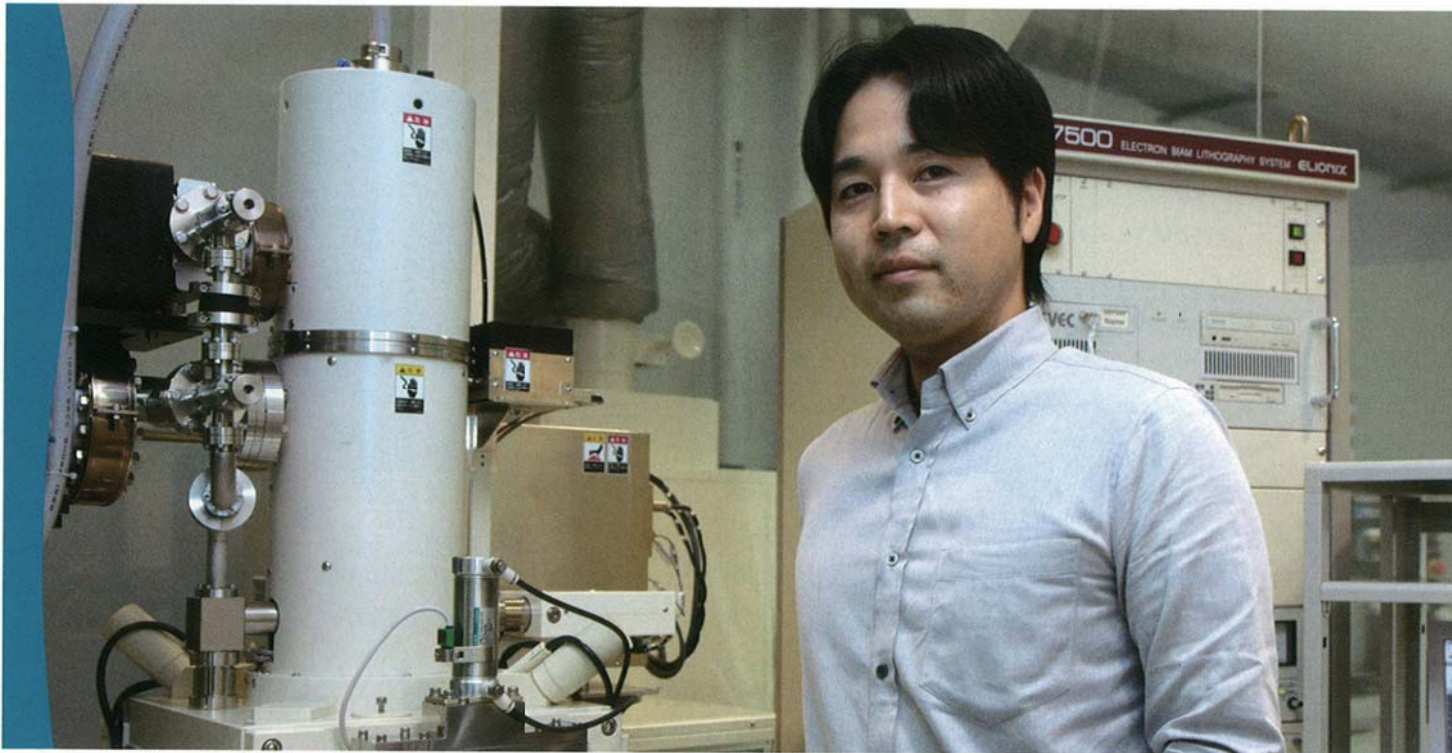




## 特集 I

# 光科学技術における本格的なブレークスルーを追求し、光デバイスの未踏領域を切り拓く

分子フォトリックプロジェクトの井上主任研究員は、スローライト（極限的に光を減速させる技術）などの光の本質的な制御技術の開発、有機材料とシリコンデバイスの利点を両立させる新たなナノ複合化技術の開発を行い、次世代の超高速光情報処理分野における画期的なブレークスルーをめざしている。有機材料をもちいて、従来素子性能の限界を打破する超小型・極低消費電力、且つ超高速な光デバイス実現に挑む現状について語ってもらった。

## 研究の背景

**Q:** 次世代の情報媒体は光だといわれていますが、電子と光ではどんな違いがありますか。

**井上:** 現在の情報システムを構築している電子デバイス、シリコン・エレクトロニクスは登場以来すでに数十年をへて成熟期を迎え、その到達点は物理学的な限界にすら達しつつあります。にもかかわらず、現代の情報トラフィックの増大は留まることを知らず、さらに高速な情報媒体が求めています。これに応えることができるのは、フォトリックデバイスであり、ナノフォトリクスこそが唯一の解決策と考えられます。

