

Interconnexion Thunderbolt – Optique et Cuivre

Jerry Gao, Hengju Cheng, Hui-Chin Wu, Guobin Liu, Edmond Lau, Li Yuan et Christine Krause

Résumé—La technologie d'interconnexion Thunderbolt a adopté les câbles en cuivre et optiques. Un seul câble peut prendre en charge un débit de données de 2×20 Gb/s, piloté par la vidéo 4K. Les futures vidéos 8K et réalité virtuelle pousseront les besoins en bande passante encore plus haut. Les technologies clés développées pour permettre ce débit de données élevé pour l'électronique grand public sont discutées, telles que des câbles en cuivre et optiques robustes, un moteur optique miniature et des circuits intégrés de faible puissance de $2 \times 25,625$ Gb/s pour une liaison optique laser à émission de surface à cavité verticale.

Les technologies d'interconnexion cuivre et optique sont comparées sur la base du coût, de la puissance, du facteur de forme et de l'évolutivité. Le même circuit avec quatre canaux ($4 \times 25,625$ Gb/s) peut être utilisé dans l'interconnexion optique du centre de données 100G. La consommation électrique totale est de 146 mW pour chaque liaison optique de 25,625 Gb/s, ce qui donne 5,69 mW/Gb/s. Parmi les circuits intégrés optiques disponibles dans le commerce que nous avons évalués à 25 Gb/s, ce travail présente la consommation d'énergie la plus faible et la plus petite surface de puce de l'industrie.

Termes de l'index : BiCMOS, interconnexion optique, émetteur-récepteur optique, Thunderbolt, laser à émission par la surface à cavité verticale (VCSEL), 100 Gb/s.

I. INTRODUCTION

La technologie NTERCONNECT a progressé très rapidement rythme au cours de la dernière décennie. Le taux de signalisation a augmenté régulièrement. augmenté de 100 Mb/s à 25 Gb/s. Avec la sortie de la technologie Thun-derbolt, nous entrons dans une nouvelle ère dans l'électronique grand public qui fonctionne à un débit de ligne de 20 Gb/s (débit de 40 Gb/s par interface de connecteur) [1], [2]. Cela est dû aux besoins en bande passante de la vidéo 4K, qui devient rapidement le flux principal aujourd'hui. Étant donné que la vidéo 8K et la réalité virtuelle (VR) pointent déjà à l'horizon, une augmentation significative du débit d'interconnexion sera nécessaire à l'avenir. Du côté des centres de données et du cloud, le trafic de données mobiles contribue à plus de 50 %, et ce pourcentage continue d'augmenter. Cela pousse le débit de données d'interconnexion du centre de données à 100G, 400G et plus. Les E/S électriques sont de plus en plus limitées par les canaux en cuivre, dont la perte d'interconnexion dépend de la fréquence et de la distance. Pour surmonter cette limitation, des circuits supplémentaires ont été ajoutés pour compenser la perte du canal de cuivre ; ces circuits consomment plus d'énergie, ajoutent plus de complexité et occupent des espaces supplémentaires [2], [3]. D'autre part, la fibre optique a été largement utilisée sur de plus longues distances tout en maintenant un débit de données plus élevé en raison d'une atténuation nettement inférieure et d'une meilleure immunité aux interférences électromagnétiques (EMI). De plus, avec des plus petits

Manuscrit reçu le 20 septembre 2016 ; révisé le 22 novembre 2016 ; accepté le 6 décembre 2016. Date de publication le 8 décembre 2016 ; date de la version actuelle 19 juin 2017.

Les auteurs travaillent pour Intel Corporation, Santa Clara, CA 95054-1549 USA (e-mail : jerry.gao@intel.com ; hengju.cheng@intel.com ; hui-Chin.Wu@intel.com ; Guobin.Liu@intel.com ; Edmond.Lau@intel.com ; Li.Yuan@intel.com ; Christine.Krause@intel.com).

Des versions couleur d'une ou plusieurs des figures de cet article sont disponibles en ligne sur <http://ieeexplore.ieee.org>.

