensionnelles d'un point de vue intrinsèque et extrinsèque en gamme millimétrique. La première approche consistera à mettre en évidence les mécanismes de construction des bandes interdites et passantes par une analyse de la répartition du champ électromagnétique dans la structure. L'insertion de défauts de type ponctuels ou linéiques sera de la même façon étudié pour caractériser les propriétés extrinsèques d'un réseau. Ces dernières études permettront d'introduire les notions de cavités et de guides d'onde BIP qui seront exploitées dans une dernière partie pour la conception de dispositifs

hyperfréquences. Toutes ces études seront validées à la fois par des simulations électromagnétiques sur le logiciel HFSS et par leurs caractérisations expérimentales à l'analyseur de réseau.

La mise en évidence de la présence d'une nouvelle bande passante en basses fréquences lors d'une étude d'un réseau métallique 3D nous conduira, dans le troisième chapitre, au concept de structures BIP reconfigurables. Cette idée consistera à moduler l'aspect capacitif ou conducteur des motifs métalliques utilisés par insertion locale de composants actifs de type diode ou transistor. Ceci entraînera une modulation plus ou moins continue des propriétés de transmission des réseaux BIPs métalliques à l'aide du contrôle électrique de l'état de ces composants. Cette propriété sera alors exploitée pour la conception de dispositifs accordables en ondes millimétriques et submillimétriques tels que :

- une cavité résonnante accordable en fréquence ou en facteur de qualité ;
- un déphaseur basé sur la modulation des propriétés d'un guide BIP ;
- un interrupteur électromagnétique résonant basé sur la fonction de couplage directif.

Le quatrième chapitre concernera également le domaine des hyperfréquences avec l'exploitation, cette fois, des propriétés de filtrage angulaire des cristaux photoniques dans le but d'accroître les performances des systèmes rayonnants. Une première étude du comportement des réseaux BIPs utilisés en transmission (bande passante) ou en réflexion (bande interdite) consistera à observer les modifications des diagrammes de rayonnement d'antennes associées et d'analyser les résultats en les reliant aux modes propagatifs ou évanescents apparaissant dans ces structures. Sur la base de cette étude, deux exemples d'applications seront présentées pour montrer les potentialités offertes par les cristaux photoniques pour la conformation de faisceaux d'antennes. La première idée, basée sur l'évolution des caractéristiques du cristal en termes de réflexion en fonction de ses dimensions, visera la conception d'un réflecteur parabolique à géométrie « plane ». Le second exemple proposera une analyse des phénomènes d'autocollimation induite par l'insertion d'antennes dans des cavités BIPs à partir des phénomènes analogues observables dans les hétérostructures semiconductrices de type super-réseau.

Enfin, le dernier chapitre traitera de l'utilisation de cristaux photoniques bidimensionnels inscrits dans des matériaux semiconducteurs pour la réalisation de fonctions « add-drop » nécessaires aux télécommunications optiques. Nous verrons dans un premier temps la topologie guide planaire envisagée qui permet de s'affranchir de la troisième dimension pour le réseau périodique. La technologie nécessaire à la réalisation de ces réseaux de dimensions submicroniques sera présentée ainsi que les résultats préliminaires de fabrication. Nous donnerons ensuite les résultats obtenus concernant l'étude théorique de guides d'onde et de cavités à mode de galerie inscrits dans la structure BIP. Ces éléments permettront de définir le coupleur directif et sélectif en longueur d'onde servant à la réalisation de la fonction « add-drop ». Une analyse qualitative de l'origine de la directivité et de la sélectivité succédera à la présentation des résultats de simulations obtenus sur ce dispositif.

Conclusion générale

L'essentiel de notre travail a porté principalement sur l'analyse électromagnétique des structures à bandes interdites photoniques et l'application des concepts dégagés, dans les domaines des hyperfréquences et de l'optique. Nos études ont été menées en grande partie par des simulations qui nous ont permis d'appréhender les mécanismes de propagation, d'évanescence ou de résonance à l'origine de la plupart des phénomènes observés. Les analogies fortes entre l'électromagnétisme et l'électronique quantique nous ont également facilité la compréhension et l'analyse des comportements induits par ces structures. La réalisation de réseaux BIPs a pu être envisagée en s'appuyant sur les procédés technologiques des circuits imprimés et des micro- et nanotechnologies. Plusieurs domaines d'applications ont alors été explorés que ce soit pour le développement de dispositifs passifs ou de systèmes rayonnants en ondes millimétriques et submillimétriques ou pour la réalisation en optique intégrée de dispositifs "add-drop" exploitables dans les réseaux WDM.

Dans un premier temps, les études théoriques et expérimentales d'un réseau BIP métallique bidimensionnelle ont permis de comprendre les mécanismes de construction des bandes interdites et passantes en terme de modes propagatifs et évanescents apparaissant dans la structure. Il a été mis en évidence les phénomènes de guidage et de résonance issues directement de l'insertion de défauts, respectivement, linéiques et ponctuels qui furent à la base de la plupart des dispositifs étudiés. Deux exemples de ces dispositifs passifs dans le domaine des hyperfréquences ont pu être caractérisés expérimentalement pour rendre compte essentiellement du guidage de l'énergie électromagnétique et retrouver des concepts connus dans d'autres domaines, tel que le couplage de deux continuums par des états quasi-liés.