光は非常に高速な情報媒体で、長距離を低ロスで伝搬でき、発熱も少ないという特徴があります。しかしその一方で、光は物質との相互作用が小さく、また回折の効果によって急峻に曲げることができず、通常ワンチップの中に集積化することが困難です。このため現状の光変調器などのデバイスは、単体でも数センチメートル程度と非常に大きなサイズとなってしまっています。

一方で電子デバイスは集積化には有利で、年々微細化を進めることで、性能の向上と大量生産による低コスト化が図られてきました。しかしこれ以上の集積化を進めることはトンネル電流や発熱の問題から原理的に困難になります。また集積化が進むと、電子同士が互いに影響を及ぼす多体効果などにより理論予測が難しくなり、設



計と実際の結果とが合致しにくく、試行錯誤に頼る以外にないという問題点があります。

これに対して光デバイスは、厳密な理論計算に沿ってデバイス設計をすれば実際の実験と非常によく一致し、ロジカルに設計しやすいというメリットがあります。よって新しい発想次第で、思い通りの斬新な動作が見込めます。

### 無機材料から有機材料へ

**Q:有機材料、ナノ光デバイスに注目する理由は何ですか。**

**井上:** 光変調器や光スイッチなどの非線形光学材料として、現在は主に無機素材のLN(ニオブ酸リチウム)単結晶が使われています。また光と物質との相互作用が小さいことをカバーするためにデバイス長を大きくして相互作用長を稼ぎ動作させています。

これをどう小さくし、ワンチップ上に集積するかが世界的に大変重要な課題になっています。ここで、この問題を解決できる最も有望な手法の一つが、有機材料を用いたナノフォトニックデバイスであると考えています。

共役した $\pi$ 電子結合(炭素-炭素間の不飽和結合)が、鎖状あるいは平面状に繋がった共役 $\pi$ 電子系有機材料は、 $\pi$ 電子の非局在化によって、LNなどの無機・半導体を遥かに凌駕する極めて大きな非線形光学性能を有しています。また有機材料は、フレキシブルな機械的特性をもち、どんな材料とでも組み合わせることができます。この特性から発想したものが有機材料とシリコンデバイスをハイブリッドしたナノフォトニックデバイスです。

従来、有機材料は性能が高いものの屈折率が低く、集積化には向かないと考えられてきました。しかし屈折率の高いシリコンと組み合わせることで、ナノ領域での光閉じ込めが可能となり、様々な新しい集積化光制御が実現できるようになります。

例えば、有機ナノフォトニック構造を周期的に操作することで、光の速度を1/100程度まで減速させたスローライトという極限的な光状態を創り出すことが可能となりま

す。エネルギー保存則から、光の強度は群速度に反比例するため、このスローライトと高密度なナノ光空間を利用することで、光と物質の相互作用を数百~数千倍以上に増幅することができます。

光の相互作用が大きくなれば、デバイスをコンパクトにできるばかりでなく、劇的な低消費電力化も実現でき、発熱の問題も解決できます。距離が短くなれば当然高速化にも貢献します。また有機材料とシリコンとのハイブリッドデバイスは、現在使われているLSIなどのシリコン電子デバイスと共存した複合デバイスの実現も可能になります。

### 過去の資産を生かせる光と電子の融合

**Q:フォトニクスとエレクトロニクスとの複合デバイスには、どんな利点がありますか。**

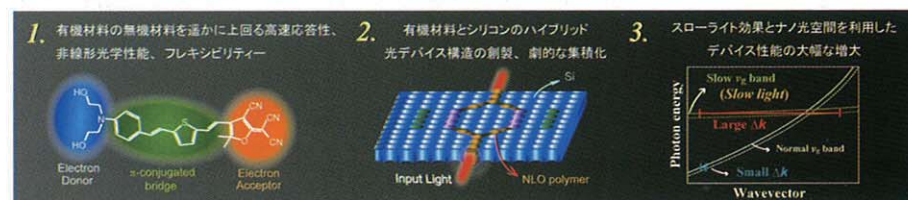
**井上:** これまでに蓄積されてきたエレクトロニクスの技術は非常に有用です。有機ナノ光デバイスとエレクトロニクスが融合した複合デバイスを実現すれば、過去の蓄積を継承しつつ、現在の電子デバイスのボトルネックとなっている発熱箇所や高速信号処理が必要な部分だけを光に置きかえた超高速・集積化デバイスを実現できます。

### 加工技術の確立がナノ光デバイスの鍵

**Q:実用化にはコスト面などが重要ですが、有機材料はその点についてはいかがですか。**

**井上:** LNなど無機材料は価格的に非常に高価であるだけでなく、レアアースなどの希少な原料が必要となります。さらに加工性が悪くナノ微細加工に不向きで作製プロセスが大掛かりになり加工コストも高くなります。

一方、有機材料は炭素や水素などのありふれた原料で構成され、シリコンテクノロジーとの整合性も良く、スパインコート法などにより大口径ウェハープロセスで薄膜を形成できるため低コストです。加えて、金型モールドを有機材



