

有機・無機ハイブリッドデバイス(光制御技術)

井上振一郎 大友 明

光と物質の相互作用を操作するフォトニック結晶機能と有機材料の優れた非線形光学機能とを融合させた有機フォトニック結晶の創製及びそのデバイス応用について述べる。スローライトなどの特異な光分散関係を利用することによって、光スイッチや波長変換、2光子励起蛍光素子などの非線形光学デバイスの大幅な性能向上を達成している。また有機電気光学(EO)ポリマーとシリコンフォトニック結晶を融合した集積型EO変調器の研究開発についても報告する。

1 まえがき

スマートフォンやクラウドコンピューティングの普及に代表されるように、情報通信ネットワークの利用形態は、ますます多様化しており、光でグローバルに繋がれた光情報通信技術(光ICT)は、今日、あらゆる社会基盤を支える重要な基盤技術となっている。その一方で、情報通信量(トラフィック)の増大や、データセンターの大規模化などを背景として、巨大な情報通信システムそのものが消費する電力量や発熱などの問題が顕在化してきている。光ファイバーを利用した光信号の長距離伝送は、古くから実用化されてきたが、情報通信システムの中核となる信号処理部分では、いまだに電子回路に頼った処理がなされている。従来型のシリコンLSIによる電子技術が既に限界に達しつつある中、加速する情報通信ネットワークの高速・大容量化と、社会的な低消費電力化の要請、双方の相反する性能要求に応えるためには、光を長距離伝送媒体として利用するだけでなく、信号の高度処理の分野における「本質的な光技術の使用」が不可欠となってきている。例えば、ハイエンドサーバやスーパーコンピュータでは、CPUのメニーコア化や電気配線の高密度化により、信号遅延や単位体積あたりの発熱量の問題が深刻化しており、チップ間やチップ内のCu電気配線に代わる短距離・On-Chip高速光配線技術(光インターコネクション)の導入が急速に進められている^{[1][2]}。

このようにフォトニクス材料・デバイスの開発重要性は増しているが、元来、光には回折限界や、物質との相互作用が小さいなどの性質があり、一般的に光デバイスの素子サイズは、電子デバイスに対して遥かに大きい。よって、オンチップでの光通信など、本格的な光集積回路を実現するためには、如何に電子デバイスと同じ様な極めて小さなスケールで光デバイスを実

現するかが重要な課題となる。このような状況から、近年、小型・集積化という光デバイスが苦手としてきた分野を克服する新たな光要素技術として、フォトニック結晶やシリコンフォトニクス素子の研究開発が活発化している。シリコンは電子デバイスの根幹をなす材料であるが、従来、光変調・受光・発光素子としては適さず、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た。しかし、光デバイスとしても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、低コスト化の観点から、またたく間にシリコンフォトニクスが、電子回路と光回路を融合する現実的な技術として本命視されるようになった。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伴って、40 Gbits⁻¹を超える高速なSi光変調器やSiGe光検出器などの要素技術が次々と開発され^{[3]-[6]}、電子回路と同じチップ上に光回路を集積化する、究極の光・電子融合集積回路が実現可能となりつつある。

一方、これらの光集積デバイス開発は、既に確立した半導体プロセス、極微細加工技術や、CMOSファウンドリーといった施設を、光素子作製に上手く転用・活用することで発達してきた。つまり、このようなフォトニクスデバイスの母体となる材料は、Si, SiO₂, InPやGaAsなどの半導体、無機材料がこれまで主流であった。しかしながら、これらシリコン等のハードマテリアルを対象とした研究開発が成熟段階に達しつつある今、既存材料の枠を越え、無機・半導体材料とは異なるフレキシブルな特性や優れた非線形光学機能を発現しうる、有機 π 共役分子・高分子材料(ソフトマテリアル)へ新たに展開していくことは、今後ますます多様化する光の利用形態へ柔軟に対応していくためにも必要不可欠な課題である。

