

Composants optiques passifs pour la génération de codes CDMA optiques spectraux

Guillaume PILLE^{1 et 2}, Yves MOREAU¹, Jérôme GALY², Raphaël K. KRIBICH¹, Sylvain GATTI¹, Jihane JABBOUR¹

¹Groupe Photonique - Centre d'Électronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier - UMR CNRS 5507

Université Montpellier II - STL
Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

²Laboratoire d'Informatique Robotique et Micro-électronique de Montpellier - UMR CNRS 5506
161 Rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 5

pille@cem2.univ-montp2.fr

Résumé— L'optique intégrée offre une solution efficace à de nombreux problèmes de traitement des signaux optiques. Une technique innovante développée dans notre laboratoire permet la réalisation de circuits à démultiplexage optique en longueur d'onde par écriture laser. Outre l'application directe à l'accès multiple, le circuit WDM peut être utilisé comme codeur dans un système CDMA (accès multiple à répartition par codes) spectral. Nous présentons ici deux approches du codage par composants optiques.

Mots-clés— CDMA optique spectral, démultiplexage en longueur d'onde, coupleur en étoile, coupleur à interférences multimodes.

I. INTRODUCTION

Les réseaux de télécommunications sur fibre optique remplacent progressivement les réseaux traditionnels câblés pour le transport d'information international, national et bientôt local. L'avancée de ce type de communications où le «1» et le «0» numériques sont remplacés par la présence ou l'absence d'un faisceau lumineux s'explique par les performances inégales des fibres en termes de pertes, de sensibilité aux perturbations extérieures et de débit maximum. Toutefois, les limites actuelles des composants électroniques pour les télécommunications (multiplexage, brassage) ne permettent pas d'utiliser directement la bande passante offerte par la fibre optique.

Une technique consiste à découper cette bande passante en plusieurs canaux et de les multiplexer-démultiplexer en longueur d'onde à l'aide de composants tout optiques [1], multiplexer optiquement revenant à «mélanger» plusieurs signaux portés par des longueurs d'onde différentes. Ainsi il est possible de transporter sur un même médium, la fibre, et simultanément, plusieurs informations sur des longueurs d'ondes optiques distinctes.

Parmi les dispositifs de démultiplexage, nous nous proposons d'étudier des composants d'optique intégrée, qui présentent une bonne compatibilité avec les fibres optiques et qui peuvent déboucher sur une production de masse. Le Centre d'Électronique et de Micro-Optoélectronique et le Laboratoire Des Verres de l'université de Montpellier, en

partenariat avec la société Kloe, développent un procédé fondé sur la photo-polymérisation d'un matériau hybride organique-inorganique synthétisé par voie Sol-Gel [2]. L'insolation du matériau se fait par focalisation d'un laser qui «dessine» littéralement le circuit. Il est ainsi possible de réaliser des guides d'onde à section carrée avec une très bonne précision dans un temps réduit et à faible coût.

Deux types de composants destinés au démultiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) sont développés dans notre laboratoire : WDM à MMI (coupleur à interférences multimodes) et WDM à coupleurs en étoile. Dans le premier cas, les performances requises pour atteindre les normes d'un démultiplexeur commercialisable ne sont pas atteintes, pour des raisons de pertes et de diaphotie (équivalent en optique de la diaphonie audio, c'est la quantité de signal d'un canal optique qu'on retrouve sur un autre canal) trop importantes.

C'est une autre propriété des composants que l'on souhaite mettre à profit pour les utiliser comme codeurs et décodeurs spectraux dans un système CDMA optique (OCDMA pour Optical Code Division Multiple Access). Le CDMA «électrique» est le mode de communication utilisé, par exemple, dans la norme de téléphonie de troisième génération (UMTS). Son principe réside dans l'émission simultanée de codes orthogonaux, un code étant propre à un utilisateur, sur un médium commun et dans une même bande de fréquences. Les propriétés d'orthogonalité des codes vont permettre, en réception, d'extraire la donnée transmise identifiée par son code.

