

# レーザ集積で シリコンフォトニクスの時代を切り拓く

トム・マーダー

ゲインを集積するシリコンフォトニクスは、これまで達成できなかったスケールの扉を開き、電子回路に対してかつて期待されていた、より新しい用途を実現する。

シリコンがこの数十年間、半導体業界の変革における最も重要な要素であったことは、紛れもない事実である。しかし、ムーアの法則(Moore's Law)が限界を迎え、回路はますます複雑になり、データを多用する用途が爆発的に増加したことを受けて、企業各社は、データをより高速に計算し、保存し、移動するためのさらに革新的な方法を必要としている。その結果、スケール、速度、電力が、先進的なインテリジェンスと演算ニーズの両方への対応を支える原動力となっている。

シリコンフォトニクスは、従来の電子集積回路と比べた場合のその素晴らしい性能、電力効率、信頼性によって、確かな基盤をすでに築いている。全般的な速度要件は十分に高まっており、ますます短い距離でデータを効率的に

転送するために、同技術の強みはさらに価値あるものとなっている。一方、人工知能(AI)によって演算処理は、複数のXPU(application-specific processing unit:特定用途向け処理装置)を組み合わせて統合するために、電子コンポーネントが距離を介して通信しなければならないという状態にまで、スケールが縮小している。

シリコンフォトニクスの研究と商用化の取り組みは、複数の分野で並行して急増しており、データコム、テレコム、光コンピューティングの他、ライダー(LiDAR)などの高性能センシング分野などの市場においても、そのメリットが実現されている。米ライトカウンティング社(LightCounting)の調査によると、シリコンフォトニクススペースの製品の光トランシーバー市場に占

める割合は、2018～2019年の14%から、2025年までに45%に増加して、同技術の採用の変曲点に達すると予想されるという<sup>(1)</sup>。

現行の電氣的I/Oや帯域幅のボトルネックを解消するとともに、指数的な成長と性能を達成するという既存のディスクリートコンポーネントが抱える課題を解決するために、ますます多くの企業がシリコンフォトニクスの開発で協働し、投資していることを考えれば、その予想は意外ではない。

この市場変化と熱意は、一夜にして起きたわけではなかった。

## 真空管から相互接続への進化

1920年代から1950年代まで、すべての電子コンポーネントは個々に独立した要素で、主に真空管によって、電圧が印加される電極間の電流が制御されていた。その後まもなく、最初のトランジスタが発明され、それがエレクトロニクス業界の飛躍的な進歩の始まりとなった。1つのチップに数百万個や数十億個のトランジスタを搭載する、集積回路(IC)が開発されたことにより、業界はさらに拡大した。その直後に続いたマイクロプロセッサの開発は、ポケットサイズの計算機から民生電子機器に至るまでのあらゆる製品にメリットをもたらした。

従来型のマイクロプロセッサは、



図1 オープンライト社の800G DR8フォトニクス集積回路設計(提供:オープンライト社)

1990年代にかけて速度が向上したが、2003年頃から主流プロセッサは、3GHzというクロック周波数の限界に達している。トランジスタ数は増加しているにもかかわらず、プロセッサは過熱の問題だけでなく、さらに微細なトランジスタを集積しても効率が上がらないという問題に見舞われるようになった。これは、演算チップからメモリや他の演算チップへのデータの転送を、短距離であったとしても銅線を介して行うのはもはや持続可能ではなく、さまざまなレベルで複雑さが増すことを意味していた。

そのトンネルの先にある光が、シリコンフォトニクスとなった。

業界は、光の力を利用して、半導体レーザと集積回路を組み合わせることに、活路を見出した。研究者やエンジニアは、エレクトロニクスの長年にわたる歴史と進化に着想を得て、1つのチップに機能を集積して、明確に定義された波長の光線を利用して電気的な相互接続よりも高い速度を達成するための新たな方法を考案した。

現在、レーンあたり100Gbps(50Gbpsで4レベル)のチップ用の電気的相互接続は、上述と同じ物理的な経緯をたどっており、銅線を介して信号を伝送するには、かなりのイコライゼーション性能が必要となっている。実際、レーンあたり200Gbps(100Gbpsで4レベル)になると、この問題はさらに深刻になる。

