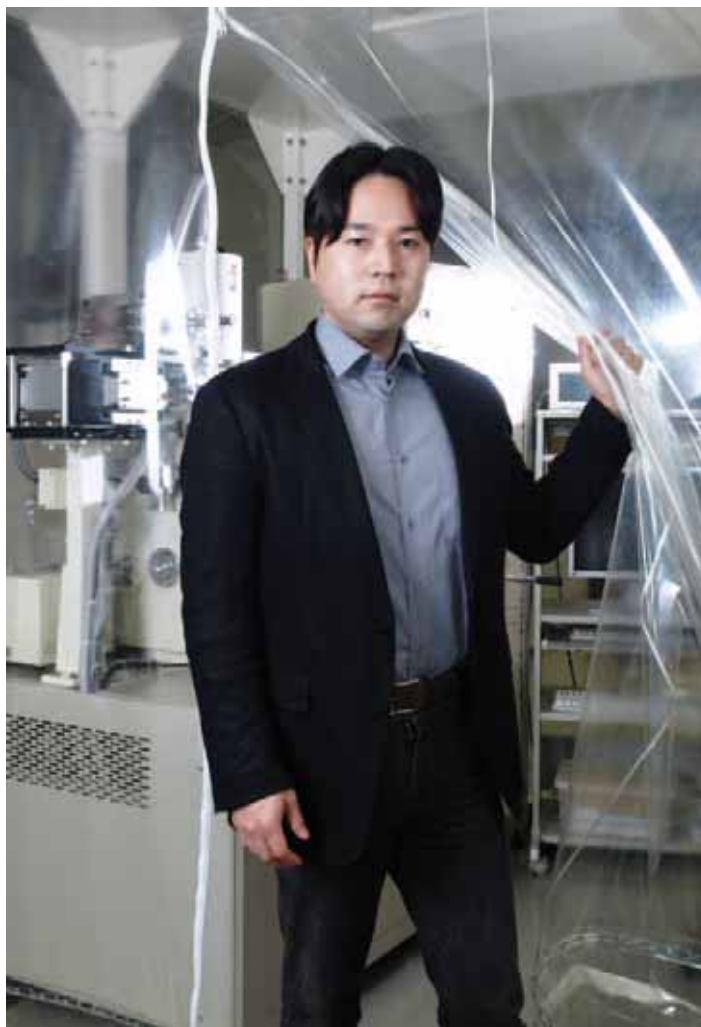


有機・シリコン融合フォトニクスによる  
オンチップ超高速光通信デバイス

## 最先端ナノ光デバイスが 性能限界を打破する

情報通信システムの巨大化が進むなかで、どのように消費電力の増大を抑えながら、ICT 機器の小型化や通信速度の向上を実現していくかが、極めて重要な課題となっています。この問題に対し、私たちは「有機材料とシリコンフォトニクスとの融合」が光信号処理の超高速化や低消費電力化、集積化に画期的なブレイクスルーをもたらすと考え、独自の視点から有機・シリコン光集積回路の研究開発を進めています。



### 光デバイスの課題

情報通信処理の光化が進めば、処理速度や発熱の問題が解決されるだけでなく、消費電力についても大幅に削減できます。しかしこれまで、光ファイバー通信などの長距離伝送用途以外ではほとんど光化は進んでおらず、システムの信号処理部分では、いまだに電子回路に頼っています。これには様々な要因がありますが、特に大きな問題は、光デバイスが電子デバイスと比べて桁違いにサイズが大きいこと、そして高価なことです。つまり、光デバイスの性能が高いことは間違いないのですが、それだけで普及するわけではなく、サイズやコスト面も含めたトータルな価値が電子デバイスを上回らなければ、特殊用途以外、広く使わ

ナノICT研究室  
主任研究員

## 井上 振一郎

Shin-ichiro Inoue

博士(工学)

### 学歴

2004年 東京工業大学博士課程修了

### 略歴

2004年、理化学研究所基礎科学特別研究員、2007年、九州大学先端物質化学研究所助教を経て、2010年より現職。神戸大学工学研究科准教授(連携講座)、および理化学研究所客員研究員を兼任。船井情報科学奨励賞、安藤博記念学術奨励賞、光科学技術研究振興財団研究表彰など受賞。