Identificateur d'objet numérique 10.1109/JLT.2016.2637880



Figure 1. Câble Thunderbolt. Câble cuivre à gauche, câble optique à droite.

et des facteurs de forme de système plus petits, il ne reste plus beaucoup de place pour tous les connecteurs, tels que Ethernet, eSATA, DVI, USB, HDMI et Display Port [2], [3]. La technologie d'interconnexion Thunderbolt (TBT) a été introduite sur le marché vers la fin de 2011. Il s'agit de la nouvelle technologie de câble à haut débit, à faible consommation et à petit facteur de forme, avec l'intention de devenir la seule E/S universelle pour les futurs ordinateurs. et les appareils portables.

La technologie d'interconnexion Thunderbolt a introduit deux types de câbles actifs : en cuivre et optique, comme le montre la figure 1 [2]. Un câble en cuivre actif prend en charge une distance de liaison <3 m à 10 Gb/s, <2 m à 20 Gb/s. Un câble optique actif basé sur un laser à cavité verticale et à émission par la surface (VCSEL) prend en charge une distance de liaison allant jusqu'à 60 m. Dans le câble Thunderbolt de nouvelle génération (Gen 3), le signal Thunderbolt 2 \times 20 G et le signal USB3.1 10 G convergent vers le même connecteur USB Type-C. L'introduction de la technologie des câbles optiques dans le Thunderbolt ouvre de nouveaux modèles d'utilisation auparavant non autorisés par les câbles en cuivre dans l'électronique grand public [1].

II. DÉFIS ET CONCEPTION

L'un des défis de conception consistait à rendre le circuit intégré suffisamment petit pour s'insérer dans le moteur optique miniature qui s'insère à l'intérieur de la fiche du câble ordinaire. À 25 Gbit/s, le bruit intégré total est plus élevé qu'à 10 Gbit/s en raison d'une bande passante plus élevée, ce qui pose un défi plus important en termes de sensibilité du récepteur. En général, le bipolaire a un gain plus élevé que le CMOS par étage de gain et une meilleure performance de bruit d'environ 1 à 2 dB [7]. Dans cette conception, le processus BiCMOS a été choisi afin d'avoir moins d'étages de gain et un canal compact à grande vitesse, tandis que l'avantage du CMOS existe toujours pour l'intégration du contrôle numérique, de la gestion de l'énergie et des circuits de contrôle de polarisation VCSEL. Dans ce travail, le BiCMOS de $0,18 \mu\text{m}$ a été choisi pour réduire les coûts de fabrication des bandes et des plaquettes.

Un autre défi consiste à rendre le câble optique suffisamment robuste pour résister aux abus quotidiens des consommateurs. Au cours des dernières années, Intel a travaillé sur un câble optique robuste, capable de supporter les tests avec une agrafeuse, la flexion et la torsion, les pincements violents et même les tests de chute avec un marteau, et la fibre à l'intérieur du câble ne se casse pas.

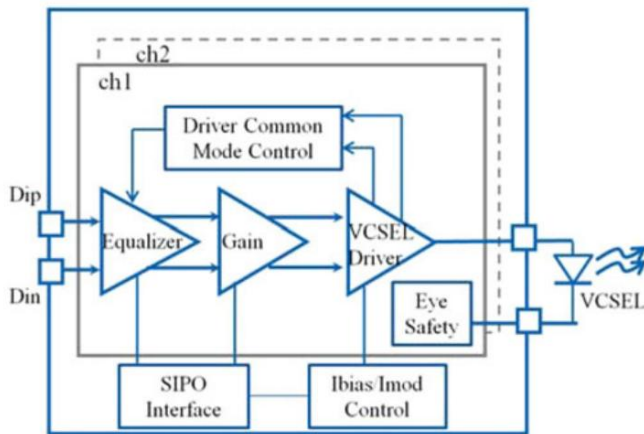


Fig. 2. Schéma fonctionnel de l'émetteur 2 x 25G.