Plusieurs solutions de CDMA optique ont été proposées et notre projet original s'inscrit dans une approche par codage spectral, réalisé à l'aide de multiplexeurs à MMI [3]. Face à certaines limitations inhérentes au composant à MMI, nous présentons une alternative par l'utilisation détournée de WDM à coupleurs en étoile.

II. CIRCUITS DE DÉMULTIPLEXAGE OPTIQUE

Nous traitons dans cet article de composants d'optique intégrés passifs, c'est à dire de composants qui utilisent les

propriétés optiques de la lumière (diffraction, phénomène de modes guidés...) pour réaliser des fonctions complexes réalisées traditionnellement de manière électronique. Les composants étudiés mesurent quelques centimètres carrés en surface sur moins d'un millimètre d'épaisseur.

Un démultiplexeur optique se compose de trois parties : un coupleur d'entrée, un réseau de guides déphaseurs (PHASAR), et un coupleur de sortie symétrique du premier. Son rôle est de trier sur ses sorties les différentes longueurs d'onde porteuses d'information.

A. WDM à MMI

Le coupleur à interférences multimodes utilise les propriétés de compétition de modes guidés dans un guide large [4]. En effet, ce premier coupleur, représenté sur la Figure 1 dans un système à 8 entrées et 8 sorties (8x8) est en réalité un guide à section rectangulaire très large devant sa hauteur. Ainsi, plusieurs modes de propagation optiques sont possibles : on parle de zone multimode ou multimodale.

En lisant la Figure 1 de la gauche vers la droite, nous suivons le parcours de la lumière.

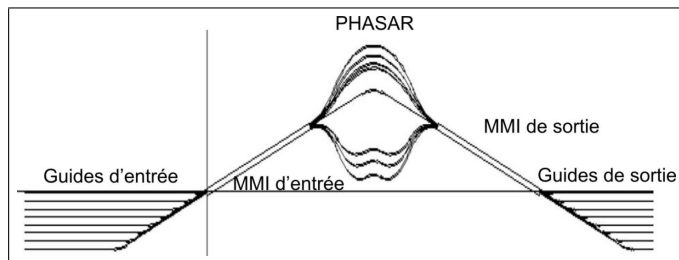


Fig. 1. Démultiplexeur en longueur d'onde à MMI 8x8 : circuit réalisé avec le logiciel jWDM développé au laboratoire.

Le guide d'entrée supérieur est éclairé par un faisceau polychromatique composé de 8 faisceaux monochromatiques véhiculant chacun une information. Le faisceau pénètre dans la première zone multimode, le MMI d'entrée. La propagation s'effectue tout d'abord par étalement de la lumière. Puis, à l'approche des bords du MMI, nous observons un système d'interférences résultant de la compétition entre les nombreux modes guidés. Cette compétition se traduit en un ensemble d'interférences constructives et destructives qui se propagent. Enfin, à une distance de l'entrée multiple de 2π , apparaît une série d'images de la source (phénomène de *self imaging*) : l'énergie totale se trouve divisée en un multiple entier d'images de l'entrée dont la phase s'exprime en $k\frac{\pi}{n}$. Nous cherchons, pour un composant possédant N entrées-sorties, la longueur correspondant à une division par N de notre faisceau d'entrée. Cette longueur est calculée pour la longueur d'onde centrale, par approximation elle reste valable pour les longueurs d'onde adjacentes.

Les n guides du PHASAR, de longueurs différentes, récoltent cette énergie focalisée et produisent un déphasage induisant une modification du plan de phase à l'entrée du second coupleur. Chaque longueur d'onde se propageant à une vitesse différente, le déphasage apporté par le PHASAR sera propre à une longueur d'onde : c'est la fonction discriminatrice en longueur d'onde.