一方、光学的相互接続では、ファイバによって数テラバイトのデータを簡単に伝送できるため、これと同じ問題は生じない。簡単に言うと、情報転送にフォトニクスを活用すれば、電子的なアプローチと比べて、速度とエネルギー効率は大幅に向上することになるということである。

## 消費電力と速度に向けた取り組み

速度の向上と引き換えに、消費電力は必ず増加する。レーン数の増加であれ、高密度のセンシングであれ、テラビットの相互接続であれ、回路とその設計の複雑さが増すにつれて、ディスクリートのアプローチからの脱却が不可避となる。業界ではすでにこの動きが確認されている。企業各社は、ディスクリートの素子からシリコンフォトニクスへの移行を始めており、ゆくゆくは、光学ゲインを追加するためにオンチップにモノリシックにレーザを集積するプラットフォームへと移行しようとしている。

相互接続の世界では、ピンあたりのデータレートが今でも非常に重視される。現在、100Gbpsの相互接続は、4レベルの50Gbpsによって、50Gbpsのデータリンクで伝送されるデータ量を2倍にすることによって、実現されている。しかし、2000Gbpsの相互接続になると、電気的相互接続を介してそれだけの信号を伝送するために消費される電力がさらに増加する。最終的には、特に長距離を介した伝送の場合は、消費電力が問題になる。その結果、電気的相互接続を介してそれ以上データを伝送することは不可能になる。

光ファイバでは、そのような問題は生じない。光ファイバは、開放された1000レーン的高速道路とみなすことができる。相互接続の帯域幅を狭めることなく、データセンターほどの大きさの演算ボックスを設計することができる。しかし、ディスクリートのコンポーネント部品を使用する場合は、それらの相互接続によってプロセッサのサイズが制約される。

現在、いくつかの企業が12インチウエハを使用した、単一の大規模チッ

プの開発に取り組んでいる。相互接続は、すべてのコアが高速に機能し続けて、トランジスタが一体となって動作できるように設計されている。それでも、現代的な演算アーキテクチャがその理論的な性能限界に近づくにつれて、その帯域幅需要によって、複雑さとサイズは増加し、レーザ集積にはさらにコストがかかるようになる。標準的なシリコンフォトニクスの場合は、レーザを個別に追加する必要があり、その方法では、マルチチャンネルに対して適切に拡張できない。

## 次世代設計との相性に優れたレーザ集積

レーザ集積は、シリコンフォトニクスにおける長年にわたる課題だった。懸念の主な対象は、設計レベルに関連する物理学の最も基礎的な部分と、チップ用のディスクリートレーザの製造、組み立て、追加、アライメントに伴うコストの増加にある。レーザチャンネル数と全体的な帯域幅の増加に対応しようとすると、さらに大がかりな試験が必要になる。

これまでに、複数の光学コンポーネントを1つのチップ上に集積したシリコンフォトニクスが登場しているが、現時点で欠けている主要な要素が、ゲイン集積である。オンチップゲインは、標準的なシリコンフォトニクスの集積度を新たなレベルへと引き上げ、全体的な演算能力と処理能力を向上させる。これは、ディスクリートデバイスで達成できる速度よりも何ケタも高い、チップ間とチップ内の高速データ転送の実現につながる。消費電力を抑えるか、設計コストや製造工程を減らしつつ、さらに高い性能を提供するその高度な能力によって、この技術の採用が促進されている。