Par la suite, l'étude d'un réseau BIP métallique tridimensionnel nous a amené à introduire l'idée nouvelle d'accordabilité de ces réseaux en termes de propriétés de transmission. Cette idée s'appuie sur la différence de comportement apparaissant entre les structures 2D et 3D et le passage d'une situation à l'autre par insertion de composants actifs. Des simulations couplant les analyses électromagnétiques et électriques ont conduit à la validation de ce principe en montrant l'obtention d'un contrôle électrique de la transmission. L'exploitation de ce principe a été clairement illustrée par la présentation de dispositifs résonnants et/ou de guidages accordables dans le domaine des hyperfréquences.

Une étude des propriétés de filtrage angulaire d'un réseau BIP métallique associé à des systèmes rayonnants en réflexion ou en transmission a mis en évidence les potentialités offertes par ces structures pour l'amélioration des caractéristiques de directivité et de gain des antennes. A partir de ces résultats, une idée originale a été proposée pour la conception d'un réflecteur parabolique à géométrie plane avec une première analyse de résultats obtenus. L'utilisation de réseau BIP en transmission a été également étudiée en insérant une antenne dipôle dans une cavité à miroirs de Bragg (BIP 1D). Ce dispositif simple nous a permis d'analyser l'accroissement de la directivité de l'antenne en termes d'évanescence et de résonance en s'appuyant sur l'analogie existant avec les super-réseaux semiconducteurs.

Dans le dernier chapitre, l'utilisation alternative des cristaux photoniques bidimensionnels pour l'optique intégrée a été présentée, accompagnée des moyens technologiques à mettre en œuvre pour la réalisation de ces structures. Des premiers essais technologiques ont pu être menés de façon à explorer la réalisation de gravures profondes de motifs submicroniques. La conception d'un

dispositif directif et sélectif en longueur d'onde a pu être envisagé à l'aide des deux briques de base que sont le guide d'onde et la cavité à modes de galerie.

Bien qu'à ce jour aucune réalisation complète de dispositif s'appuyant sur les propriétés des cristaux photoniques n'ai été effectuée, ces études ont pu montrer le caractère innovant et riche de l'utilisation de ces nouveaux matériaux. A notre avis, il est primordial de passer par une phase d'étude et d'analyse des différentes propriétés de manière à explorer toutes les possibilités offertes par ces structures et d'en dégager les principaux avantages. Montrer la supériorité des dispositifs à BIPs par rapport aux dispositifs classiques dont les performances s'accroissent régulièrement tant en hyperfréquences qu'en optique, reste d'actualité dans beaucoup de domaines applicatifs. Au delà des fonctionnalités originales que pourraient amener les BIPs, plusieurs points fondamentaux nous semblent encore devoir être approfondis :

- le premier point est une estimation précise des performances de ces dispositifs en termes de pertes notamment dans le cas des guides d'onde dans une approche cristal 2D.
- dans le cas des dispositifs accordables, le stade des réalisations doit pouvoir appuyer l'analyse théorique déjà effectuée et fournir une idée plus précise des spécificités obtenues.
- Dans le cas des antennes, une exploration des possibilités, assujetties à l'ingénierie de bandes interdites, au même titre que l'exemple du réflecteur parabolique, doit être poursuivie.
- enfin, l'utilisation des cristaux photoniques en optique pour la réalisation de guide d'onde à géométrie quelconque doit pouvoir être justifiable de façon systématique.

Ce domaine de recherche relativement nouveau offre encore, malgré tout, un aspect exploratoire bien qu'une approche au stade des applications soit déjà entamée. Les différents travaux réalisés dans le cadre de cette thèse nous permettent de proposer des solutions à ces voies d'exploration futures.

Signalons que les sujets abordés ici ne sont pas limitatifs et que dans le cadre de collaborations avec l'université de Pampelune, les aspects de filtrage harmonique par usinage double face de substrats métallo-diélectriques sont en cours de développement dans l'équipe avec des premiers résultats en termes de compacité et robustesse tout à fait encourageants.

En ce qui concerne l'accordabilité des réseaux BIPs métalliques, il est nécessaire de regarder en détails ce que peuvent apporter les deux méthodes basées sur la modulation de capacité ou de conductance et également de déterminer selon le dispositif envisagé le nombre de composants minimal à intégrer pour obtenir de bonnes propriétés. Ceci passe par la réalisation de prototypes et par leur caractérisation expérimentale. Les technologies à mettre en place pourront s'inspirer soit du domaine des microtechnologies (MEMS) avec les procédés de résine épaisse (SU8,...) qui pourraient remplir les fonctions de matrice des motifs métalliques, soit de la technologie multi-niveaux utilisée en microélectronique qui permet par des étapes intermédiaires de planarisation (BCB,...) de superposer plusieurs substrats. D'un autre côté, il nous semblerait intéressant de regarder également les possibilités d'utilisation de matériaux intrinsèquement anisotropes ou présentant des propriétés optiques non-linéaires pour la réalisation de cristaux photoniques. D'un point de vue théorique, il sera nécessaire, pour étudier ces structures accordables, de mettre en place des moyens d'analyse dynamique pour prendre en compte les phénomènes non-linéaires qui en découleront. Ceci devra peut-être passer par un couplage de simulations purement physiques et électromagnétiques.

L'application des concepts de cristaux photoniques aux problèmes d'antennes semble être une des voies la plus prometteuse aujourd'hui. L'amélioration que ces matériaux apportent aux dispositifs rayonnants est en effet sans conteste et déjà exploitée dans de nombreux domaines. L'ensemble des possibilités offertes par la structuration dans plusieurs dimensions de l'espace, avec les notions associées de sélectivité angulaire, de cavités couplées, est encore loin d'avoir été totalement explorées. Le concept d'ingénierie de bandes interdites, topologie et/ou matériau, doit être systématiquement étudié pour le degré important de flexibilité qu'il apporte en termes de conceptions. Les notions d'accordabilité pourront également être appliquées à ce domaine pour la réalisation d'antennes "intelligentes".