Les faisceaux déphasés injectés dans le coupleur de sortie subissent les mêmes phénomènes interférentiels qu'en

entrée, qui produisent une unique focalisation sur un guide de sortie. On retrouve ainsi nos 8 faisceaux, multiplexés à l'entrée, distribués sur les 8 sorties du WDM.

La particularité qui nous intéresse est que cette distribution se fait dans une sorte de «désordre» apparent : si un faisceau de longueur d'onde λ_1 se retrouve focalisé sur la sortie 2 (la seconde en partant du haut), le faisceau de longueur d'onde adjacente λ_2 peut se retrouver focalisé sur la sortie 5, λ_3 sur la sortie 2, etc... Cet ordonnancement est déterminé de manière analytique, et réalise la fonction de codage présentée plus loin. De plus, un changement de l'entrée éclairée génère un ordonnancement différent en sortie.

B. WDM à coupleur en étoile

Si la fonction du démultiplexeur à coupleurs en étoile est identique à celle du composant précédent, les mécanismes exploités dans les coupleurs diffèrent et s'inspirent du spectromètre de Rowland dont on remplacerait le réseau de diffraction par un PHASAR [5]. Le coupleur en étoile est en fait un guide très large, dont les extrémités sont en arc de cercle (on parle de cercles de Rowland) de rayons R en sortie et $\frac{R}{2}$ en entrée déterminés analytiquement.

Le faisceau polychromatique est injecté dans un guide d'entrée, et pénètre dans le coupleur en étoile, assimilable à une zone de propagation libre. La lumière se diffuse dans le coupleur et rencontre son extrémité avant les parois latérales : le faisceau arrive en phase et est récolté par les n guides du PHASAR. Le plan de phase est modifié pour chaque longueur d'onde et permet la discrimination en sortie.

Les faisceaux déphasés arrivent dans le coupleur de sortie et se focalisent sur une sortie donnée. Chacun des faisceaux initialement présents en entrée se focalise sur une sortie différente.

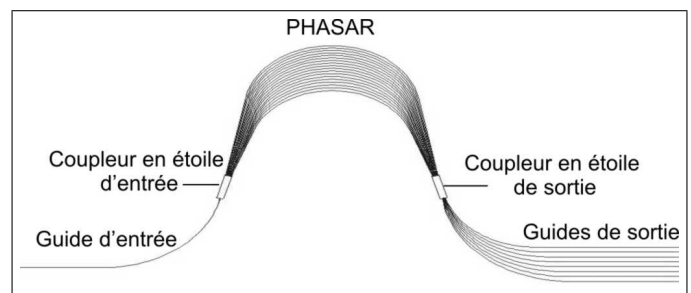


Fig. 2. Démultiplexeur à coupleurs en étoile.

Dans ce cas, si la longueur d'onde λ_1 se retrouve sur la sortie 1, la longueur d'onde adjacente λ_2 sera sur la sortie 2, λ_3 sur la sortie 3, etc... De plus, un changement de l'entrée illuminée provoque une permutation des focalisations en sortie : cette permutation va permettre, moyennant une réorganisation des guides de sortie, de réaliser la fonction de codage recherchée.

III. L'ACCÈS MULTIPLE PAR CODE (CDMA)

Le système d'accès multiple par code permet un partage des ressources réseau par un nombre maximal d'utilisateurs. Le CDMA consiste à remplacer une donnée par un code correspondant aux «0» et aux «1», ce qui va élargir sa bande de transmission. En lui ajoutant d'autres données

codées sur la même bande, le signal multiplexé ressemble à un bruit blanc gaussien, ce qui lui confère une propriété de confidentialité de transmission.

L'utilisation de codes orthogonaux, à intercorrélation nulle, nous permet de décoder le signal multiplexé reçu en le corrélant avec un des codes d'origine pour extraire la donnée utile. Le destinataire de la donnée ne possède qu'une clé de décodage, le reste du signal est considéré comme du bruit et rejeté. Les avantages d'une telle technique résident dans une implémentation asynchrone permettant une émission asynchrone des données dans une même bande de fréquences, sa résistance aux perturbations et donc le maintien d'une bonne qualité de service, la confidentialité apportée par le codage.