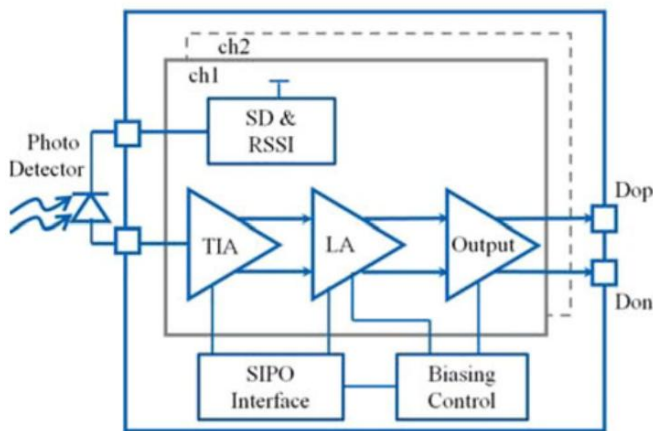


Fig. 3. Schéma fonctionnel du récepteur 2 x 25G.

La figure 2 montre le schéma fonctionnel du circuit intégré de l'émetteur (TX) 2 x 25,625G. Il dispose de deux canaux identiques, chaque canal se compose d'un chemin de signal haute vitesse (égaliseur d'entrée, étage de gain, pilote VCSEL), d'une interface de contrôle SIPO (sortie série en parallèle) basse vitesse, d'un contrôle de polarisation et de courant de modulation VCSEL, d'un œil. sécurité et contrôle de retour de tension en mode commun du pilote.

La figure 3 est un schéma fonctionnel de circuits intégrés de récepteur (RX) 2 x 25,625G. Chaque canal dispose d'un chemin de signal haute vitesse (amplificateur trans-impédance (TIA), amplificateur limiteur (LA), étage de sortie), SIPO, contrôle de polarisation, détection de signal (SD) et indicateur de force du signal du récepteur (RSSI).

La figure 4 montre le circuit détaillé de l'émission. L'oscillation d'entrée électrique est de 200 mV différentielle crête à crête. Q1 et Q2 forment un étage d'entrée avec la dégénérescence de l'émetteur qui donne une capacité d'égalisation d'environ 3 dB. La boucle de contrôle en mode commun du pilote à basse vitesse garantit que Q3 et Q4 fonctionnent à la bonne tension de polarisation CC sur la tension et la température du processus (PVT). Le VCSEL factice et le bloc de filtre minimisent les pics de courant importants sur l'alimentation tout en gardant le nœud A à la terre. La sécurité oculaire et l'interrupteur cathodique forment une protection qui garantit que le VCSEL est désactivé si la tension de l'anode est trop élevée (par exemple, fil de liaison court-circuité à l'alimentation).

Le circuit détaillé du RX est illustré à la figure 5. Q1 et Q2 forment un TIA asymétrique, alimenté par un régulateur sur puce. T3,

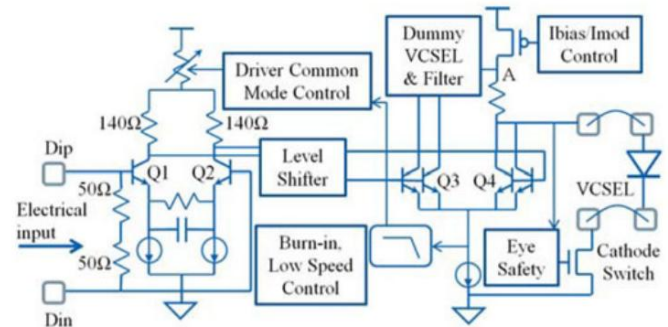


Fig. 4. Circuit émetteur.

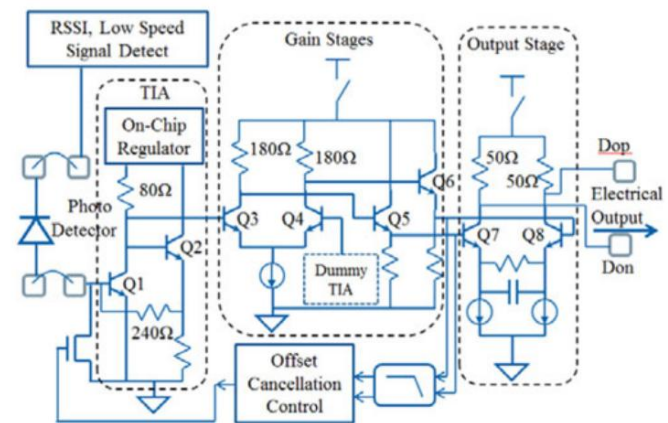


Figure 5. Circuit récepteur.