### 研究分野

光エレクトロニクス、ナノ微細加工、有機非線形光学、ナノフォトニックデバイス

### 近況

ハードな毎日なのでオフの切り替えは大事にしています。5歳と1歳になり日々成長していく息子たちと過ごす時間が、何より活力を与えてくれます。

れる技術には決してなり得ません。

情報処理の光化を進めるには、複雑な論理処理に優れた電子集積回路と、高速化・省エネルギー化に有利な光集積回路とを融合する技術の開発が不可欠です。そこで特に重要になるデバイスの1つが、電気信号を光信号に変換する光変調器です。現在は、電気光学効果が大きいニオブ酸リチウム(LN)が主に用いられ40Gbpsの光変調器が実用化されています。

また、有機電気光学(EO)ポリマーを用いた光変調器も近年盛んに研究されています。2000年代初頭にはLNをはるかに超える材料性能をもつ有機EOポリマーがワシントン大学のグループによって開発され、2007年にはアリゾナ大学のグループからLNの5倍以上の材料性能(EO係数170pm/V)をもつEOポリマー変調器が報告されています。そして、米国Gigoptix社からは100Gbpsという超高速な有機EOポリマー変調器がすでに商用化されています。

しかし、これらの光変調デバイスはすべて、サイズが数cm以上であり、電子デバイスと比較すると桁違いの大きさです。電子デバイスでは微細化が極限まで進んでおり、フィンガーサイズのチップに数十億個のトランジスタ素子が集積化されています。そのため、1素子あたりのコストも非常に小さくなります。よって、光デバイスが電子デバイスに置き換わるためには、帯域などの性能向上だけでなく、電子デバイスとのサイズ、コスト面のギャップをどの



図1 超高速・光/電子融合集積チップの概念図。

ように埋めるかがきわめて重要な課題となります。

### シリコンフォトニクス

このような光デバイスと電子デバイスのサイズ、コストのギャップは「シリコンフォトニクス」という新たな技術分野の登場により、その差が急速に埋まりつつあります。シリコン(Si)はご存じの通り電子デバイスの根幹をなす材料ですが、光デバイスにおいても2000年代以降、国家プロジェクトや産業界が牽引する形で開発が本格化し、瞬く間にシリコンフォトニクスが最注目の技術分野として認識されました。

従来、シリコンは電気光学効果をもたず、材料の特性上、受光・発光素子としても適さないため、光デバイスには不向きな材料として長年ほとんど無視されてきました。しかし、近年のデバイス構造の最適化や微細加工・プロセス技術の発展によって、高速なシリコン光変調器や光検出器などの要素技術が次々と開発され、光と電子素子を融合する、現実的な技術として期待されています。

シリコンフォトニクスの大きな利点のひとつは、屈折率の差を大きくとれるため、従来の石英系やポリマー系の光回路と比べて、その回路サイズや断面積を約1/1000に小型化できることです。その結果、電子

回路と同じチップ上に光回路を集積化するような技術が可能になります。また、シリコンフォトニクスのもうひとつの大きな特徴は、シリコンLSIチップを製造するための施設であるCMOSファウンドリーを転用して、大規模な光集積回路を圧倒的に低いコストで製作できることです。これは応用上とても重要な要素で、将来的には単純なLN、EOポリマー光変調器などの従来の非集積型光デバイスのほとんどはシリコンフォトニクスに置き換えられる可能性があります。

電子デバイスの性能が限界に近づきつつある現在、CPUのメモリア化や電気配線の複雑化による信号遅延、発熱量の問題が顕在化しています。このため、電気メタル配線の代わりに、光インターコネクションという、シリコン光配線・光回路を用いる短距離・オンチップ高速光通信技術の開発が急速に進められています。

### 有機材料とシリコンフォトニクスとの融合

シリコンフォトニクスは集積化に優れ、大規模光回路の大量生産、低コスト化が期待できますが、シリコンはEO効果をもたないため、光変調の動作原理としてキャリアプラズマ効果(キャリア濃度の密度変化)

