

PIC, composants photoniques incontournables...

Jean-Michel MUR
Président du Club optique
jm.mur@orange.fr

Les circuits intégrés photoniques – PIC – deviennent une solution prisée dans les réseaux de communication en fibres optiques. Tour d'horizon...

L'histoire des circuits intégrés photoniques ou puces optiques (*photonic integrated circuits* – PIC) a commencé il y a plusieurs dizaines d'années. En effet, c'est en septembre 1969 que Stewart E. Miller a publié son article « Integrated optics : an introduction », dans le Bell System Technical Journal. Ensuite, l'intégration de certaines fonctions optiques s'est développée. Mais, ce n'est que depuis quelques dizaines de mois que cela s'est véritablement accéléré pour les PIC. Le facteur clé de la réussite concerne les coûts de développement et de fabrication rapportés à la taille du marché. Effectivement, les marchés sont là, désormais, à travers trois applications : les réseaux optiques téra-bitaires, les centres informatiques via les centres de données (*data center*) et les centres de calcul hautement performants (*high performance computing* – HPC) et les réseaux d'accès avec la fibre optique jusqu'à l'habitat (*fiber to the home* – FTTH).

Un peu d'histoire

Ces PIC illustrent la tendance et l'évolution vécues, durant les dernières décennies, dans le domaine des circuits et composants électroniques : de plus en plus petits car de plus en plus condensés, de plus en plus performants, de moins en moins gourmands en énergie par gigabit traité, etc. En quelque sorte, les PIC confirment la continuité de l'application de la loi de Gordon Moore dans le domaine de la photonique. Par rapport aux composants discrets, ils représentent une véritable rupture technologique car plusieurs di-

zaines de fonctions sont intégrées dans un PIC (*figure 1*). Par exemple, pour la fonction émission, un PIC est composé de plusieurs lasers accordables et la fonction réception par autant de photodiodes, mais on trouve aussi, parmi les autres fonctions clés, la modulation des signaux dont la modulation de phase (*quadrature phase shift keying* – QPSK), le multiplexage optique type multiplexage dense en longueur d'onde (*dense wavelength division multiplexing* – DWDM), la compensation de dispersion chromatique, le traitement de la dispersion de mode de polarisation, la correction d'erreur (*forward error correction* – FEC)... (*figure 2*). Et notons également qu'un intérêt majeur des PIC concerne la diminution drastique des conversions O-E-O (optique-électrique-optique) et donc de leur coûts induits.

Le défricheur Infinera Corporation, jeune pousse américaine créée il y a une dizaine d'années, a lancé commercialement ses premiers PIC en 2004. Mais, ce n'est qu'en 2011 qu'ils commencent à faire

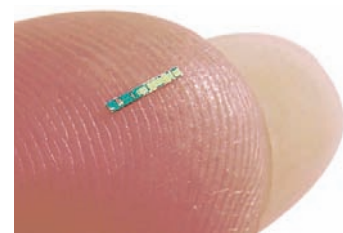


Figure 1. Exemple de puce optique. Source : JDSU

vraiment parler d'eux. Sans faire un historique détaillé, on peut considérer deux moments forts dans leur évolution : d'une part, une intégration de plus en plus poussée, et, d'autre part, un accroissement très important du produit débit unitaire par nombre de canaux transmis. Côté intégration ou densification, la tendance s'est faite du circuit hybride à la puce monolithique, à l'échelle nanométrique. Cette puce peut être fabriquée sur différents substrats tels l'arséniure de gallium, le niobate de lithium, le silicium... Mais, le phosphore d'indium (InP) est le plus performant, dans la plage 1310–1550 nanomètres, dédiée au transport des signaux

