複製・再配布などの二次利用はご遠慮ください

第1章 光電融合技術とその市場ニーズ

第1節 光電融合技術の概要

LitAhead Consulting
高井 厚志

はじめに

AI（人工知能）が社会生活や企業活動に大きな変革を起こしつつある。公開されてから2カ月しか経ていない2023年1月末にOpenAI ChatGPTの実ユーザーが1億人に達したことが発表され[1]世界に衝撃を与えた。AIの新しい時代が始まった興奮が世界中を駆け巡り、その後の巨大AIデータセンターへの投資競争を引き起こした。

この巨大AIシステム実現のために光技術が必須であり、その中心となるのが光電融合技術である。もちろん、光電融合技術はChatGPTの発表でにわかに出現したものではなく、光技術革新の中で巨大AIデータセンターに適用できる技術として注目されているのである。

本節では、光電融合につながる光電子回路集積化の数十年にわたる流れに触れ、次節からの最新技術への橋渡しとしたい。

1 光電融合

「光電融合」あるいは「光電子融合」とは、技術あるいはデバイスの包括的カテゴリーを示している。文字通り、光子と電子あるいは光回路と電子回路を融合させる技術あるいは融合したデバイスやシステムを示す。

従来から社会と産業インフラの中心となっている電子集積回路（Integrated Circuit：IC）の課題を解決するための手段として光技術導入の必要性の議論が起こり、光電集積化技術やデバイス/システムが研究開発されてきた。

光電集積化の歴史は古く、1980年代にはVLSI（Very Large-Scale Integration）における配線遅延などの課題解決に向けた論文が発表されている[2]。その中で、光電集積による光インターコネクト（Optical Interconnections）の導入が検討されていた。集積化技術としてハイブリッド（Hybrid）集積とモノリシック（Monolithic）集積が検討され、異種材料エピタキシー成長（Heteroepitaxy）の研究活動もあった。

その後、光電集積化技術やデバイスの研究開発そして実用化の努力は途切れることなく続いている。そして、近年、AIを含むコンピュータシステムの課題解決に向けた、新しい光電集積化の流れを象徴するために「光電融合」が使用されるようになったのだ。

SAMPLE

複製・再配布などの二次利用はご遠慮ください

「融合」の文字が使用されるようになったのは最近である。光回路と電子回路を「光電融合」するデバイス/システムを前面に打ち出したプロジェクトが、2010年に開始した内閣府支援「最先端研究開発支援プログラム（Funding Program for World Leading Innovative R&D on Science and Technology、FIRST program）」の ひとつ「フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発（Photonics and Electronics Convergence System Technology：PECST）」であった[3]。Si-Photonicsの上にロジックICチップを搭載し光回路で接続する、「オンチップデータセンター」を目標ビジョンに置いた。

さらに、2019年に光子と電子のそれぞれ得意なところを組み合わせて電子だけでは到達できない大規模なコンピュータへ向けて挑戦する研究成果が光電融合として発表された（**図1a**）[4]。フォトニック結晶（Photonic Crystal）技術を適用し送受信の光素子をμmオーダーのサイズで形成した。従来は100μmのオーダーなので100分の1以下のサイズを実証し、大規模ロジックASICチップとの集積化の実現を可能にする技術である（図1b）。サイズだけではなく電気容量や回路消費電力を桁違いに小さくし同程度にすることで光素子と電子素子を同等のように集積化し、光電融合コンピュータの実現を予言したのだ。

この後発表された情報通信基盤構想IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）で光電融合コンピュータを目指したロードマップが示され（**図2**）、光電融合が広まった。このように、「光電融合」は光電集積化を推進する日本発の先進的概念である。

2　光電集積化

2.1　光インターコネクト

先にも述べたように光電集積化の歴史は古く、初期の研究は1960年代に遡ることができる。近年では高密度・大容量、低遅延、低消費電力、小型軽量、低価格を狙ってさまざまな研究開発が行われてきた。多くはICインターフェースの高速化、特にIC大規模化（トランジスタ数増加）に伴う性能向上に見合った入出力データ量増加による高速化とシステムの大規模化による配線長増加の課題を光技術適用で解決しようとしてきた。そして、現在、大規模AIシステム構築を実現するために必要な部品として光インターコネクトが注目され、研究開発が活発となっている。光インターコネクト技術の中心が光電集積化である。

