

# シリコンフォトニクスの研究開発動向

情報化社会の継続的な発展には、光ネットワークのさらなる大容量・高速化と、電子回路の演算高速化が不可欠ですが、高コストや消費電力急増の課題があります。シリコンフォトニクスは、シリコン上に光回路と電子回路を一体化する光電気融合によって、高機能を維持しつつ、低コスト、低消費電力の達成が期待される技術です。

いたばし せいいち  
板橋 聖一

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所

## はじめに

現代の高度情報化社会は、情報を伝達する大容量・高速通信ネットワークと、情報を高速で演算処理する電子回路の両輪によって発展してきました。この仕組みは大容量・高速通信を可能にする光通信技術と、大規模電子回路（LSI）の高速化を可能にするシリコン集積回路技術によって支えられています。特に、シリコンという素材の優れた材料特性と微細加工性を活用した量産技術の高度な発達が、1千万個オーダーのLSIの低コスト生産を可能にし、膨大な数の高性能情報機器普及の原動力となってきました。

高度情報化社会の継続的な発展には、光ネットワークのさらなる大容量・高速化と、電子回路の演算処理能力の向上が不可欠です。しかし一方で、経済的な観点からは、高機能化と同時に低コスト化が求められ、さらに、近年重要度を増している地球環境への負荷低減の観点からは、電子回路の高速化に伴うLSI自体の消費電力の増加と、LSIを使用した膨大な数の情報機器と、それを使用したネットワークシステムの消費電力急増の課題を解決していく必要があります。

シリコンフォトニクスは、図1に示すように電子回路の基盤となる素材であるシリコンを用いて、光素子のシリコン化と超小型集積化を進め、最終的には、シリコン光回路とシリコン電子回路を集積によって一体化する光電気融合を目指す技術です。シリコンを用いることで、電子回路を低コストで生産できる高度な量産設備を活用することが可能となり、ネットワークを支える光デバイスの高機能と低コストの両立による経済化が期待されます。同時に、光回路とそれを制御する電子回路の一体化や、LSI中の信号伝送への光

通信技術応用等を通じた光電気融合によって、高機能ながら消費電力を抑えた情報機器開発によるネットワークシステムの消費電力抑制も期待されます。

本稿では、まずシリコンフォトニクスの技術的特長と応用について述べ、続いて世界的な研究開発動向について報告し、最後に、通信応用に向けたNTT研究所のシリコンフォトニクス研究開発の取り組み状況について述べます。