Q4, Q5, Q6 forment un étage de gain dont le gain est d'environ 13 dB.

L'étage de sortie a une capacité de préaccentuation de 2 à 3 dB. La boucle de contrôle d'annulation de décalage à basse vitesse supprime le courant moyen du photodétecteur (PD). L'oscillation de la sortie électrique est de 200 mV différentielle crête à crête.

À 25 Gb/s, il y a des resynchroniseurs dans le chemin du signal électrique et ils sont à <1,5 pouces de l'interface électrique du circuit intégré optique. Afin de réduire la consommation d'énergie et d'avoir un design compact, le TX ne possède qu'un seul étage de gain. Grâce au gain élevé du bipolaire, le signal haute vitesse peut commuter complètement la paire diff Q3/Q4 avec un seul étage de gain. 77 % de la puissance TX est consommée par le VCSEL lui-même, seulement 23 % de la puissance est consommée par l'étage de gain. Le résultat des tests montre qu'un étage de gain et une égalisation de 3 dB en TX suffisent dans la liaison optique. La figure 6 montre le tracé de simulation de gain normalisé de l'égaliseur d'entrée TX.

Du côté RX, l'oscillation de sortie est d'environ 200 mV. L'égalisation de sortie de 2 à 3 dB du RX peut compenser la perte de PCB de 1,5 pouce, avant que le signal n'atteigne le re-timer.

III. RÉSULTATS DES MESURES

Le véhicule de mesure utilisé dans ce travail est un module optique standard QSFP28 100G. Puisque nous disposons de circuits intégrés à 2 et 4 canaux (tous les canaux sont identiques), nous avons testé 4 canaux 4 x 25,625G TX et RX. La figure 7 montre la micrographie de la puce, où TX est lié par fil au réseau VCSEL, RX est lié par fil au réseau de photodétecteurs (PD) [2]. La figure 8 est une carte PCB de module optique QSFP28, où le moteur optique 4 x 25G est

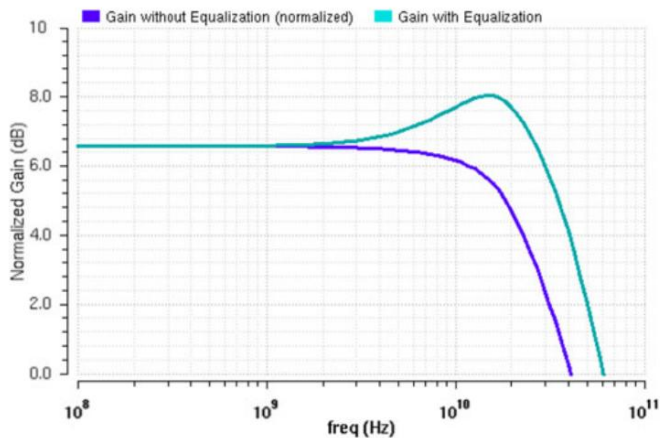
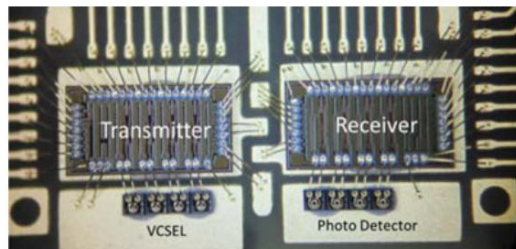


Fig. 6. Égalisation de l'entrée TX.