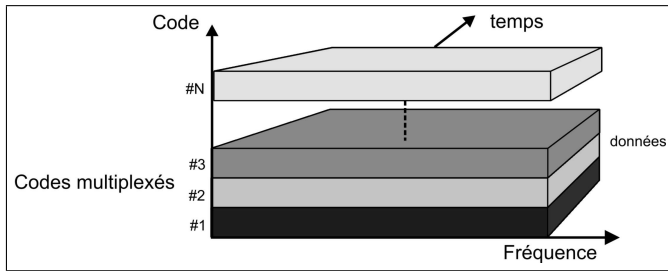


Fig. 3. Système CDMA temporel

Plusieurs techniques de CDMA Optique concurrentes existent [6], comme l'utilisation de codes temporels. Notre système, destiné à une réalisation à bas coût pour le réseau local, repose sur un codage spectral où chaque bit émis est remplacé par un spectre caractéristique, propre à l'émetteur.

IV. GÉNÉRATION DE SPECTRES OPTIQUES

Nous avons vu que dans un système classique WDM, un «1» numérique est représenté par la présence d'une longueur d'onde donnée et le «0» par son absence.

Dans notre cas, nous allons remplacer ces «1» et «0» par un spectre équivalent de plusieurs longueurs d'ondes, ces spectres étant complémentaires. Il est nécessaire qu'ils soient orthogonaux, ce qui peut s'interpréter simplement en considérant que d'un code à l'autre il faut que le nombre de similitudes soit égal au nombre de différences. Dans la suite de cet article, nous assimilerons la présence d'une longueur d'onde dans le spectre à un «1» et son absence à un «0».

A. Codeur à MMI

Pour générer des spectres complémentaires avec le WDM à MMI, on regroupe des sorties voisines par couplage optique, afin de faire «l'addition» des longueurs d'onde qui serviront au code : dans l'exemple de la figure 1 on regroupe les sorties 1 à 4 et 5 à 8. Une longueur d'onde ne peut pas se retrouver sur deux sorties différentes, on a bien réalisé des spectres complémentaires qu'on retrouve par simulation avec le logiciel jBPM développé au laboratoire.

Si nous illuminons la seconde entrée, nous changeons l'ordre de focalisation des longueurs d'onde en sortie : c'est le second couple de codes complémentaires. Chaque utilisateur possède une version du composant, illuminé par une unique entrée, qui génère le code personnel. A priori, il

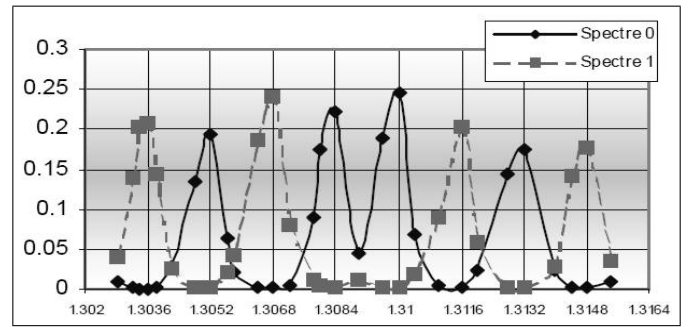


Fig. 4. WDM à MMI 8x8, simulation jBPM de spectre obtenu par regroupement des sorties adjacentes

existe autant de couple de codes qu'il y a d'entrées au composant, ce qui implique qu'un composant $N \times N$ permettra, selon l'entrée choisie, de générer N codes. Il reste toutefois à trouver les couples de codes qui sont orthogonaux.