**図1** 有機材料を用いたナノフォトニックデバイスのメリット

従来型光デバイスと比べ、劇的な低消費電力化、集積化、高速化が実現可能



料にスタンプのように押しつけて導波路などを成型するナノインプリント法が使えます。この手法ならば微細加工の時間や工程を効率化でき、低コスト・処理速度の大幅な向上がはかれます。

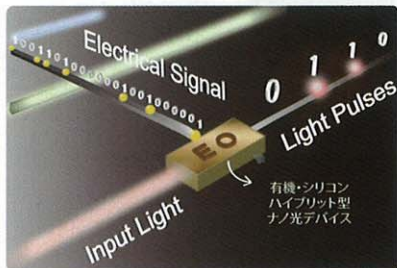


図2 光/電気ナノ・ハイブリッド型デバイス

電子バスを光バスに超高速に置き換える電気・光信号変換処理をコンパクトな1チップ内に集積化することができる

### ナノ光デバイスの拓く未来

Q: 有機ナノ光デバイスの実用化と方向を教えてください。

井上: 有機材料は、その長期耐久性・劣化の問題をどう克服するかが実用上極めて重要な課題です。現在研究開発を進めている極低エネルギー動作化の実現によって、有機分子・高分子系光デバイスを将来実用化する上で鍵となる長期安定性・信頼性についても、従来とは異なる切り口から、新たな解決の突破口を与えるものと期待しています。

また有機ナノ光デバイスは、素子の低消費電力化、高集積化を可能とするばかりではなく、外部シグナルに対して極めて高感度なセンサーも実現することができます。光は外来の電磁波などによるノイズに強いというメリットもあり、極めて微弱な生体や人体の情報を取り込むバイオセンシングも視野に入ってきます。例えば、脳内のシグナルを光で取り出し、考えたことをコンピューターなどの外部の機器に伝えるというような高度光センシングネットワークも実現できるかもしれません。

これまで優位性は認められつつも、実用上ではさまざまな制限があった光デバイスですが、有機ナノ光デバイスの開発によってこれらの問題を解決する突破口を開けると信じています。将来的には、有機ナノ光デバイスを核として、現在の電子デバイスに代わる、ワンチップのオール光デバイスの実現や、超小型・高感度、フレキシブルな光デバイスによる生体・安全・環境分野への波及、貢献までを見据えて研究を進めています。

### KARCの研究環境

Q: 大学から研究の場を KARC に移したことで、変わったことはありますか。

井上: KARC はナノ光デバイス開発に不可欠なクリーンルーム、大型の微細加工機器など、高いレベルの設備が充実しています。また、NICT は情報通信に特化した機関ですから、統一された方向性で異なる専門分野の研究者が集中し、システム、アルゴリズム、標準化、脳についてなど最先端の情報を手に入れ、指向性の高い論議を深め研究を進めていけます。

情報通信の基礎研究、脳情報、バイオ ICT などが研究されている KARC ならば、光デバイスの研究を進めながら、脳情報とのリンク、脳シグナルの光を使ったモニタリング、光とバイオの融合などのチャレンジングな分野の開拓も可能だと思います。

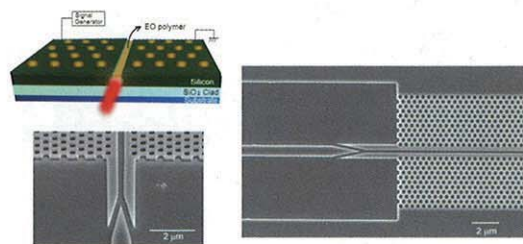


図3 提案する有機・シリコン集積型ナノフォトニック素子

高精度なナノオーダーの微細加工を実現し、有機材料とシリコンデバイスをナノ領域でハイブリッドすることで、互いの優位性を引き出すことが可能となる



神戸研究所 未来 ICT 研究センター  
ナノ ICT グループ 分子フォトニック  
プロジェクト 主任研究員

井上 振一郎 博士 (工学)

学歴

2004 年 3 月 東京工業大学大学院総合理工学  
研究科  
物理情報システム創造専攻博士  
課程修了 博士 (工学)

職歴

2001 年 4 月 理化学研究所 和光研究所 JRA  
研究員  
2004 年 4 月 理化学研究所 和光研究所 基礎  
科学特別研究員  
2007 年 4 月 九州大学 先端物質化学研究所  
先端素子材料部門 (大学院担当:  
総合理工学府 物質理工学専攻)  
助教  
2010 年 4 月 情報通信研究機構 入所  
主任研究員 (現職)

週末は3歳になる子供と触れ合う時間を大切にしています。なかなか時間を確保するのに苦労していますが、読書が好きで専門書だけではなく文学や実用書など、広い分野の書籍に親しんで視野を広げようとしています。週末、ゴルフ練習場で汗を流すのもよい気分転換になっています。