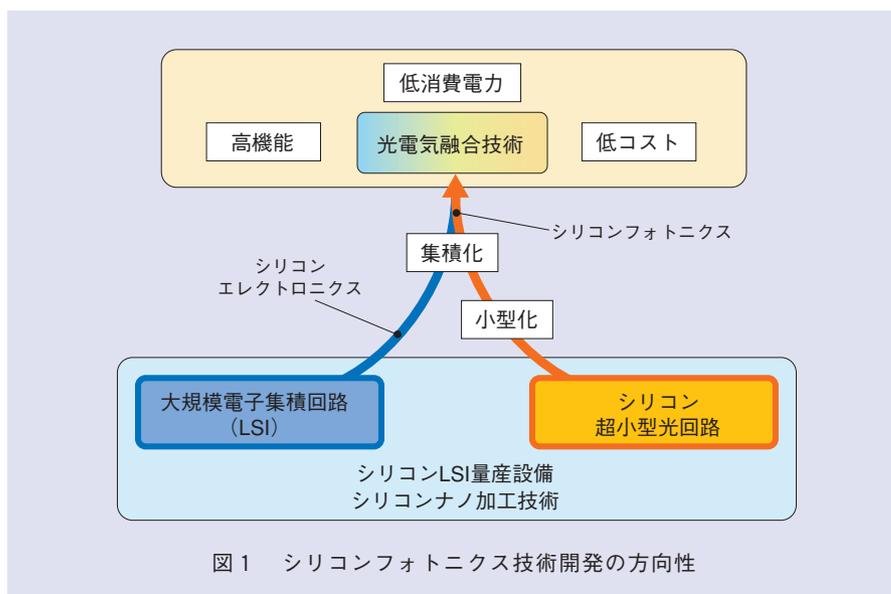


図1 シリコンフォトニクス技術開発の方向性

## シリコンフォトニクスの特長と応用

シリコンフォトニクスは図2に示す特長を持っています。

- ① 通信波長帯の光を通し、屈折率の大きなシリコンを用いることで、光導波路を超小型化（大きさが数百ナノメートル\*）して、光回路の小型・集積化が可能。
  - ② LSI製造用の完成された量産技術と設備を活用できるため、光デバイスの低コスト化が可能。
  - ③ 光回路と電子回路を集積して一体化し、光技術と電子技術の特長を活かした高機能光電気融合デバイスの構成が可能。
  - ④ シリコンの材料特性、シリコン中のキャリアを用いた光制御性、光の極微小領域閉じ込めによって生じる光と物質の強い相互作用等を活用して多様な機能の発現が可能。
- はじめに、このような特長を持つシ

リコンフォトニクスを通信に応用する試みについて述べます。現在の光デバイスは、光ファイバ、波長フィルタ、変調素子、受光素子、発光素子と、これらを制御する電子回路等から構成されていますが、それぞれが異なる材料で個別部品として製作され、各部品を組み合わせる実装しなければならないことから、低コスト化が難しい課題を抱えています。この課題解決に向けて①、②の特長を活かし、シリコン基板上に、シリコン光素子やLSI量産プロセスと同時に形成可能な材料で構成した光素子を同時に集積することで小型・低コストな光デバイスを実現する研究開発が進んでいます。現在、波長フィルタ、変調素子、受光素子については量産プロセスで形成する技術が進展し、集積化が検討されています。一方で、実用的な特性を持ったシリコン発光素子が開発途上のため、シリコンとは異なる材料でつくったレーザを貼り合わせて搭載する研究が並行して行

われています。

通信応用だけでなく、半導体分野でもシリコンフォトニクスの特長を活かして電子回路の消費電力増大の課題を解決する試みが進められています。現在、電子回路の高性能化のトレンドを維持しつつ消費電力を抑制するために、コンピュータの頭脳であるCPUコアを複数接続するマルチコア化が進んでいます。マルチコア化では、コア間で大量の信号を高速に伝送させる必要がありますが、金属の配線では信号遅れや消費電力増加による限界がみえてきました。そこで特長①の小型化と、③の光回路と電子回路の集積性を活用し、コア間の大量信号伝送を波長多重光回路で行うことで、金属配線の限界を打破する、光電気融合による光インタコネクション技術の研究が進められています。

さらに、特長④を活用することで、多様な機能デバイスを実現する応用も進展しています。

### 世界のシリコンフォトニクス研究開発動向

シリコンをベースにした光回路が提唱されたのは古く、1990年代に米国のR.A.Sorefによってでした<sup>(1)</sup>。ただ、シリコンベースの光回路は大きさが数百ナノメートルと超小型になるため、その実現にはナノメートルの構造を高精度に加工する微細加工技術の進歩が必要でした。2000年代前半に、加工技術の発達と前述した課題の浮上に伴って、シリコン光回路の研究が盛んになり、インテルがシリコン光回路でラマン散乱を利用した光源が可能であることを示すことで、シリコン上にすべての光素子を搭載する低コストの送受信器を実現する構想が注目を集めました。