En réception, un composant identique va extraire le message utile de l'ensemble des messages transmis. Ce composant va recueillir l'ensemble des messages sur l'entrée i (afin de retrouver un message codé par l'entrée i de l'émetteur) et réalise l'opération de corrélation nécessaire à l'extraction de l'information. En pratique, cela correspond à un maximum d'énergie pour les sorties regroupées correspondant au «0» ou «1», et un minimum d'énergie sur ces sorties si le code reçu n'est pas le i . De fait, une simple détection différentielle à l'aide de photo-diodes doit permettre de convertir les «0» et «1» convenablement, en laissant de côté les niveaux d'énergie trop faibles. Ce système permet une transmission asynchrone.

Il est maintenant intéressant d'étudier les capacités du composant en terme de nombre d'utilisateurs. Il faut pour cela déterminer le nombre de couples de codes spectraux orthogonaux possibles. Une étude semi-analytique permet de connaître la disposition des longueurs d'onde en sortie, comme présenté dans le tableau I réalisé pour un composant 8x8.

Entrée	Spectre «1»	Spectre «0»
1	00101101	11010010
2	10100101	01011010
3	01101001	01101001
4	10110100	01001011
5	01001011	10110100
6	01101001	01101001
7	01011010	10100101
8	11010010	00101101

TABLE I
SPECTRES ÉMIS EN FONCTION DE L'ENTRÉE ÉCLAIRÉE.

Si le MMI PHASAR peut générer des codes spectraux «désordonnés», il n'en existe pas moins un rapport de symétrie du à la géométrie du composant qui a des répercussions sur la focalisation en sortie du système codeur. On pourrait interpréter les 8 entrées comme 8 codes complémentaires possible, mais on s'aperçoit à la lecture du tableau I que le code «0» de l'entrée 1 est identique au code «1» de l'entrée 8. Il en va de même pour les codes 2 et 7, 3 et 6, 4 et 5. Par conséquent, le code «1» de l'entrée 1 est

le complémentaire du code «1» de l'entrée 8. Il serait donc impossible de distinguer ces codes émis simultanément. On ne trouve que quatre paires de codes parfaitement orthogonaux deux à deux dans cette configuration, ce qui limite en théorie notre système à deux utilisateurs simultanés. Nos calculs indiquent que le décodage est encore possible avec deux paires de codes orthogonaux et une quelconque, étendant le système à 3 utilisateurs maximum.

Du point de vue de la conception et de la fabrication, il n'est pas trivial d'augmenter le nombre d'entrées/sorties d'un tel composant sans dégrader ses performances, alors que le nombre de codes orthogonaux générés augmente lentement. D'autres problèmes comme la diaphotie non-adjacente (générée par des canaux optiques non adjacents) importante et des difficultés de réalisation liées aux dimensions du composant nous ont amené à étudier un autre codeur.

B. Codeur à coupleur en étoile

Nous avons vu que pour ce composant la distribution en sortie en fonction de l'entrée éclairée suit une logique de permutation. Dans ce cas, un regroupement simple des sorties adjacentes, comme pour le WDM à MMI, ne peut pas produire de codes orthogonaux. La figure 5 présente un spectre par regroupement des sorties adjacentes simulé pour un WDM 7x7.

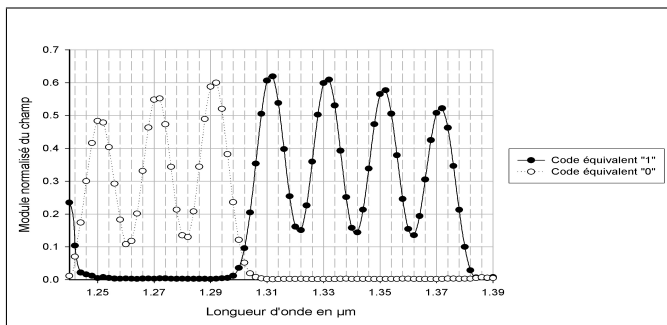


Fig. 5. WDM 7x7, simulation jBPM de spectre obtenu par regroupement de sorties adjacentes.