7. Micrographie à puce 4 × 25G TX et RX.

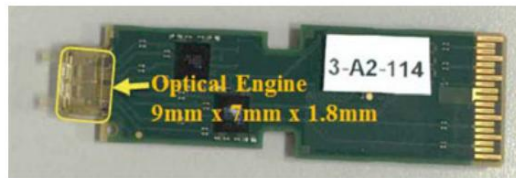


Fig. 8. Moteur optique 4 × 25G sur PCB.

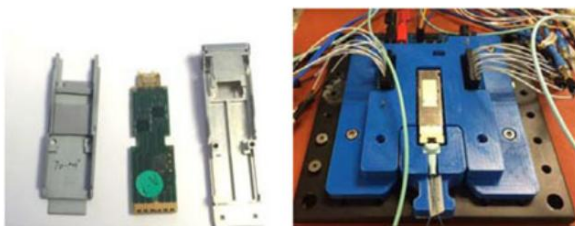


Fig. 9. PCB du module optique, boîtier et configuration de test.

caché sous la lentille en plastique jaune. L'ensemble du moteur optique est très petit, 9 mm × 7 mm pour 1,8 mm de hauteur. Les deux carrés noirs sont les re-timers.

La figure 9 montre le PCB et le boîtier du module optique QSFP28 sur le côté gauche, ainsi que la configuration de test sur le côté droit. À 25,625 Gb/s, les diagrammes oculaires de sortie de lumière TX VCSEL sont présentés sur la figure 10 [2]. À 35 °C, la gigue totale est de 12 ps et la hauteur des yeux est de 620 uW. À 70 °C, la gigue totale est de 13 ps et la hauteur des yeux est de 514 uW. Deux yeux optiques ont été mesurés dans les mêmes conditions de polarisation de courant VCSEL.

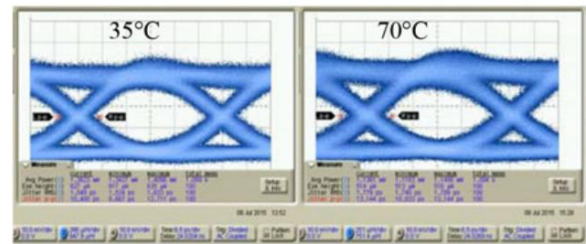


Fig. 10. Diagramme de l'œil de sortie VCSEL à 35 °C et 70 °C.

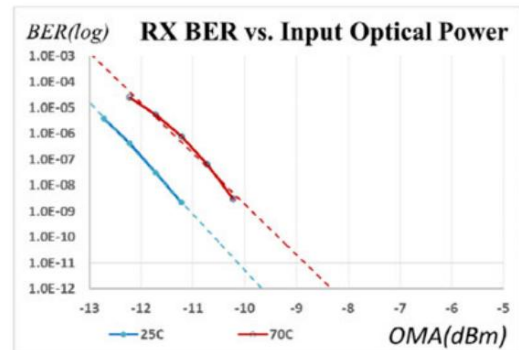
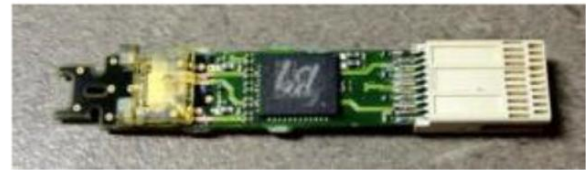


Fig. 11. Résultat de la mesure RX BER.



12. Carte de palette de câble optique Thunderbolt.

À des températures plus élevées, l'efficacité de la pente et la bande passante du VCSEL sont dégradées, l'œil est plus fermé.

La figure 11 représente les résultats de mesure du taux d'erreur binaire (BER) RX. La réactivité du photodétecteur est de 0,5 mA/mW. D'après l'extrapolation (lignes pointillées), la sensibilité de l'amplitude de modulation optique (OMA) RX (BER = 1,0E-12) est de -9,7 dBm et de -8,4 dBm à 25 °C et 70 °C, respectivement. En raison des restrictions de disposition du PCB, la sortie électrique RX n'a pas été mesurée. À des températures plus élevées, la bande passante du RX diminue et le bruit du circuit augmente, ce qui aggrave la sensibilité du RX à des températures plus élevées.