光インターコネクトは電気配線を、光ファイバーを含む光導波路に置き換えて配線を延長する技術や製品である。次節で述べるようにAIシステムの大規模化に伴い計算リソースの空間的配置が広がり、電気配線では接続できず光インターコネクトで置き換える距離になってきているのである。特に、高速同軸ケーブルを細線軽量のファイバーケー

SAMPLE

複製・再配布などの二次利用はご遠慮ください

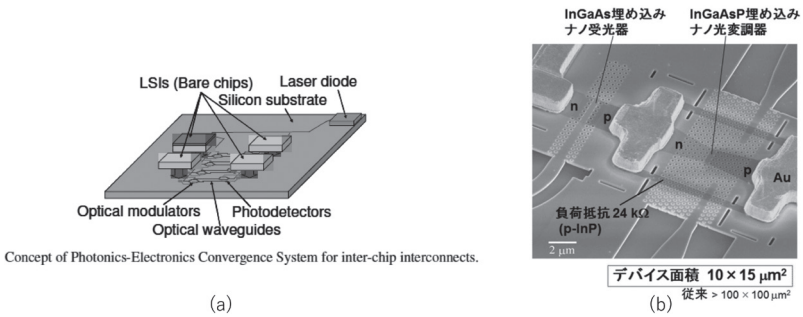


図1　a:光電子融合コンセプト[4]、b:光電融合を可能とするナノ受光器とナノ光変調器の集積[5]

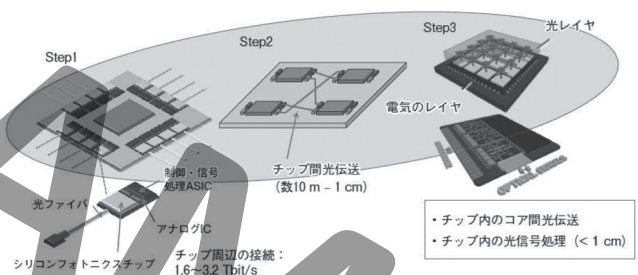


図2　光電融合技術のロードマップ[7]

SAMPLE

ブルに置き換えるのはシステム大規模化において重量や容量といった面でメリットがある。

この際、注意が必要なのは、一般的に電気配線が使用できる短距離においては低消費電力、低価格な電気配線を使用したいというユーザーの要求があることだ。このため、同じICのインターフェース回路で電気配線と光インターコネクトが使用可能になるように設計される。小中規模AIシステムで使用される電気配線を光インターコネクトで置き換え大規模化を実現するのである。

2.2　光インターコネクトの特徴

光インターコネクトは新しい技術、製品である。現在、年間数千万個のEthernet用プラガブル光トランシーバー（Front-Panel Pluggable Transceiver）がデータセンター向けに出荷され、今後も市場は拡大していくと予測されている。これに加えて、大規模AIデータセンター向けに光インターコネクトの市場が形成される。

光トランシーバーは送信部でデジタル終端され受信部でデジタル再生されている。このデジタルインターフェースにより相互接続を担保しているのである。これに対し、光インターコネクトは電気配線と同様、信号をアナログ・リニア伝送することを基本としている。

複製・再配布などの二次利用はご遠慮ください

高密度・大容量、低遅延、低消費電力を求められる光インターコネクトには新しい光伝送方式が必要となる。OIFのCPO Frame Workにおいて議論された方式を**図3**に示す。Retimed方式は光トランシーバーで使用されている方式だが、光インターコネクトへの要求を満たすことはできない。そこで、Linear Amplified、Half retimedやDirect Driveなどのリニア伝送が議論されているのである。

光インターコネクトはASIC（Application Specific Integrated Circuit）のデジタルインターフェース（電気）間の信号をデジタル終端することなく伝送する。両端にあるASICと光インターコネクトモジュール間はアナログ電気伝送、光インターコネクトモジュール間はアナログ光伝送となる。電気伝送と光伝送では異なった特性があるため、この実現には技術的な課題がある。電気伝送は一般的に直流では損失がなく周波数とともに伝送損失が増えていく。このため波形劣化、ISI（Inter-Symbol Interference）が起こる（**図4a**）。一方、光伝送は特に短距離の場合、帯域劣化は小さいが、チャネルごとにばらつく損失があることと電子–光子–電子変換効率が必ずしも高くなくSNR（Signal to Noise Ratio）が劣化することが課題である（図4b）。簡単に言うと、光インターコネクト接続の周波数劣化は電気伝送部、損失ばらつきとSNRは光伝送部で決定される。また、光素子、回路にはリニア性が悪いものもあり課題のひとつである。