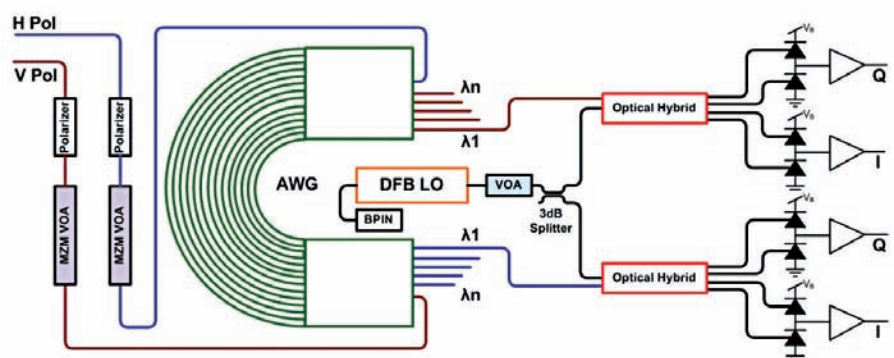
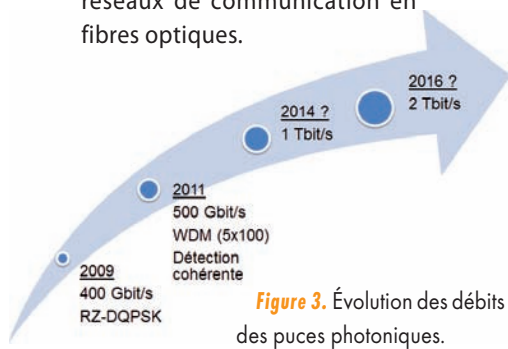


Figure 2. Architecture d'un récepteur PIC cohérent pour le format de modulation QPSK et double polarisation.

par fibres optiques unimodales. Côté nombre de canaux, ce fut le passage du canal unique au PIC multicanaux avec, tout d'abord, dix canaux transmettant 10 Gbit/s chacun, soit 100 Gbit/s en WDM. Ensuite, en 2011, ont été annoncés les PIC traitant cinq canaux à 100 Gbit/s chacun soit 500 Gbit/s en WDM. Ce débit d'un demi-térahbit par seconde a sonné le véritable décollage de l'intérêt porté à ces composants (figure 3). En 2012, fabrication et installation sont devenues économiquement viables pour doper les réseaux de communication en fibres optiques.



Réseaux térahbitaires

Qu'ils semblent déjà lointains les premiers réseaux gigabitaires, réseaux en fibres optiques transportant les informations numériques à quelques 2,5 gigabits par seconde. Aujourd'hui, à travers des solutions d'Alcatel-Lucent, Ciena, Huawei et autres ZTE, les réseaux à 100 Gbit/s par longueur d'onde s'installent régulièrement (voir Photoniques n°57, *En route vers le 100 Gbit/s*). Cependant, pour faire face aux immenses besoins de communication en voix, données, images fixes et, surtout, images animées, il semblerait que cela soit insuffisant. Aussi, commence-t-on à parler des réseaux à 400 Gbit/s ou 500 Gbit/s dont les premières expérimentations grandeur nature sont là.

Dans ce cadre, les PIC peuvent trouver leur place en s'installant à deux niveaux : l'un, dans les fonctions d'émission et de réception et, l'autre, dans le domaine des multiplexeurs d'insertion-extraction de longueurs d'onde reconfigurables à distance (*reconfigurable optical add-drop multiplexer* – ROADM).

Dans le premier cas, Infinera propose une solution de paires de PIC – un pour

l'émission et un pour la réception – à cinq fois 100 Gbit/s soit 500 Gbit/s. À titre d'illustration, citons deux expérimentations : l'une sur un réseau terrestre qui s'est déroulée avec succès, il y a quelques mois, sur une distance de plus de 1 000 kilomètres entre Los Angeles et San Jose, pour le compte de l'exploitant de réseaux TeliaSonera International Carrier et l'autre, mi-2012, sur un réseau transocéanique, sur une distance de 4 500 kilomètres pour le compte de Pacnet.

Côté ROADM, leur utilité n'est plus à démontrer (voir *Photoniques n°43, À la découverte des ROADM*). Aussi, NeoPhotonics commercialise Multicast Switch, un ROADM, sous forme de PIC, en double configuration 8 x 16, c'est-à-dire doté de seize ports d'insertion-extraction dirigeables vers huit directions. Multicast Switch possède des capacités connues sous l'acronyme CDC (*colorless, directionless, contentionless*). Il peut par exemple être couplé à un commutateur sélectif en longueur d'onde (*wavelength selective switch* – WSS) pour diriger toute longueur d'onde vers tout port (*colorless*). Les prochaines annonces devraient élargir la gamme avec des configurations comme 8 x 12 ou 8 x 24.

Ainsi, ces évolutions sont le prélude aux prochains réseaux térahbitaires, réseaux de communication en fibres optiques offrant, de manière acceptable par le marché, ce débit de mille milliards d'informations binaires – 0 ou 1 – transmis en une seule seconde sur une seule fibre optique. « Miracle » dont la réalisation tient, entre autres, en trois lettres : PIC.