Il est nécessaire de reproduire le «désordre» indispensable au codage. Pour cela, nous choisissons de regrouper des sorties non-adjacentes, par un croisement des guides de sortie. On obtient alors un spectre présenté sur la figure 6.

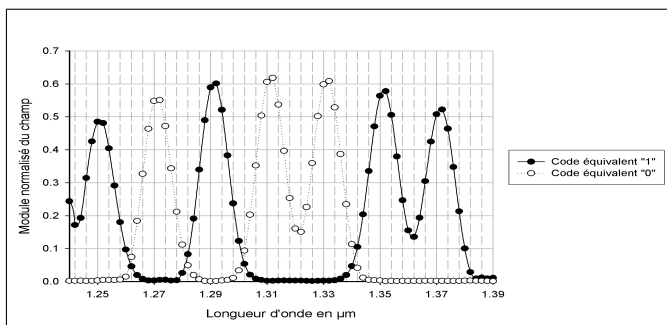


Fig. 6. WDM 7x7, simulation jBPM de spectre obtenu par regroupement de sorties non-adjacentes.

Dans ce cas, la permutation va générer naturellement 7 paires de codes complémentaires, et notre composant s'apparente à un générateur optique de m-séquences spectrales,

les m-séquences possédant des propriétés de corrélation idéales pour l'application CDMA.

Un tel croisement de guides n'est pas sans risque, on imagine aisément les perturbations que cela peut provoquer, et il a fallu étudier leur impact sur le fonctionnement du dispositif, en particulier l'influence de l'angle de croisement. Les performances simulées autorisent la réalisation d'un composant $N \times N$ générant N codes complémentaires orthogonaux pour N utilisateurs possibles.

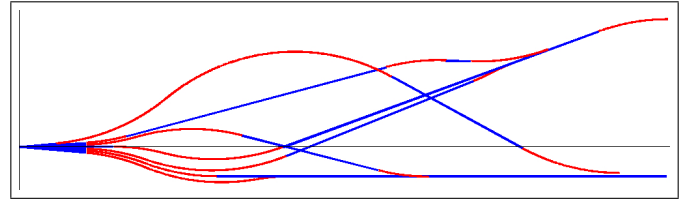


Fig. 7. Conception de sorties croisées grâce au logiciel jDesign développé au laboratoire.

V. CONCLUSION

Nous présentons une approche du codage dans un système CDMA optique spectral par le biais de deux composants d'optique intégrée. La mise au point de logiciels de simulation et de conception a permis l'étude de ces composants afin de déterminer leur capacité à réaliser la fonction souhaitée. La mise en place d'une unité de production dans les locaux du Centre d'Électronique et micro-optoélectronique (thèses de Jihane Jabbour et Sylvain Gatti) en collaboration avec le Laboratoire Des Verres permettra de maîtriser la chaîne de fabrication de ces composants, de la synthèse du matériau à la caractérisation.

RÉFÉRENCES

- [1] R. T. Chen et L. S. Lome. Wavelength Division Multiplexing. *SPIE Optical Engineering Press*, Critical Review(71), 1999.
- [2] K. Kribich, Y. Moreau, P. Coudray, et P. Etienne. Circuits Mux/Demux Fabriqués par Écriture Laser dans un Matériau Hybride. *Proc. JNOG'02*, Dijon, 2002.
- [3] Y. Moreau, P. Coudray, K. Kribich, et P. Etienne. Système d'Accès Multiple Par Code En Technologie Organique-Minérale. *Proc. JNOG'00*, Toulouse, 2000.
- [4] Mohammad R. Païam et Robert I. MacDonald. Design of Phased-array Wavelength Division Multiplexers using Multimode Interference Couplers. *Applied Optics*, 36(21), 1997.
- [5] C. Dragone. An $N \times N$ optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 3 :812, 1991.
- [6] K. Iversen et D. Hampicke. Comparison and Classification of All Optical CDMA Systems for Future Telecommunications Networks. *SPIE Proc.*, 2614 :110, 1995.