Les actions menées par les différents partenaires dans le cadre du projet CRIPOINT devraient permettre de montrer la faisabilité d'une intégration de filtres directifs et sélectifs en longueur d'onde pour des applications optiques en technologie WDM. Beaucoup reste à faire néanmoins, si l'on se fie aux spécifications préliminaires indiquées par les partenaires industriels : démonstration expérimentale du couplage à base de modes de galerie, estimations des pertes, définitions de topologies plus adaptées,....

Références bibliographiques (Chapitre I)

- [1] C. M. Soukoulis, « Photonic Band Gap Materials », Kluwer Academic Publishers (1996).
- [2] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, “Photonic Crystals: Molding the flow of light”, Princeton University Press, 1995.
- [3] L. Brillouin et M. Parodi, "Propagation des ondes dans les milieux périodiques", Paris, Masson, 1956.
- [4] C. Kittel, "Introduction to solid state physics", Willey, 1953.
- [5] W. Streifer, D. R. Scifres and A. D. Burnham, "Coupled wave analysis of DFB and DBR lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-13, No. 4, pt. 2, pp. 134-41, 1977.
- [6] J. M. Hammer, R. A. Bartolini, A. Miller and C. C. Neil, "Optical grating coupling between low-index fibers and high-index film waveguides", Applied Physics Letters, Vol. 28, No. 4, pp.192-4, 1976.
- [7] D. L. Jaggard and C. Elachi, "Floquet and coupled-waves analysis of higher-order Bragg coupling in a periodic medium", Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, No. 7, pp. 674-82, 1976.
- [8] T. K. Wu, "Frequency Selective Surface and Grid Array", TRW Electronic Systems and Technology Division, Hardcover, 1995.
- [9] A. A. Oliner, "Periodic structures and photonic band gap terminology: historical perspectives", 29th European Microwave Conference 99, London, UK, Vol. 3, pp. 295-8, 1999.
- [10] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", Physical Review Letters, Vol. 58, No. 20, pp. 2059-62, 1987.
- [11] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung, "Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms", Physical Review Letters, Vol. 67, No. 17, pp. 2295-8, 1991.
- [12] J. B. Pendry, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", Physical Review Letters, Vol. 78, No. 21, pp. 4135-36, 1996.
- [13] J. B. Pendry, "Calculating photonic band structure", Journal of Physics : Condensed Matter, Vol. 8, No. 9, pp.1085-108, 1996.
- [14] A. J. Ward and J. B. Pendry, "Refraction and geometry in Maxwell's equations", Journal of Modern Optics, Vol. 43, No. 4, pp. 773-93, 1996.

- [15] J. P. Albert, C. Jouanin, D. Cassagne and D. Bertho, "Generalized Wannier function method for photonic crystals", *Physical Review B (Condensed Matter)*, Vol. 61, No. 7, pp. 4381-4, 2000.
- [16] J. B. Johns and R. L. Beurle, "Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission matrix", *proceedings IEE*, Vol. 118, No. 19, pp. 1203-08, 1971.
- [17] O. Jacquin, "Etude des structures à bandes interdites photoniques unidimensionnelles", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 2000.
- [18] W. Yu, S. Dey and R. Mittra, "On the modeling of periodic structures using the finite difference time domain algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 24, No. 3, pp. 151-5, 2000.
- [19] R. Remski, "Analysis of photonic bandgap surfaces using ansoft HFSS", *Microwave Journal, Euro Global Edition*, Vol. 43, No. 9, pp. 190-98, 2000.
- [20] F. Gadot, "Modélisation et caractérisation expérimentale de matériaux à bandes interdites photoniques (BIP) en Micro-ondes", Thèse de doctorat, Université de Paris-sud, U.F.R. d'orsay, 14 janvier 1998.
- [21] M. Defos du Rau, F. Pessan, G. Ruffie, V. Vigneras-Lefebvre and J.-P. Parneix, "Scattering and coupling effects of electromagnetic waves in 3D networks of spheres" *European Physical Journal, Applied Physics*, Vol. 1, No. 1, pp. 45-52, 1998.
- [22] G. Poilasne, "Antennes et matériaux à bandes interdites photoniques", Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 5 juillet 1999.
- [23] M. Tokushima, H. Kosaka, A. Tomita and H. Yamada, "Lightwave propagation through a 120 degrees sharply bent single defect photonic crystal", *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 8, pp. 952-54, 2000.
- [24] D. Coquillat, A. Ribayrol, R. M. de la Rue, P. Girard, O. Briot, R. L. Aulombard, D. Cassagne and C. Jouanin, "Photoluminescence characterisation of triangular lattices of holes and pillars etched in GaN epilayers", *Physica status solidi B*, Vol. 216, No. 1, pp. 669-73, 1999.
- [25] D. Labilloy, "Cristaux photoniques bidimensionnels pour le proche infrarouge : propriétés optiques et confinement", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 20 janvier 1999.
- [26] J. G. Maloney, M. P. Kesler, B. L. Shirley and G. S. Smith, "A simple description for waveguiding in photonic bandgap materials", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 14, No. 5, pp. 261-6, 1997.
- [27] B. Temelkuran and E. Ozbay, "Experimental demonstration of photonic crystal based waveguides", *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 4, pp. 486-88, 1999.
- [28] J. Danglot, O. Vanbésien and D. Lippens, "Active waveguides patterned in mixed 2D-3D metallic photonic crystal", *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 6, pp. 475-7, 1999.