Centres informatiques

Que ce soit pour les centres de données ou les centres de calcul hautement performants, la problématique est la même : restriction des surfaces par la densification des ports, diminution des coûts, diminution de l'énergie consommée et allongement des distances à couvrir. Cela a entraîné leur mutation vers les solutions en tout optique. À titre indicatif, en 2008, le supercalculateur Roadrunner d'IBM nécessitait 40 000 liens optiques pour interconnecter les châssis de serveurs. Le récent BlueWaters d'IBM, pour le National

Symétrie

METROLOGIE ET POSITIONNEMENT

HEXAPODE

- 6 degrés de liberté
- haute résolution
- configuration du centre de rotation dans le logiciel
- compatible au vide

Hautes performances pour vos positionnements de précision :

optique, instrumentation, spatial, synchrotron...

BORA

hexapode miniature

- résolution 0,1 µm
- courses ± 20 mm
- charge max. 10 kg



BREVA

parfait pour des courses et charges plus importantes

- résolution 1 µm
- courses ± 75 mm
- charge max. 20 kg



Contact : +33 (0)4 66 29 43 88
info@symetrie.fr-www.symetrie.fr

center for supercomputing applications de l'université de l'Illinois, nécessiterait quelques centaines de milliers de liaisons optiques ! Dans cet ordre d'idées, les PIC trouvent toute leur place dans cet environnement à travers, entre autres les émetteurs-récepteurs (*transceivers*) incorporés dans les cordons optiques actifs (voir *Photoniques n°52, Panorama des cordons optiques actifs ou AOC – active optical cables*).

À titre prospectif à l'époque, dès 2003, IBM et Agilent Research Laboratories avaient commencé des études dans le cadre du projet Terabus. Puis, en 2005, IBM continua seul sur deux voies : une avec des lasers travaillant à 985 nanomètres, l'autre avec des lasers pour 850 nanomètres. Dans les deux cas, la technologie retenue concernait des lasers à cavité verticale et émission surfacique (VCSEL) d'Emcore Corp. La première solution, à 985 nanomètres, a été abandonnée pour deux raisons : des coûts des lasers plus élevés car fabriqués en moindre quantité et davantage de pertes linéiques du signal dans le polymère du guide d'ondes. Les travaux dans ces domaines ont permis la création d'émetteurs-récepteurs pour plusieurs liens optiques en parallèle sous forme de puces optiques baptisées alors « Optochip ».

Le dernier résultat de ces recherches fut la présentation par IBM, en avril 2012, de sa puce photonique « pleine de trous » : Holey Optochip, en technologie CMOS (figure 4). Côté densification, sur quelques millimètres carrés ($5,2 \times 5,8$ mm), elle contient quatre rangées de douze « trous » chacune : deux rangées pour vingt-quatre photodiodes et deux autres rangées pour vingt-quatre lasers VCSEL travaillant à 850 nanomètres, sur des fibres optiques multimodales. Pour l'instant objet de laboratoire, cette puce pourrait permettre un débit total de l'ordre du téra-bit par seconde avec une consommation inférieure à cinq watts.

Autres exemples avec la société canadienne OneChip Photonics Inc. et la californienne Kaiam Corp. OneChip Photonics a annoncé la disponibilité, pour fin 2012, de PIC pour Ethernet à 40 Gbit/s (norme 40GBASE-LR4 avec 4×10 Gbit/s) et pour Ethernet à 100 Gbit/s (norme 100GBASE-LR4 avec 4×25 Gbit/s). Dans le

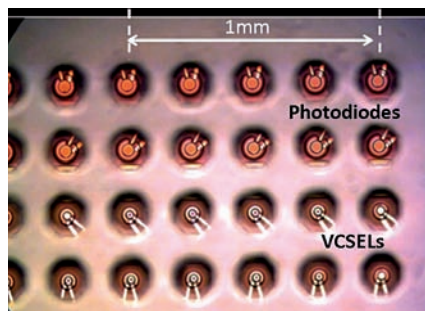


Figure 4. Puce optique Holey Optochip.

Source : IBM.

premier cas, l'émission se fait à partir de lasers DFB (*distributed feedback*) modulés directement et travaillant à 1271, 1291, 1311 et 1331 nanomètres ; dans le second cas, les lasers ont une modulation externe et ils émettent dans une fenêtre autour de 1300 nanomètres avec un espacement entre les quatre longueurs d'onde de 800 GHz. Pour la fonction réception, OneChip Photonics a privilégié la solution d'un détecteur pré-amplifié optiquement (*optically pre-amplified detector – OPAD*) qui semblerait plus efficace que les photodiodes à avalanche. La distance maximum couverte est de dix kilomètres permettant de desservir les réseaux en fibres optiques de type campus. Quant à Kaiam, jeune pousse créée en 2009, elle commercialise, sous forme de PIC, des émetteurs-récepteurs transmettant 4×10 Gbit/s (norme 40GBASE-LR4) pour des cordons optiques actifs QSFP et CFP.