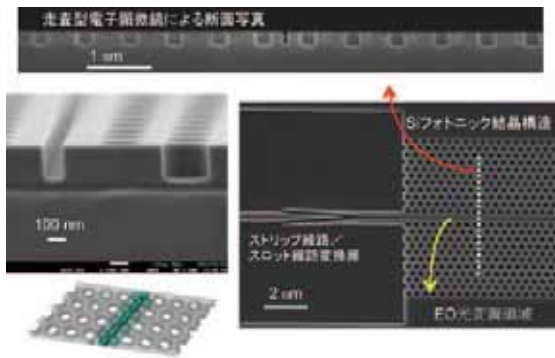


図2 有機・シリコン融合型ナノフォトニックEO変調デバイスの電子顕微鏡（SEM）写真。

を利用しており、動作速度としては40GHz前後が限界となります。よって、将来100GHz以上の超高速な光変調素子の集積化を実現しようとした場合、まったく新しい光デバイスのデザインが必要となります。

現在、産業界では、10Gbpsもしくは40Gbpsの光信号を、波長・偏光・空間的に多重・並列化することによって高速データ通信を実現しようと開発を進めています。しかし、情報通信量（トラフィック）の急拡大を背景に、近い将来、必ず根本的な速度の向上、つまり100GHz以上の超高速な光集積回路が必要になる時期が来ると想定されます。

そこで私たちは、これらのバリアーを打破するため、有機材料（EOポリマー）とシリコンフォトニクスとをハイブリッドしたナノフォトニックデバイスの研究開発を進めています。EOポリマーはLNよりはるかに大きな非線形光学特性を持っているので素子の低電圧化が可能であり、さらに光波と高周波帯の屈折率差がきわめて小さいため、100GHz～THzにいたる超高速な光変調が可能です。一方で、有機材料は屈折率が小さいため、従来、集積化には向かないと考えられてきました。しかし、有機材料は、様々な異種材料と組み合わせることができるため、シリコンとのハイブリッド構造を実

現することで、ナノ領域で光を閉じ込めることも可能になります。

したがって、シリコンフォトニクスと有機

材料、両技術のメリットを融合することで、超高速な光制御デバイスの集積化を実現することができると考えています。

#### スローライトやシリコンナノテクノロジーを駆使したデバイス開発

このようなナノフォトニック構造では、「スローライト」という光の速度を1/100程度まで人為的に減速させた極限的な光状態をつくり出すことが可能です。これにはフォトニック結晶という光波長程度の周期構造を利用するのですが、スローライト効果を用いることで、物質の非線形光学効果が大幅に増強されます。したがって、光デバイスのサイズをさらにコンパクト化するとともに、大幅な低消費電力化が可能です。これらの技術を複合すれば、電子デバイス並みに光デバイスを極小化し、ワンチップ上で電子集積回路のポトルネックとなっている部分を光に置き換えた究極の超高速・光/電子融合集積デバイスの開発も可能になります（図1）。

私たちは、有機材料の開発、製膜・分子配向プロセスから世界最高精度のシリコンナノ微細加工技術、ナノ光デバイスの性能評価や理論解析にいたるまで、全行程の研究開発を一貫して行っています。このような有機・シリコンフォトニクス融合研究

を総合的に進めているグループは、世界的にみても未来ICT研究所が唯一です。

#### 研究開発の現状と展望

現在、私たちは、有機EOポリマーとシリコンナノフォトニック構造を融合させるプロセス技術を独自に開発し、ナノオーダーで高精度な有機・シリコン融合型ナノフォトニックEO変調デバイスの作製に成功しています（図2）。また、シリコンフォトニック結晶構造によるスローライト効果と有機材料の優れたEO特性を融合することで、現在実用化されているLN光変調器の10倍以上の性能指数（電気光学係数）をもち、素子サイズが従来の1/1000以下のシリコン・有機EOポリマー融合型フォトニック結晶EO変調器の動作実証にはじめて成功しています。

シリコンフォトニクスによるエレクトロニクスとフォトニクスの本格的な融合は、情報通信技術に根本的な変革を引き起こす可能性があります。その中で私たちは、シリコンフォトニクスと有機材料の融合をキーワードとし、双方の長所をリンクすることで、従来の光素子では不可能だった、様々な新しいオンチップ光技術への展開をはかっていきます。100Gbpsを超える超高速光変調デバイス、光・電子融合集積回路の開発以外にも、全光スイッチングや光バッファ、超高感度センサー、さらにはバイオフィotonics応用など、広範な分野・領域への波及効果、展開が見込まれます。