- [29] Y. R. Fei, M. P. Kuang, Q. Yongxi, T. Itoh, "A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic bandgap (UC-PBG) structure", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques", Vol. 47, No. 11, pp. 2092-98, 1999.
- [30] C. A. Kyriazidou, H. F. Contopanagos and N. G. Alexopoulos, "Monolithic waveguide filters using printed photonic bandgap materials", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No. 2, pp. 297-307, 2001.
- [31] T. H. Liu, W. X. Zhang, M. Zhang and K. F. Tsang, "A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 1, pp. 13-15, 2000.
- [32] T. Lopetegi, M. A. G. Laso, M. Irisarri, M. J. Erro, F. Falcone and M. Sorolla, "Optimization of compact photonic bandgap microstrip structures", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 26, No. 4, pp. 211-16, 2000.
- [33] I. Rumsey, M. M. Piket and P. K. Kelly, "Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8, No. 10, pp. 336-8, 1998.
- [34] V. Radisic, Y. Qian and T. Itoh, "Broad-band power amplifier using dielectric photonic bandgap structure", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8, No. 1, pp. 13-14, 1998.
- [35] I. Huynen, G. Goglio, D. Vanhoenacker and A. Vander Vorst, "A novel nanostructured microstrip device for tunable stopband filtering applications at microwaves", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 9, No. 10, pp. 401-3, 1999.
- [36] Y. Y. Tae and C. Kai, "An electronically tunable photonic bandgap resonator controlled by piezoelectric transducer", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, USA, Vol. 3, pp. 1445-47, 2000.
- [37] Y. Y. Tae and C. Kai, "One dimensional photonic bandgap resonators and varactor tuned resonators", ", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, USA, Vol. 4, pp. 1629-32, 1999.
- [38] M. Thévenot, A. Reineix and B. Jecko, "A dielectric photonic parabolic reflector", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 21, No. 6, pp.411-14, 1999.
- [39] M. Thévenot, M. S. Denis, A. Reineix and B. Jecko, "Design of a new photonic cover to increase antenna directivity", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 22, No. 2, pp. 136-39, 1999.
- [40] D. Sievenpiper, R. Broas and E. Yablonovitch, "Antennas on high-impedance ground planes", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Piscataway, NJ, USA, Vol. 3, pp. 1245-48, 1999.
- [41] R. Coccioli, Y. R. Fei, M. P. Kuang and T. Itoh, "Aperture coupled patch antenna on UC-PBG substrate", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2123-30, 1999.

- [42] R. Gonzalo, B. Martinez, P. de Maagt and M. Sorolla, "Improved patch antenna performance by using bandgap substrates", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 24, No. 4, pp.213-15, 2000.
- [43] T. H. Liu, W. X. Zhang, M. Zhang and K. F. Tsang, "Low profile spiral antenna with PBG substrate", *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 9, pp. 2779-80, 2000.
- [44] G. Poilasne, P. Pouliguen, C. Terret, "Active Metallic Photonic Band-Gap Materials (MPBG): Experimental Results on Beam Shaper », *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 48, No. 1, p. 117, January 2000.
- [45] A. de Lustrac, F. Gadot, E. Akmansoy, "Experimental demonstration of electrically controllable photonic crystals at centimeter wavelengths », *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 11, p. 1625, September 1999.
- [46] I. El Kady, M. M. Sigalas, R. Biswas and K. M. Ho, « Dielectric waveguides in two-dimensional photonic bandgap materials », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2042-49, 1999.
- [47] E. Chow, S. Y. Lin, S. G. Johnson, P. B. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, J. R. Wendt, G. A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou and A. Alleman, « Three dimensional control of light in a two dimensional photonic crystal slab" » *Nature*, Vol. 407, No. 6807, pp. 983-6, 2000.
- [48] M. Loncar, T. Doll, J. Vuckovic and A. Scherer, « Design fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 10, pp. 1402-11, 2000.
- [49] P. Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J. L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Cassagne and C. Jouanin, « Triangular and hexagonal high Q-factor 2-D photonic bandgap cavities on III-V suspended membranes », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2058-62, 1999.
- [50] L. Y. Shawn, E. Chow, V. Hietala, P. R. Villeneuve an J. D. Joannopoulos, « Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal », *Science*, Vol. 282, No. 5387, pp. 274-6, 1998.
- [51] M. Tokushima, H. Kosaka, A. Tomita an H. Yamada, « Lightwave propagation through a 120 degrees sharply bend single-line defect photonic crystal waveguide », *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 8, pp. 952-4, 2000.
- [52] M. M. Sigalas, R. Biswas an S. Lin, « Waveguide Bends in Three-Dimensional Layer-by-Layer Photonic Bandgap Materials », *Microwave and optical technology letters*, Vol. 23, No. 1, p. 56, 1999.
- [53] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou an A. Bjarklev, « Photonic crystal fibers : a new class of optical waveguides », *Optical Fiber Technology : Materials, Devices an Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 305-30, 1999.
- [54] J. C. Knight, T. A. Birks, P. StJ. Russell an D. M. Atkin, « All silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding », *Optics Letters*, Vol. 21, No. 19, pp. 1547-49, 1996.