FTTH

Le déploiement de la fibre optique jusqu'à l'habitation (FTTH), véritable marché de masse, est considéré avec un intérêt certain pour le développement des PIC. En effet, leur niveau d'intégration les rend plus intéressants en termes de volume occupé et de facilité de mise en œuvre que les produits créés avec les technologies plus classiques de composants discrets ou de circuits planaires. Ainsi, l'industrie se focalise-t-elle sur l'application la plus commune : les émetteurs-récepteurs pour le côté abonné (unité de réseau optique ou *optical network unit – ONU*) et pour le côté fournisseur (termi-

EuroPIC



L'Union européenne est présente dans le développement des PIC à travers EuroPIC : European manufacturing platform for photonic integrated circuits. Ce projet est soutenu dans le cadre du septième programme européen et coordonné par le laboratoire COBRA de l'université d'Eindhoven.

Démarré le 1^{er} août 2009 et achevé le 31 juillet 2012, EuroPIC avait, certes, pour objectif d'apporter des changements dans le domaine des PIC mais, surtout, d'aider les PME-PMI en leur facilitant l'accès au développement et à l'industrialisation de PIC économiquement viables. Les aides étaient aussi bien financières, par une participation à leurs investissements, qu'intellectuelles à travers le partage de bases de connaissances sur la technologie et la fabrication de PIC fondés sur le phosphore d'indium.

Les domaines d'application des PIC retenus pour EuroPIC concernaient la communication comme la fibre optique jusqu'à l'habitation, les émetteurs et récepteurs à très haut débit... ainsi que la gestion d'applications telles que des capteurs pour la santé ou la métrologie de haute précision.

Exemples de résultats : des capteurs développés par FiberSensing, PME issue de l'université de Porto ; un émetteur multi longueur d'onde pour FTTH par le laboratoire COBRA ; un commutateur optique par l'université de Cambridge...

Pour de plus amples informations :

<http://europic.jepix.eu/>

raison de ligne optique ou *optical line terminal – OLT*) de l'application FTTH en topologie de réseau optique passif (*passive optical network – PON*).

En exemple, OneChip Photonics propose des solutions d'émetteurs-récepteurs PIC, sur phosphore d'indium, pour deux grands types de réseaux optiques passifs comme l'Ethernet PON ou EPON ainsi que pour son concurrent le GPON. Toutes les fonctions d'émission et réception des signaux sont condensées sur une puce intégrée monolithique et incluent laser DFB, détecteur de pré-amplification

optique, photodiode PIN ou à avalanche selon le cas, coupleur optique, guide d'ondes... (figure 5).

Quelques caractéristiques pour le PIC dédié EPON : support de l'application 1000BASE-PX20-U, donc unité de réseau optique distante au maximum de vingt kilomètres avec des flux descendant et remontant symétriques à 1,25 Gbit/s chacun, sur une seule fibre optique. La transmission se fait à 1310 nanomètres via un laser MQW-DFB (*multiple quantum well – distributed feedback*) et la réception à 1490 nanomètres via une photodiode PIN. Pour le PIC dédié GPON, c'est-à-dire pour l'application normalisée UIT-T G.984.2, les performances sont identiques en flux remontant mais vont jusqu'à 2,488 Gbit/s en flux descendant. Ainsi, l'émission se fait avec le même laser que pour l'EPON mais la réception est assurée par une diode à avalanche, diode plus performante.

Les prochaines annonces devraient concerner les PON à 10 Gbit/s – 10GPON et XGPON – avec les variantes de débits selon le sens – descendant ou remontant – du flux de données : soit 10 Gbit/s en symétrique, soit 10 Gbit/s en descendant et 1,25 Gbit/s en remontant.

Et demain ?