La puissance de lancement de l'émetteur VCSEL est d'environ 1,3 dBm (OMA). La marge de liaison optique (BER = 1,0E-12) est de 11 dB à 25 °C et de 9,7 dB à 70 °C. Avec cette grande marge de liaison, un BER de 1E-15 est obtenu, sans recourir à une égalisation sophistiquée ni à une correction d'erreur directe (FEC). La perte de couplage optique dans le pire des cas côté TX et RX est de 2 dB.

La figure 12 montre la carte de palette de câble optique Thunderbolt de génération actuelle (Gen 2), qui se trouve à l'intérieur de la fiche du connecteur illustrée à la figure 1 (fiche noire). Le moteur optique a une conception très similaire à celle de la figure 8, mais de taille plus petite (5 mm × 6 mm × 1,8 mm) [2], [3].

La figure 13 est un nouveau moteur optique Thunderbolt miniature, doté de 2 circuits intégrés optiques 25G, d'un VCSEL/PD et d'une lentille optique à l'intérieur.

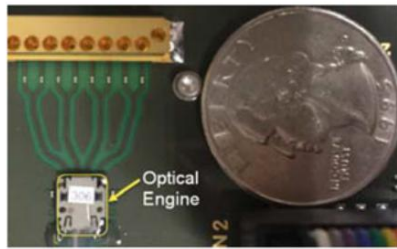


Fig. 13. Moteur optique miniature Thunderbolt.

TABLEAU I
APERÇU DES RÉSULTATS DE MESURE

Technologie	0,18 μm BiCMOS 3,3
Alimentation	V 850
Longueur d'onde optique	nm 2 \times
Tarif date	25,625 Gb/s (2 canaux) 4 \times 25,625 Gb/s (4 canaux) 11,0 dB à 25 °C
Marge de liaison optique	9,7 dB à 70 °C -9,7 dBm à 25 °C -8,4
Sensibilité RX (OMA)	dBm à 70 °C 68 mW 78 mW 146 mW par liaison
Puissance de l'émetteur	25G 2 \times
Puissance du récepteur	
Dissipation totale de puissance	1,11 mm2
Taille totale de la matrice	

La dimension du moteur optique est de 8,2 mm \times 6 mm \times 1,7 mm, il peut subir un processus de soudure par refusion et s'insérer dans la fiche du connecteur du câble optique Thunderbolt [2].

Les résultats des mesures sont résumés dans le tableau I.

IV. AVANTAGES

Par rapport aux publications antérieures sur les liaisons optiques de 10 à 25 Gbit/s ([3]–[8]) et les interconnexions en cuivre, cette conception présente les avantages suivants :

Alimentation : à 10 Gbit/s, Thunderbolt Gen 2 optique-électrique La puissance de conversion (O/E) par liaison optique était d'environ 13,4 mW/Gb/s [3]. À l'heure actuelle, la référence en matière de performances de puissance des liaisons en cuivre est d'environ 15 à 25 mW/Gb/s [1], et la puissance est principalement utilisée pour surmonter la dégradation du signal due à l'atténuation élevée du câble en cuivre, qui est d'environ 7 dB par mètre. La fibre optique a une très faible atténuation (2 dB par kilomètre), ce qui permet une plus grande portée du câble optique. À 25 Gb/s, le moteur optique Thunderbolt d'Intel (basé sur VCSEL) a atteint une efficacité énergétique de conversion O/E de 5,69 mW/Gb/s, grâce à la conception compacte du circuit intégré et à la faible consommation d'énergie du VCSEL (15 mW à 25 Gb/s). Cette faible puissance rendait la conception du moteur optique suffisamment petite pour tenir dans la fiche du câble ordinaire sans le dissipateur thermique.

Facteur de forme : un émetteur-récepteur optique miniature est essentiel pour obtenir le petit facteur de forme requis à l'intérieur de la fiche du câble. Pour y parvenir, les circuits intégrés ont une conception très compacte et sont hautement intégrés avec une interface série numérique, un capteur de température VCSEL, un contrôle de compensation de courant de polarisation, des circuits de gestion de l'alimentation, etc. Surface totale du circuit intégré pour optique 2 canaux 25 Gb/s la liaison (TX + RX) est de 2,22 mm². Le VCSEL a également une très petite taille de puce (250 μm \times 250 μm par VCSEL, illustré sur la figure 7).