\* ナノメートル：1mmの百万分の1。

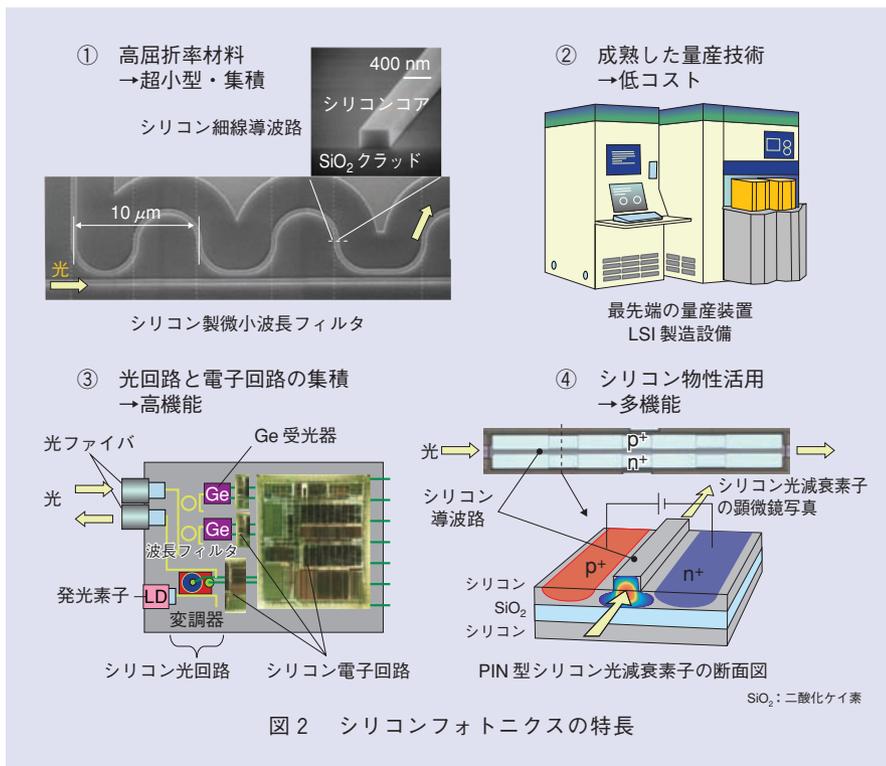


図2 シリコンフォトニクスの特長

2000年代後半に入って、シリコン光素子とその集積化技術を対象とした研究全体を、シリコンフォトニクスと呼ぶことが定着するようになり、現在では、米国、欧州、アジアでそれぞれ特徴を持った研究開発が進められています。

米国においては、多くの企業・大学がシリコンフォトニクスに取り組んでおり、MIT (Massachusetts Institute of Technology) では、シリコンフォトニクスのテクノロジーロードマップを策定し、技術開発の先導を図っています。2009年に公開予定の最新のロードマップCTR II<sup>(2)</sup>では、技術の開発目標時期が5年前倒しされ、シリコンフォトニクスに対するニーズの顕在化を示して技術開発の加速を促しています。米国におけるシリコンフォトニクス開発の特徴は、超高性能コンピュータシステムを実現するための技術と位置付け、公的なDARPA (米国国防高等研究計画局) プログラムを中心に、国策として技術開発が推進されている点にあります。これまでに、光回路と電子回路とをシリコンCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを用い、同一シリコン基板上に形成して動作することを実証し、光電気融合が可能であることを確認してきました。現在は、この成果を基にマルチコア間を接続する光インタコネクションによって、シリコン基板上にスーパーコンピュータを実現する技術開発プログラムが進められています。

一方、欧州においては、コンピュータや通信、センサ等の幅広い応用を見据えた要素技術開発がIMEC (Interuniversity MicroElectronics Center) 等の公的な機関を中心に進められています。グローバルなシリ

コンフォトニクスのファンドリサービスが実施され、最近になって、サービスを利用した大学・企業の研究成果報告が数多くなされるなど、効果が出てきています。

日本では大学を中心に、主に材料開発等の基礎的研究開発が進められ、2006年からは国家プロジェクトにおいて、電子回路システムへの応用を目的とした光配線研究が開始され、成果を上げています。アジアでは、シンガポールのIME (Institute of MicroElectronics) が事業化までをサポートする特色を持ったファンドリサービスを開始しました。