Des travaux portent sur de nouveaux formats de modulation des signaux comme la modulation QAM (*quadrature amplitude modulation*), avec les versions 8-QAM et 16-QAM, la détection cohérente du DWDM... Déjà, les premières démonstrations de PIC assurant la transmission d'un téra-bit par seconde à travers dix canaux à 100 Gbit/s ont été présentées. Par exemple, P. Evans d'Infinera a publié, fin 2011, l'article « *1,12 Tb/s superchannel coherent PM-QPSK InP transmitter photonic integrated circuit (PIC)* ». Il y détaillait la transmission par un PIC monolithique de dix longueurs d'onde multiplexées, supportant un débit de 112 Gbit/s chacune, soit un débit total de 1,12 Tbit/s. Les 112 Gbit/s étaient transportées en jouant sur une « constellation » à 28 Gbaud apportés par la modulation QPSK et la double polarisation (figure 6). Les transmissions étaient assurées par dix lasers DFB

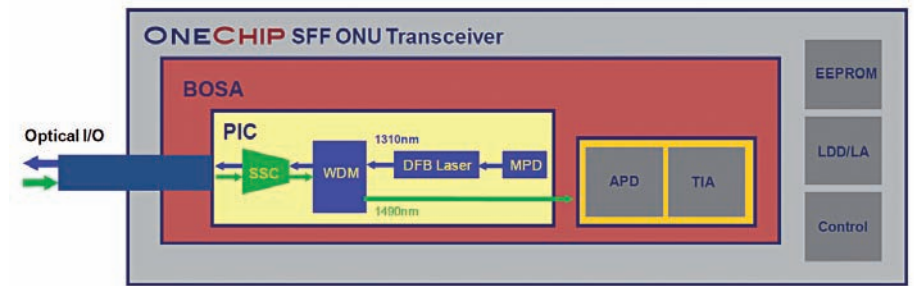


Figure 5. Principe d'un émetteur-récepteur d'OptoChip pour unité de réseau optique (ONU) GPON. Source : OneChip Photonics.

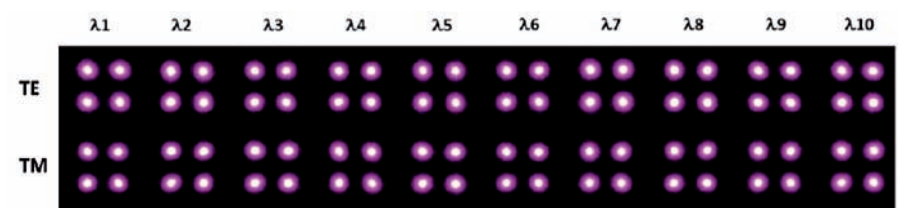


Figure 6. Diagramme des constellations à 28 Gbaud représentant les quatre flux de données pour chaque polarisation de chacune des dix longueurs d'onde d'un émetteur PIC. Source : Infinera.

accordables, les longueurs d'onde avaient un espacement de 200 GHz et couvraient la moitié de la bande C (1530–1565 nanomètres), complétés par des modulateurs Mach-Zender et des atténuateurs optiques variables. Tout cela laisse présager une exploitation commerciale pour 2014.

Et après-demain ? Dans le même ordre d'idées, un nouveau centre de recherches a été créé à l'université de Santa Barbara en Californie : Terabit Optical Ethernet

Center (TOEC). Les chercheurs ont pour objectif de développer les technologies nécessaires pour la future génération des réseaux Ethernet à un téra-bit par seconde. Ils pensent y arriver pour 2015 et ils ont fixé comme objectif ultime le 100 Terabit Ethernet pour 2020. Pour cela, les universitaires ont des alliés de poids – Agilent Technologies, Google, Intel, Verizon, etc. – et ils ont annoncé que leurs développements s'appuieraient sur les PIC.

Technologies d'intégration photonique

Circuits planaires

(planar lightwave circuit – PLC)

- Circuits de guide de longueur d'onde optique fabriqués selon différentes technologies planaires
- Composants optiques uniquement passifs à base de matériaux transparents
- Silicium sur silicium, polymères, silicium sur isolant

Circuits intégrés photoniques

(photonic integrated circuit – PIC)

- Composants et guides de longueurs d'onde optique fabriqués selon les technologies de fabrication des semi-conducteurs

- Composants passifs et actifs, matériaux transparents et opaques
- Semi-conducteurs au phosphore d'indium ou similaires (III-V)

Circuits optoélectroniques intégrés

(optoelectronic integrated circuit – OEIC)

- Composants électroniques et photoniques combinés sur une puce fabriquée selon différentes technologies de fabrication des tranches de semi-conducteurs
- Composants optiques passifs et actifs liés à des composants électroniques
- Semi-conducteurs III-V (phosphore d'indium ou arséniure de gallium), silicium en CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) ou sur isolant (SOI)