TABLEAU II
COMPARAISON DE TROIS TECHNOLOGIES DE CÂBLES DIFFÉRENTES

Technology	Copper	Optical-SiP	TBT Optical-VCSEL
Cost	↑	↓	↗
Distance	↓	↑	↗
Power	↑	↓	↗
Form Factor	↑	↓	↗
Scalability	↓	↗	↗

Une lentille en plastique moulée avec précision en une seule pièce recouvre le VCSEL, le PD et les circuits intégrés optiques et assure un couplage optique efficace des fibres aux dispositifs optiques. La taille de l'ensemble du moteur optique est de 5 mm \times 6 mm \times 1,8 mm, suffisamment petite pour s'insérer dans la fiche du câble TBT.

Côté câble, sur la base des produits de câbles électriques Thunderbolt, la puce de conditionnement du signal est utilisée pour rendre le câble en cuivre plus fin, au lieu de plus long, et le consommateur préfère toujours avoir un câble fin et léger [1]. Pour ce faire, de très petits fils de cuivre (AWG38, AWG40) sont utilisés. Ces fils de cuivre extrêmement fins présentent une atténuation élevée et une portée très limitée. Étant donné que la fibre optique est plus fine et plus légère que son homologue en cuivre, le facteur de forme du câble favorise définitivement l'optique.

Coût : pour l'électronique grand public, le coût est extrêmement sensible et un faible coût est la clé du succès sur le marché. Traditionnellement, le coût de l'assemblage d'un émetteur-récepteur optique est élevé en raison de la précision de l'alignement optique. La conception de la lentille monobloc planaire de ce moteur optique a rendu le processus d'assemblage entièrement automatique grâce à la liaison rapide des matrices et à la fixation de la lentille avec une précision élevée. Outre les circuits intégrés compacts à faible consommation, cette nouvelle conception de moteur optique a réellement réduit le coût de l'émetteur-récepteur optique. Une conception de moteur optique similaire illustrée sur la figure 8 pour QSFP28 réduira encore davantage le coût des liaisons optiques du centre de données.

Côté câble, la fibre optique est nettement moins chère que son homologue en fil de cuivre en supposant la même longueur. Cependant, un coût supplémentaire est ajouté au câble optique actif en raison du moteur optique (conversion O/E) et de la terminaison du câble à fibre optique [1]. Dans un câble court (1 m), le coût du câble en cuivre brut ne représente qu'une petite partie du coût total. Par conséquent, le coût fixe supplémentaire du moteur optique rend le câble optique actif plus cher.

Cependant, à mesure que le câble s'allonge, l'avantage financier du câble optique commence à se faire sentir. À titre d'estimation approximative (en supposant un volume similaire sur les câbles en cuivre et optiques), le point de croisement est d'environ 3 à 5 m. Pour les interconnexions grand public, le volume du câble en cuivre reste bien supérieur à celui du câble optique. À mesure que le débit de données augmente, ce point de croisement deviendra plus court.

Le tableau II présente une comparaison de trois technologies de câble différentes au-delà de 25 Gb/s : câble en cuivre actif, liaison optique basée sur la photonique au silicium (optique-SiP) et liaison optique TBT basée sur VCSEL. Sur les courtes distances, le cuivre est le gagnant. Photonique sur silicium

la liaison optique basée sur une distance beaucoup plus longue, le coût est relativement plus élevé en raison d'un schéma de modulation plus sophistiqué et d'un emballage de puce 3D. Entre 5 mètres et quelques centaines de mètres, la liaison optique basée sur VCSEL est la meilleure solution. À l'avenir, l'intégration de la photonique sur silicium avec le modulateur pourrait réduire les coûts, mais la liaison optique basée sur VCSEL reste la moins chère sur la base des liaisons optiques et des parts de marché actuellement disponibles dans le commerce.