- [55] F. Brechet, P. Roy, J. Marcou and D. Pagnoux, « Single-mode propagation into depressed core index photonic bandgap fibre designed for zero-dispersion propagation at short wavelengths », *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 6, pp. 514-15, 2000.
- [56] B. J. Eggleton, G. Lenz, N. M. Litchinister, « Optical pulse compression schemes that use nonlinear Bragg gratings », *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 19, No. 4, pp. 383-421, 2000.
- [57] R. W. Ziolkowski and T. Liang, « Design and characterization of a grating-assisted coupler enhanced by a photonic-band-gap structure for effective wavelength-division demultiplexing », *Optics letters*, Vol. 22, No. 13, p. 1033, 1997.
- [58] S. Noda, A. Chutinan and M. Imada, « Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure », *Nature*, Vol. 407, No. 6804, pp. 608-10, 2000.
- [59] T. Sondergaard, J. Broeng, A. Bjarklev, K. Dridi and S. E. Barkou, « Suppression of spontaneous emission for a two-dimensional honeycomb photonic bandgap structure estimated using a new effective index model », *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 34, No. 12, pp. 2308-13, 1998.
- [60] R. K. Lee, X. Yong and A. Yariv, « Modified spontaneous emission from a two-dimensional photonic bandgap crystal slab », *Journal of the Optical Society of America B (optical Physics)*, Vol. 17, No. 8, pp. 1438-42, 2000.
- [61] Gaponenko-SV; Bogomolov-VN; Petrov-EP; Kapitonov-AM; Eychmueller-AA; Rogach-AL; Kalosha-II; Gindele-F; Woggon-U, « Spontaneous emission of organic molecules and semiconductor nanocrystals in a photonic crystal », *Journal-of-Luminescence*, Vol.87-89, pp. 152-6, 2000.
- [62] S. V. Gaponenko, V. N. Bogomolov, E. P. Petrov, A. M. Kapitonov, D. A. Yarotsky, I. I. Kalosha, A. A. Rogach, J. McGilp, U. Woggon and F. Gindele, « Spontaneous emission of dye molecules, semiconductor nanocrystals, and rare-earth ions in opal-based photonic crystals », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2128-37, 1999.
- [63] S. Fan, P. R. Villeneuve and Joannopoulos, « Rate-equation analysis of output efficiency and modulation rate of photonic-crystal light-emitting diodes », Vol. 36, No. 10, pp. 1123-30, 2000.
- [64] M. Boroditsky, T. F. Krauss and E. Yablonovitch, « Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals », *Applied physics letters*, Vol. 75, No. 8, p. 1036, 1999.
- [65] A. A. Erchak, D. J. Ripin and L. A. Kolodziejski, « Enhanced coupling to vertical radiation using a two-dimensional photonic crystal in a semiconductor light-emitting », *Applied physics letters*, Vol. 78, No. 5, p. 563, 2001.
- [66] H. Hirayama, T. Hamano and Y. Aoyagi, « Novel surface emitting laser diode using photonic bandgap crystal cavity », *Applied Physics Letters*, Vol. 69, No. 6, pp. 791-3, 1996.
- [67] O. J. Painter, A. Husain, A. Scherer, J. D. O'Brien, I. Kim and P. D. Dapkus, « room temperature photonic crystal defect lasers at near-infrared wavelengths in InGaAsP », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2082-88, 1999.

- [68] T. D. Happ, M. Kamp, F. Klopff, J. P. Reithmaier and A. Forchel, « Bent laser cavity based on 2D photonic crystal waveguide », *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 4, pp. 324-5, 2000.
- [69] W. D. Zhou, J. Sabarinathan, B. Kochman, E. Berg, O. Qasaimeh, S. Pang and P. Bhattacharya, « Electrically injected single-defect photonic bandgap surface emitting laser at room temperature » Vol. 36, No. 18, pp. 1541-2, 2000.
- [70] R. Gonzalo, « Study of photonic crystal structures an their application in the field of antennas », Thèse de doctorat, Université de Pampelune (Espagne), mai 2000.
- [71] J. G. Fleming and Y. L. Shawn, "Three-dimensional photonic crystal with a stop band from 1.35 to 1.95 μm ", *Optics Letters*, Vol. 24, No. 1, pp. 49-51, 1999.
- [72] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto and A. Chutinan, "Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths", *Science*, Vol. 289, No. 5479, pp. 604-606, 2000.
- [73] S. G. Romanov, R. M. De La Rue, H. M. Yates and M. E. Pemble, "Impact of GaP layer deposition upon photonic bandgap behavior of opal", *Journal of Physics : Condensed Matter*, Vol. 12, No. 3, pp. 339-48, 2000.
- [74] X. Younan, B. Gates and H. P. Sang, "Fabrication of three-dimensional photonic crystals for use in spectral region from ultraviolet to near infrared", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 1956-62, 1999.
- [75] H. Miguez, A. Blanco, C. Meseguer, H. M. Yates, M. E. Pemble, F. T. Lopez, F. J. V. Garcia and J. D. Sanchez, "Face centered cubic photonic bandgap materials based on opal-semiconducteur composites", *Journal of Ligthwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 1975-81, 1999.
- [76] S. John and K. Busch, "Photonic bandgap formation and tunability in certain self-organazing systems", *Journal of Ligthwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 1931-43, 1999.
- [77] Y. Fink, A. M. Urbas, M. G. Bawendi, J. D. Joannopoulos and E. L. Thomas, "Block copolymers as photonic bandgap materials", *Journal of Ligthwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 1963-69, 1999.
- [78] M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison, R. G. Denning and A. J. Turberfield, "Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography", *Nature*, Vol. 404, No. 6773, pp. 53-6, 2000.
- [79] S. Rowson, A. Chelnokov and J.-M. Lourtioz, "Macroporous silicon photonic crystals at 1.55 micrometer", *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 9, p. 753, 1999.
- [80] A. Chelnokov, K. Wang and J.-M. Lourtioz, "Near-infrared Yablonovite-like photonic crystals by focused-ion-beam etching of macroporous silicon", *Applied physics letters*, Vol. 77, No. 19, p. 2943, 2000.