2.3　光インターコネクトの適用距離

従来から、光と電気の接続に関し実用的な境界、電気伝送の上限は100 Gbit/s·mあるいは100 GBaud·mというチャネル速度と配線距離の積を用いた経験則がある。伝送材料、信号フォーマット、デバイスなどで伝送限界は異なるので厳密な法則ではないが、技術トレンドを議論するときに有用な目安である。これに従って光トランシーバーの適用範囲を見ることができる。1990年頃の1 Gbit/sのチャネル速度に対し100 m、2000年頃の10 Gbit/sのチャネル速度に対し10 m、そして近年の100 Gbit/s PAM4のチャネル速度には1〜2 mに境界があると目安計算できる。

実際、チャネル速度が100 Gbit/sを超えているデータセンターではサーバーからラック上部にあるEthernetスイッチまでの1〜3mの接続にのみ細線同軸ケーブル、いわゆるDAC（Direct Attach Cable）による電気伝送が使用され、他の接続は距離が20 m以上のため光伝送が使用されている。

ところで、光インターコネクトにおいてもこの経験則は適用できる。現在のAIシステムではラック内を100あるいは200 Gbit/sチャネル速度で1〜2 m程度の電気配線を用いて接続しているが、限界に来ていると言われている。

そこで大規模化による接続距離延伸に光インターコネクトが期待されている。光ファイバーの場合、数百mの損失は1 dB程度以下と小さく、その距離では帯域劣化もほとんどなく、SNRが確保できれば伝送遅延時間（Latency）の要求で適用範囲が決定される。例えばアナログ光回路の遅延時間は10 ns程度、20 mのファイバーの伝送遅延

SAMPLE

複製・再配布などの二次利用はご遠慮ください

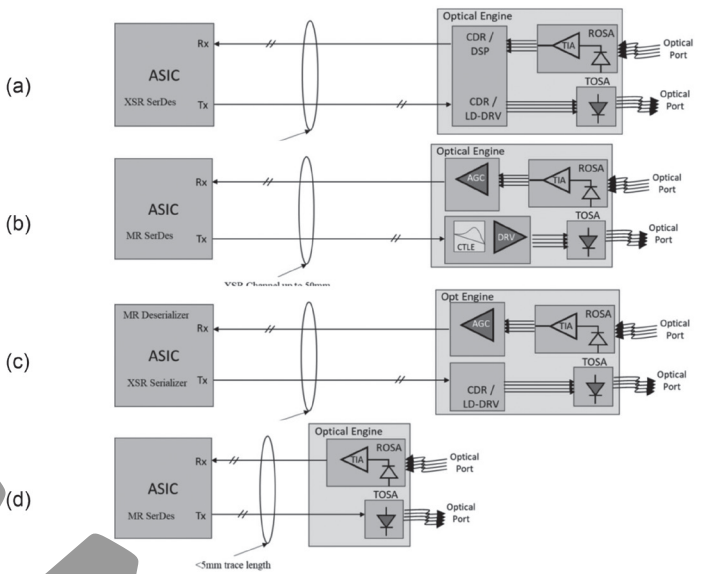


図3　OIFで議論された光インターコネクト(CPO)スキーム[8)]
a:Retimed、b:Linear Amplified、c:Half retimed、d:Direct Drive

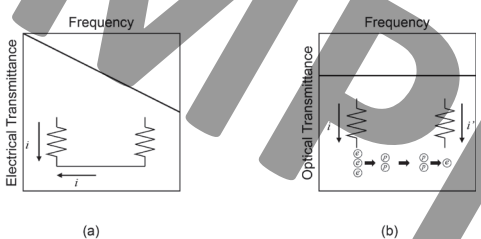


図4　電気(a)と光の(b)一般的伝送特性

SAMPLE

時間は100 nsと見積もられる（ファイバーの遅延時間はおよそ5 ns/mで計算できる）。

前述のように光インターコネクトでは電気配線部も考慮した距離を考えなければならない。つまり、電気配線の波形劣化を考慮したシステム設計が必要であり、いわゆるシステムサイドとのCo-Designが必要とされる。

2.4　In-Box光モジュール

現在のデータセンター内ネットワークではプラガブル（Front-Panel Pluggable：FP Pluggable）という、スイッチ装置の正面板（Front Panel）に配置されるトランシーバーが主流である。FP-Pluggableの最大の特徴は、同じ形状のソケットを装置内ホス