このように、システム開発から基礎技術まで幅広い分野をターゲットに、世界中でシリコンフォトニクス研究開発競争が盛んになっています。

### NTTにおけるシリコンフォトニクス研究開発

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所では2000年初頭から、通信応用を目指して、シリコンフォトニクス研究開発を進めてきました。これまでに、シリコン光素子を光通信に適用していくためにクリアすべき以下の課題に取り組み、解決してきました。

- ① 大きさが数百ナノメートルのシリコン細線導波路では、導波路表面のわずかな凹凸でも光が散乱されてしまうために光の伝播損失が大きくなり、光が通らない。
- ② シリコン細線導波路の断面積が光ファイバコアの1 000分の1と大きく異なるため、光ファイバとシリコン光回路の直接接続が困難。
- ③ シリコン細線導波路の縦横の形状がわずかに異なっても伝播する光の偏光状態による差が生じる(偏波依存性)。

まず、もっとも基礎となる①の課題を解決するために、低損失光導波路形成技術開発に取り組みました。その結果、光導波路に適したナノ加工技術開発により、世界でももっとも小さな損失(約1 dB/cm)のシリコン細線導波路を実現しました<sup>(3)</sup>。

続いて②の課題を解決するために、光ファイバとシリコン導波路の間に、独自の逆テーパ型スポットサイズ変換器を配置することで、0.5 dB/pointの低損失で接続が可能であることを実証しました<sup>(4)</sup>。この2つの成果は、波長フィルタや変調器のような機能を持った超小型光素子の製作と正確な評価を可能にする、世界的にも最先端のものであります。

さらに、③の偏波無依存化技術に取り組む、偏波を分離、回転させて処理し、再度合波させる、現実的な超小型偏波ダイバーシチ回路が実現可能であることを実証しました。技術の詳細については本特集『極微小シリコン光回路の偏波無依存化技術』を参照してください。

現在は、シリコンフォトニクスの目標である、光電気融合デバイス実現に向けて、光素子集積、電子回路との集積技術開発に取り組んでいます。光素子集積では特に、シリコン基板上にシリコン素子とシリコンと異なる材料からなる素子を搭載する際に、個々の素子性能を維持したまま集積する技術開発が鍵になってきます。本特集『光電気融合に向けた極微小シリコン光デバイスと集積技術』では、集積の一例として、シリコン光素子に加えてGe (ゲルマニウム) を素材とした受光器を集積した成果について述べています。