Références bibliographiques (Chapitre II)

- [1] I. El-Kady, M. M. Sigalas, R. Biswas, K. M. Ho and C. M. Soukoulis, "Metallic photonic crystals at optical wavelengths", *Physical Review B*, Vol. 62, No. 23, pp. 15299-15302, December 2000.
- [2] F. Falcone, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, M. J. Erro and M. Sorolla, « Compact Photonic Bandgap Microstrip Structure », *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 23, No. 4, pp. 233-236, November 1999.
- [3] V. Radisic, Y. Qian and T. Itoh, « Broad-Band Power Amplifier Using Dielectric Photonic Bandgap Structure », *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-15, January 1998.
- [4] I. Rumsey, M. Piket-May and P. Keith Kelly, « Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits », *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 8, No. 10, pp. 336-338, October 1998.
- [5] A. Tahsin, M. A. G. Laso, T. Lopetegi, O. Vanbésien, M. Sorolla and D. Lippens, "PBG-type microstrip filters with one and two side patterns", à paraître dans *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000.
- [6] B. Temelkuran and E. Ozbay, "Experimental demonstration of photonic crystal based waveguides", *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 4, pp. 486-488, January 1999.
- [7] S. S. Oh, C.-S. Kee, J.-E. Kim and H. Y. Park, "Duplexer using microwave photonic band gap structure", *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 16, pp. 2301-2303, April 2000.
- [8] J. Carbonell, O. Vanbesien and D. Lippens, "Electric field patterns in finite two dimensional wire photonic lattices", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 22, No. 4, pp. 597-605, 1997.
- [9] J. B. Pendry, "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures", *Physical Review Letters*, Vol. 76, No. 25, pp. 4773-4776, June 1996.
- [10] O. Vanbésien, J. Danglot, J. Carbonell, M. Fernandez et D. Lippens, "Matériaux à gap de photons", 5^{èmes} journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Le Touquet, France, Mai 1998.
- [11] F. Gadot, E. Akmansoy, A. de Lustrac, T. Brillat, A. Ammouche and J.-M. Lourtioz, "High-transmission defect modes in two-dimensionnal metallic photonic crystals", *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 12, pp. 8499, June 1999.
- [12] A. Mekis, S. Fan and J. D. Joannopoulos, "Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends", *Physical Review B*, Vol. 58, No. 8, pp. 4809-4817, August 1998.

- [13] L. Burgnies, O. Vanbésien and D. Lippens, "An analysis of wave patterns in multiport quantum waveguide structures", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 32, pp. 706-712, 1999.
- [14] J. Danglot, J. Carbonell, M. Fernandez, O. Vanbésien and D. Lippens, "Modal analysis of guiding structures patterned in a metallic photonic crystal », *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 19, pp. 2712-2714, November 1998.
- [15] H. Chiou, C. Chang and H. Lin, « A Novel Coplanar Waveguide Series Stub Matching Structure for a Broadband Amplifier », *Microwave and optical technology letters*, Vol. 10, No. 15, p. 307, december 1995.
- [16] J. Wang, H. Guo and R. Harris, « Electron waveguide coupler : a four terminal device », *Applied Physics Letters*, Vol. 59, No. 24, pp. 3075-3077, 1991.
- [17] R. E. Collins, « Foundations for microwave engineering », McGraw-Hill international edition, pp. 413-435, 1992.
- [18] L. Burgnies, "Mécanismes de conduction en régime ballistique dans les dispositifs électroniques quantiques", Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 5 décembre 1997.
- [19] O. Vanbésien and D. Lippens, « Directional coupling in dual-branch electron-waveguide junctions », *Physical Review B*, Vol. 52, No. 7, pp. 5144-5153, August 1995.
- [20] J. Danglot, O. Vanbésien and D. Lippens, « A 4-port resonant switch patterned in a photonic crystal », *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 9, No. 7, pp. 274-276, July 1999.

Références bibliographiques (Chapitre III)

- [1] Dario P., Carrozza M. C., D'Attanasio S., "A Mobile Microrobot Actuated by a New Electromagnetic Wobble Micromotor", IEEE ASME transactions on mechatronics, Vol. 3, No. 1, p. 9, March 1998.
- [2] Lang W., Pavlicek H., Schmidt B., "Electrostatically actuated micromirror devices in silicon technology", Sensors and actuators part a, physical, Vol. 74, No. 1/3, p. 216, April 1999.
- [3] Chou Y.-F, Deng K.-L., Wang J., "Wavelength-tunable passive mode locking of dye lasers by use of the intracavity optical Kerr effect", Optics Letters, Vol. 18, No. 15, p. 1247, August 1993.
- [4] Masterson H. J., Sharp G. D., Johnson K. M., "Ferroelectric liquid-crystal tunable filter", Optics Letters, Vol. 14, No. 22, p. 1249, November 1989.
- [5]) Busch K., John S., "Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum", Physical Review Letters, Vol. 83, No. 5, p. 967, August 1999.
- [6] A. Figotin, Y. A. Godin and I. Vitebsky, "two-dimensional tunable photonic crystals", Physical Review B, Vol. 57, No. 5, pp. 2841-2848, February 1998.
- [7] D. F. Sievenpiper, E. Yablonovitch, J. D. Joannopoulos, "3D metallo-dielectric photonic crystals with strong capacitive coupling between metallic islands", Physical Review Letters, Vol. 80, No. 13, p. 2829, March 1998.
- [8] G. Poilasne, P. Pouliguen, K. Mahdjoubi, A.-P. Derennes, P. Gélin and L. Desclos, "Matériau à bande interdite photonique métallique (BIPM) en technologie imprimée pour les fréquences millimétriques", 11^{ème} Journées Nationales Microondes, Arcachon, 5-7 Mai 1999.
- [9] R. H. Ott, R. G. Kouyoumjian and L. Peters, "Scattering by a two-dimension periodic array of narrow plates", Radio Science, Vol. 2, pp. 1347-1359.
- [10] S. W. Lee, G. Zarillo and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates", IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. AP-30, pp. 904-909, 1982.
- [11] J. M. Lourtioz, A. de Lustrac, F. Gadot, S. Rowson, A. Chelnokov, T. Brillat, A. Ammouche, J. Danglot, O. Vanbésien and D. Lippens, "Toward controllable photonic crystals for centimeter- and millimeter-wave devices", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 11, pp. 2025-2031, November 1999.
- [12] E. Lheurette, "Fabrication de composants non linéaires à hétérostructures pour les longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 9 décembre 1996.