V. CONCLUSION

Ce travail démontre 2 circuits intégrés d'émetteur et de récepteur optiques de faible puissance de 25,625 Gb/s, ainsi que la dernière technologie d'interconnexion optique Thunderbolt. Les circuits intégrés d'émetteur et de récepteur optiques $4 \times 25,625$ Gb/s peuvent être utilisés dans une liaison optique 100G QSFP28 dans une application de centre de données. Cette liaison optique de 25 Gbit/s présente la consommation d'énergie la plus faible, le facteur de forme le plus réduit, le coût le plus bas parmi les options alternatives disponibles dans l'industrie et atteint une marge de liaison optique de 11 dB pour un BER de $1,0E-12$ sans utiliser de correction d'erreur directe (FEC). Une marge de liaison élevée et un VCSEL à bande passante élevée rendront la modulation d'amplitude d'impulsion (PAM-4) très possible à 50 Gb/s (25 Gbaud/s).

Basées sur les produits de câbles Thunderbolt, les technologies d'interconnexion cuivre et optique coexisteront dans un avenir prévisible. Le cuivre dessert la liaison à courte portée tandis que l'optique augmente la distance de liaison pour divers nouveaux modèles d'utilisation, tels que la réalité virtuelle. Le coût, la puissance et le facteur de forme détermineront si le cuivre ou l'optique sera utilisé dans un modèle d'utilisation spécifique. Nous nous attendons à ce que le point de croisement entre le cuivre et l'optique devienne de plus en plus court à mesure que les débits de données augmentent. À 20 Gb/s, cette longueur a été réduite à environ 3 m. Comme le haut débit

La technologie VCSEL progresse, le câble optique sera bien positionné dans la technologie d'interconnexion Thunderbolt de nouvelle génération et dans d'autres E/S grand public, et pourra être étendu à des débits de données de 50G, 100G et plus.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Cheng et al., « Optique contre cuivre – Du point de vue de la technologie d'interconnexion « coup de tonnerre », Proc. SPIE, vol. 8630, Interconnexions optoélectroniques XIII, février 2013, Art.ID. 86300J.
- [2] J. Gao et al., « CI optique faible consommation $2 \times 25,625$ G pour la technologie de câble optique Thunderbolt », dans Proc. 2016 Chine Semiseconde. Technologie. Int. Conf., mars 2016, p. 1–3.
- [3] J. Gao, H. Wu, D. Nelson et H. Cheng, « IC émetteur-récepteur à fibre optique Light Peak 10,3125 Gb/s en CMOS 65 nm », dans Proc. Intel Des. Technologie de test. Conf., 2010.
- [4] C. Kromer et al., « Un émetteur-récepteur de 100 mW 4×10 Gb/s en CMOS 80 nm pour les interconnexions optiques haute densité », IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 40, p. 2667-2679, non. 12 décembre 2005.
- [5] DM Kuchta, « Un émetteur-récepteur CMOS 90 nm 16 Gb/s pour les interconnexions optiques », IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, non. 5, pp. 1235-1246, mai 2008.
- [6] S. Palermo, A. Emami-Neyestanak et M. Horowitz, « Un émetteur-récepteur CMOS 90 nm 16 Gb/s pour les interconnexions optiques », IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, non. 5, pp. 1235-1246, mai 2008.
- [7] T. Takemoto, H. Yamashita, T. Yazaki, N. Chujo, Y. Lee et Y. Matsuoka, « Un récepteur optique CMOS 65 nm haute sensibilité (-9,7 dBm) de 25 à 28 Gb/s pour les interconnexions carte à carte », IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 49, non. 10, pp. 2259-2276, octobre 2014.
- [8] E. Temporiti, G. Minoia, M. Repossi, D. Baldi, A. Ghilioni et F. Svelto, « Un émetteur photonique silicium 56 Gb/s 300 mW dans les technologies PIC25G et BiCMOS 55 nm intégrées en 3D. », dans Proc. IEEE Int. Conf. sur les circuits à semi-conducteurs, session de communication 23, février 2016, pp. 404-405.

Biographies des auteurs non disponibles au moment de la publication.