さらにNTTフォトニクス研究所では、シリコンの物性を活かしてネットワークに用いられている光デバイスの消費

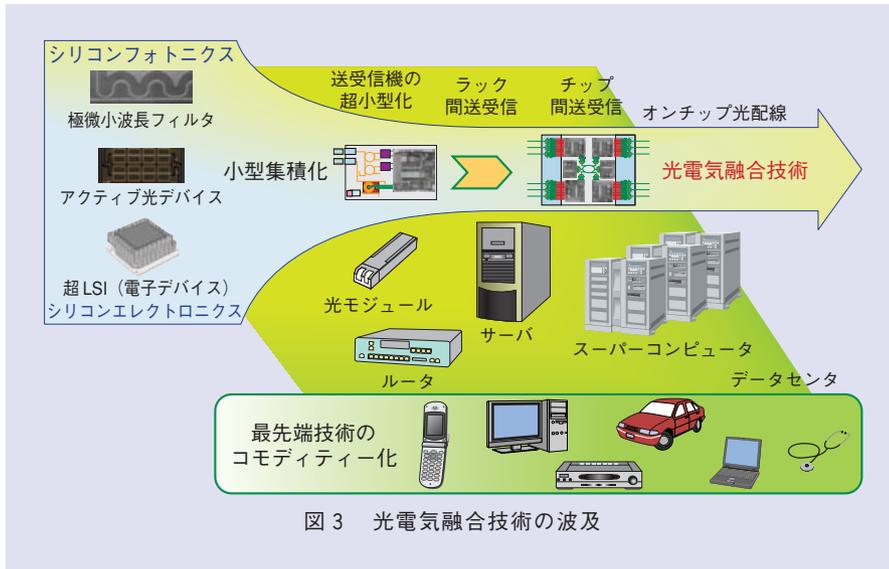


図3 光電気融合技術の波及

電力を下げるために、石英を素材とする光デバイスに、シリコン細線導波路を埋め込んで、低消費電力化する研究も進めています。現在の光ネットワークにおいては、石英を加熱してその屈折率を変化させ、光の強度や経路を制御するTO（熱光学）素子が用いられています。シリコンは石英に比して屈折率の温度係数が一桁以上大きいため、石英導波路の中にシリコン導波路を埋め込むことで、より小さな電力で動作するTO素子の実現が期待されます。技術の詳細は本特集『シリコン-石英ハイブリッド光スイッチ』を参照してください。

またNTT物性科学基礎研究所では、シリコンフォトリック結晶中の導波路や共振器において、光の進む速度が遅くなる現象や、超小型共振器構造を活用して、超低パワーで動作する光メモリや光スイッチの研究が進んでいます。技術の詳細は本特集『シリコンフォトリック結晶共振器による超小型光遅延線の実現』を参照してください。

さらに、究極の高セキュリティ通信実現が期待される量子暗号通信において、通信距離を伸ばすために必要な量子もつれ光源を、シリコン細線導波路

を用いて開発する研究も進んでいます。シリコン細線導波路中では強い光強度が得られ、光と物質との相互作用によって非線形現象を誘起することができます。特に、自然放出4光波混合と呼ばれる非線形過程により、量子もつれと呼ばれる状態にある光子対を発生することができます。量子もつれ光子対は、一方の光子を観測すると、もつれ状態にある他方の光子の状態が確定するという特殊な性質を持っています。この性質を利用することで、長距離の量子暗号通信が実現できます。詳細については本特集『シリコン細線導波路を用いた量子もつれ光子対発生』を参照してください。

このように、NTT研究所では将来の通信を革新するデバイスを実現するために、シリコンフォトリックの研究開発を着実に進めています。

### まとめ

シリコンフォトリックとこれを基盤にした光電気融合技術は、光デバイスや情報機器の高度化だけでなく、これらを用いたネットワークの柔軟な運用を可能にし、トータルで低コスト、低消費電力を実現するなどの波及効果が

期待されます。さらにこの技術は、図3に模式的に示すように、光電気融合で実現されるスーパーコンピュータに代表される最先端技術が、コモディティ化していく過程であらゆる電子機器の中に取り込まれることで、高度情報化社会の基盤となるポテンシャルを持った技術です。NTTではこれらの技術開発を通じて社会に貢献していきます。

### 参考文献

- (1) R.A.Soref: "Silicon-based optoelectronics," Proc.IEEE, Vol.81, No.12, pp.1687-1706, Dec. 1993.
- (2) <http://mpc-web.mit.edu/>
- (3) 山田・土澤・渡辺・福田・篠島・板橋: "シリコン細線導波路の作製およびその関連技術," レーザー研究, Vol.35, No.9, pp.550-555, 2007.
- (4) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita: "Microphotonics Devices based on Silicon Microfabrication Technology," IEEE J. Select. Topics in Quant. Electron., Vol.11, No.1, pp.232-240, 2005.



板橋 聖一

シリコンフォトリックは大きな可能性を持った技術です。NTTグループと世の中に役立つ技術になるように、スピード感を持って取り組んでいきたいと思っています。

### ◆問い合わせ先

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所  
ネットワーク装置インテグレーション研究部  
ナノシリコンテクノロジーグループ  
TEL 046-240-2588  
FAX 046-270-2372  
E-mail itabashi@aecl.ntt.co.jp