- [13] X. Melique, A. Maestrini and D. Lippens, "Record performance of a 250GHz InP-based heterostructure barrier varactor tripler », *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 11, p. 938, May 1999.
- [14] V. Duez, X. Melique and D. Lippens, "High capacitance ratio with GaAs/InGaAs/AlAs heterostructure quantum well-barrier varactors », *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 19, p. 1860, September 1998.
- [15] B. Lenoir, D. Baillargeat, S. Verdeyme and P. Guillon, " Waveguide application of periodic structures", 29th European Microwave Conference, Munich, Germany, October 1999.
- [16] G. Poilasne, P. Pouliguen, C. Terret, "Active Metallic Photonic Band-Gap Materials (MPBG): Experimental Results on Beam Shaper », *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 48, No. 1, p. 117, January 2000.
- [17] A. de Lustrac, F. Gadot, E. Akmansoy, "Experimental demonstration of electrically controllable photonic crystals at centimeter wavelengths », *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 11, p. 1625, September 1999.
- [18] A. de Lustrac, F. Gadot, E. Akmansoy, "Experimental demonstration of electrically controllable photonic crystals at centimeter wavelengths », *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 11, p. 1625, September 1999.
- [19] J. Danglot, O. Vanbésien et D. Lippens, "Matériaux à gap de photons reconfigurables", 6^{èmes} Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Paris, 22-24 Mars 2000.
- [20] J. Danglot, O. Vanbésien and D. Lippens, " Active waveguides patterned in mixed 2D-3D metallic photonic crystal", *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 6, pp. 475-477, March 1999.
- [21] J. Danglot, O. Vanbésien and D. Lippens, " A smart K-band 4-port resonant switch based on photonic band gap engineering", 29th European Microwave Conference, Munich, Germany, October 1999.

Références bibliographiques (Chapitre IV)

- [1] C. M. Soukoulis, « Photonic Band Gap Materials », Kluwer Academic Publishers (1996).
- [2] E. R. Brown and O. B. McMahon, « High zenithal directivity from a dipole antenna on a photonic crystal », Applied Physics Letters, Vol. 68, No. 9, pp. 1300-02, February 1996.
- [3] S. D. Cheng, R. Biswas and K.-M. Ho, « Optimized dipole antennas on photonic band gap crystals », Applied Physics Letters, Vol. 67, No. 23, p. 3399, December 1995.
- [4] Sehm T., Lehto A. and Räsänen A.V., « A High-Gain 58-GHz Box-Horn Array Antenna with Suppressed Grating Lobes », IEEE transactions on antennas and propagation, Vol. 47, No. 7, p.1125, July 1999.
- [5] Y. P. Zhang, C. W. Y. Ang, C. S. C. Lee and M. A. Do, « Bandwidth enhancement of a patch antenna of very high-permittivity material », Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 28, No. 2, pp. 98-99, January 2001.
- [6] R. Gonzalo, P. de Maagt and M. Sorolla, « Enhanced Patch-Antenna Performance by Suppressing Surface Waves Using Photonic-Bandgap Substrates », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, p. 2131, November 1999.
- [7] D. Sievenpiper, Lijun-Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopoulos, E. Yablonovitch, « High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band », IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2059-74, November 1999.
- [8] R. Coccioli, Y. Fei Ran, M. Kuang Ping, T. Itoh, « Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2123-30, November 1999.
- [9] J. Carbonell, « Electromagnetic analysis of active and passive devices for space applications », Thèse de Doctorat mention européenne, Université des Sciences et Technologies de Lille, 8 juin 1998.
- [10] G. Poilasne, J. Lenormand, P. Pouliguen, K. Mahdjoubi, C. Terret and Ph. Gellin, « Theoretical study of interactions between antennas and metallic photonic bandgap materials », Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 15, No. 6, pp. 384-389, August 1997.
- [11] M. Thévenot, "Analyse comportementale et conception des matériaux diélectriques à bandes interdites photoniques. Application à l'étude et à la conception de nouveaux types d'antennes", Thèse de doctorat, Université de Limoges, 18 Novembre 1999.
- [12] M. Thévenot, A. Reineix, B. Jecko, « A dielectric photonic parabolic reflector », Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 21, No. 6, pp. 411-14, June 1999.