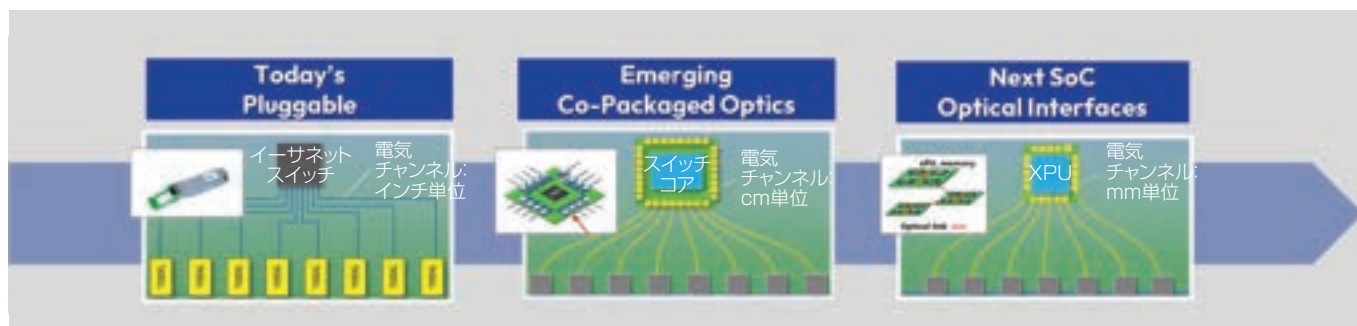


図2 コパッケージドオプティクスとシステムオンチップ(SoC)のインタフェース(提供:オープンライト社)

ライダなどの超高感度のセンシング分野を取り上げて説明しよう。コヒーレントライダでは、情報をバックアウトするために、トランスミッタからの光をレシーバーでミキシングすることが必要である。より低い消費電力でより良いレンジ情報が得られるのは、そのためである。シングルチップにレーザを集積すると、この処理は容易になる。光を分割して回路の異なる部分に配置することが可能になるためである。ディスクリートコンポーネントでこれを行おうとすると、かなりの量のパッケージングが必要になる。どれだけの効果が得られるかということは、回路の複雑さに依存するが、コヒーレントな周波数変調連続波(Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW)ライダなどのアプローチが、集積によるメリットを享受する最大の理由はそこにある。

## シリコンフォトニクスは電気的相互接続を置き換えるか

半導体レーザ用のリン化インジウム(InP)などの材料を、シリコンフォトニクスのウエハ製造工程で直接加工すれば、コストは低下し、電力効率とオンチップゲインは高まり、パッケージングも簡素化される。ディスクリートコンポーネントを使用する設計をスケールアップしようとする、歩留まりが

許容できないものになるのに対し、レーザをモノリシックに集積すれば、高い歩留まりが維持される。現時点では、数十のコンポーネントを1つの回路に集積できれば、革新的と言える。

しかし、どのような新技術を採用する場合もそうであるように、エコシステムは学習曲線をたどる必要がある。大半の製造装置はまだ、InPやヒ化ガリウム(GaAs、レーザの製造材料)などの材料をシリコンに結合する処理に対応し始めたばかりの段階にある。物理的特性や熱特性が異なるため、これを行うには、ディスクリートの場合と同等のいくつかの障壁を乗り越える必要がある。簡単に説明すると、何十年もの間、8インチや10インチのウエハとさまざまな材料純度に適切に対応してきたファブが、今度は、より新しい材料と、このプロセスを他とは一線を画すものにする、異なる設計空間の使用方法を学習する必要がある。

## ゲインを集積したシリコンフォトニクス

シリコンフォトニクス技術の進歩のペースが加速する中で、企業やファウ

ンドリは、コンポーネントと集積型ソリューションのための確固たるフォトニクスエコシステムを実現するために、協働関係とR&Dへの投資を拡大せざるを得なくなる。トランシーバーが8または16レーンに対応するようになるにつれて、シリコンフォトニクスは、より低い消費電力と理にかなったコストでそれに必要な性能を達成できる、唯一の技術となる。

用途によって複雑さが異なり、中核にある基盤回路にもよるので、完全な自律性や、先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance System: ADAS)などの分野におけるその可能性については、未知の部分があるかもしれないという意見もあるが、だからといってそのメリットが見えないということでは全くない。シリコンフォトニクスは、いずれかの時点で十分に成熟し、帯域幅、コスト、ビットあたりエネルギーなどの一部の主要指標に関して、エレクトロニクスに十分に置き換わるレベルに達するだろう。将来的には、オプティクスに移行することの最大の価値は、その応用範囲ということになるだろう。

### 参考文献

(1) See [www.lightwaveonline.com/14177636](http://www.lightwaveonline.com/14177636).

### 著者紹介

トム・マダー(Tom Mader)は、米オープンライト社(OpenLight)の最高執行責任者(COO)。e-mail: [tmader@openlightphotonics.com](mailto:tmader@openlightphotonics.com) URL: <https://openlightphotonics.com>