- [13] M. P. Kesler, J. G. Maloney, B. L. Shirley and G. S. Smith, "Antenna design with the use of photonic band-gap materials as all-dielectric planar reflectors", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 11, No. 4, pp. 169-174, March 1996.
- [14] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, "Photonic Crystals: Molding the flow of light", Princeton University Press, 1995.
- [15] M. Thévenot, C. Cheype, A. Reineix and B. Jecko, "Directive photonic-bandgap antennas", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No. 11, pp. 2115-21, 1999.
- [16] D. Lippens, T. Akalin, J. Danglot, O. Vanbésien, "Highly directive antennas from n-D PBG Microcavities", 24th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas, 30 May-1 June 2001.
- [17] G. P. Schwartz, G. J. Gualtieri and W. A. Sunder, « Raman characterization of single defect layers embedded in finite superlattices », *Applied Physics Letters*, Vol. 58, No. 9, p. 971, March 1991.

Références bibliographiques (Chapitre V)

- [1] J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, B. E. Little, R. A. Wilson and P.-T. Ho, "Higher order filter response in coupled microring resonators", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 3, pp. 320-22, 2000.
- [2] P. Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J. L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Cassagne and C. Jouanin, « Triangular and hexagonal high Q-factor 2-D photonic bandgap cavities on III-V suspended membranes », Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 11, pp. 2058-62, 1999.
- [3] M. Tokushima, H. Kosaka, A. Tomita and H. Yamada, « Lightwave propagation through a 120 degrees sharply bend single-line defect photonic crystal waveguide », Applied Physics Letters, Vol. 76, No. 8, pp. 952-4, 2000.
- [4] D. Labilloy, H. Benisty and C. Weisbuch, « Use of guided spontaneous emission of a semiconductor to probe the optical properties of two-dimensional photonic crystals », Applied Physics Letters, Vol. 71, No. 6, pp. 738-40, 1997.
- [5] C. Sion, « Etude de la sensibilité à la température de structures laser alumino-phosphorées à multi-puits quantiques sur substrat InP », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 15 janvier 1999.
- [6] D. Labilloy, "Cristaux photoniques bidimensionnels pour le proche infrarouge : propriétés optiques et confinement", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 20 janvier 1999.
- [7] U. Niggebrugge, M. Klug and G. Garus, « A novel process for reactive ion etching on InP, using CH₄/H₂ », Gallium Arsenide and Related Compounds, Proceedings of the twelfth International Symposium, Bristol, UK, 1986, pp. 367-72.
- [8] T. Sondergaard, A. Bjarklev, M. Kristensen, J. Erland and J. Broeng, « Designing finite-height two-dimensional photonic crystal waveguides », Applied Physics Letters, Vol. 77, No. 6, pp. 785-7, 2000.
- [9] J. B. Pendry, « photonic band structures », Journal of Modern Optics, Vol. 41, No. 2, pp. 209-29, 1994.
- [10] C. J. M. Smith, R. M. De La Rue, M. Rattier, S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch, T. F. Krauss, R. Houdre and U. Oesterle, « Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal », Applied Physics Letters, Vol. 78, No. 11, pp. 1487-9, 2001.
- [11] N. K. Das and D. M. Pozar, « Full-wave spectral-domain computation of material, radiation, and guided wave losses in infinite multilayered printed transmission lines », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 39, No. 1, pp. 54-63, 1991.

- [12] H. Benisty, D. Labilloy, C. Weisbuch, C. J. M. Smith, T. F. Krauss, D. Cassagne, A. Beraud and C. Jouanin, « Radiation losses of waveguide-based two-dimensional photonic crystals: Positive role of the substrate », *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 5, pp. 532-4, 2000.
- [13] X. Yong, R. K. Lee and A. Yariv, “Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides and waveguides with discrete translational symmetry”, *Optics Letters*, Vol. 25, No. 10, pp. 755-7, 2000.
- [14] S. Y. Lin, E. Chow, S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, “Demonstration of highly efficient waveguiding in a photonic crystal slab at 1.5 μm wavelength”, *Optics Letters*, Vol. 25, No. 17, pp. 1297-99, 2000.
- [15] J. W. S. Rayleigh, “The theory of sound », New York : Dover Publications, 1945.
- [16] B. Guillon, “Conception et réalisation de circuits millimétriques micro-usinés sur silicium : application à la réalisation d’un oscillateur à résonateur diélectrique en bande Ka”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 9 novembre 1999.
- [17] P. Pottier, C. Seassal, X. Letartre, J. L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Cassagne and C. Jouanin, « Triangular and hexagonal high Q-factor 2-D photonic bandgap cavities on III-V suspended membranes », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2058-62, 1999.
- [18] X. H. Jiao, P. Guillon and J. Obregon, “Theoretical analysis of the coupling between whispering-gallery dielectric resonator modes and transmission lines », *Electronics Letters*, Vol. 21, No. 3, pp. 88-9, 1985.
- [19] S. V. Boriskina and A. I. Nosich, “Numerical simulation of whispering gallery mode coupler in dielectric slab waveguide », *International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, IEEE, New York, USA, Vol. 2, pp. 810-12, 1998.
- [20] L. Burgnies, O. Vanbésien and D. Lippens, “An analysis of wave patterns in multiport quantum waveguide structures”, *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol. 32, pp. 706-12, 1999.
- [21] S. Fan, R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos and H. A. Hauss, “Channel drop tunneling through localized states”, *Physical Review Letters*, Vol. 80, No. 5, pp. 960-3, 1998.
- [22] L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, J. O. Vasseur and J. Zemmouri, “Resonant tunneling between two continua », *Physical Review B (Condensed Matter)*, Vol. 60, No. 15, pp. 10628-31, 1999.