高分子マトリックス中に、 π 共役非線形分子を分散・結合させた有機非線形光学材料は、マイクロ領域におけ

る π 共役電子の非局在化により、無機・半導体を遙かに凌駕する極めて大きな非線形光学定数($r_{33} > 100 \text{ pm/V}$)や超高速な非線形応答速度(数十 fsec 以内)などの優れた特徴をもたらす^{[7]-[9]}。しかしながら、有機材料は屈折率が低いために、素子サイズが極めて大きくなり(通常 10 cm 程度)、とても光集積回路には向かないと考えられてきた。このため、有機材料が持つ優れた光機能性を内含した光集積回路や、ナノフォトニックデバイスへの自由な研究展開が阻まれていた。一方、シリコンは屈折率が高く、集積化には有利であるが、電気光学(EO)効果を持たないため、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)を利用しており、その動作速度としては 40 GHz 前後が限界となる。よってシリコン光集積回路では、その材料特性上、100 GHz 以上の超高速な光変調デバイスを達成することはできない。筆者らは現在、これらのバリアーを打破するため、有機材料とシリコンフォトニクスとの融合技術や、有機フォトニック結晶構造によるスローライト効果を駆使したナノフォトニックデバイスの研究開発を進めている。有機 π 共役材料の優れた非線形光学特性と、シリコンフォトニクスやフォトニック結晶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や、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が可能になると考えられる。本稿では、筆者らがこれまで開発した有機フォトニック結晶デバイスや、スローライト技術により有機非線形光学デバイスの性能を大幅に向上させた実証結果を概説した後、有機 EO ポリマーとシリコンフォトニック結晶の融合による超小型・高性能な EO 変調器開発について述べる。

2 有機フォトニック結晶の開発

光波長程度のスケールで屈折率を周期的に空間変調した光ナノ構造物であるフォトニック結晶の中では、一様媒質中では起こり得ない特異な光状態を造り出せる。例えば、光の存在出来ない禁制帯(フォトニックバンドギャップ)や極めて遅い光の群速度(スローライト)状態など、バルク状態では実現不可能な光学的特異性を意図的に創出することで、光を微小領域に閉じ込めたり、光と物質間の相互作用を人工的に操作したりすることが可能となる。このような構造を、有機 π 共役材料を母体として作製できれば、光と物質との相互作用力を飛躍的に高めることが可能となるため、非線形光学効果の増強を利用したデバイス性能の向上や、素子の小型化による有機光アクティブ集積回路の実現が期待できる。

有機 π 共役材料を利用したフォトニック結晶デバイスの定量的な実証研究が進んでいなかった最大の理由は、ナノ領域における微細加工技術が、既に確立された半導体加工プロセスとは異なり、有機 π 共役材料系では未発達で、高精度な素子構造作製をすることが困難であり、光散乱等が激しく光測定における定量的な議論が難しかったためである。また有機材料は屈折率が低いためクラッド領域との屈折率差が少なく、ナノレベルでの光閉じ込めが困難であり、またさらに微細加工による深刻なダメージの問題もあった。筆者らは、これらの問題を克服するため、非線形光学ポリマー材料に対するナノ微細加工技術、新規デバイス構造を開発してきた。

2次元フォトニック結晶に要求される高アスペクト・高垂直性を保った波長オーダーでの高精度な加工を行うためには、一般的に誘導結合プラズマ(ICP)などの異方性ドライエッチングを用いるが^[12]、エッチング中のダメージにより、高分子中の光機能性色素の性能が著しく劣化してしまう。筆者らは、この問題を解決するため、2次元フォトニック結晶スラブ層と非線形光学ポリマー層を上下に構造的に分離し、且つ光モード的に結合させた独自の縦型ヘテロ素子構造を提案しており、非線形特性に優れた非線形光学ポリマーとフォトニック結晶機能とを、ダメージフリーにて融合することが可能であることを見出している^{[13][14]}。また、屈折率が低い有機材料を用いてもフォトニック結晶として有効に動作させるためには、強い光閉じ込め効果をもたらすクラッド層が不可欠である。通常良く用いられる SiO_2 クラッドでは、屈折率差が十分ではなく光が漏れ出してしまいが、銀を有機フォトニック結晶スラブ層に対するクラッドとして使用することで、プラズマ反射により十分な光閉じ込めを実現できることを立証している^[15]。またさらに、フレキシブルな有機 π 共役材料の特徴を活かして、実用化に適したナノインプリント法を用いた有機2次元フォトニック結晶素子の直接インプリント加工にも成功している(図1)^[16]。高精度、且つダメージフリーでの素子作製を実現しただけでなく、ナノインプリント法を用いることで、既存の半導体リソグラフィ技術と比較し大幅に高いス

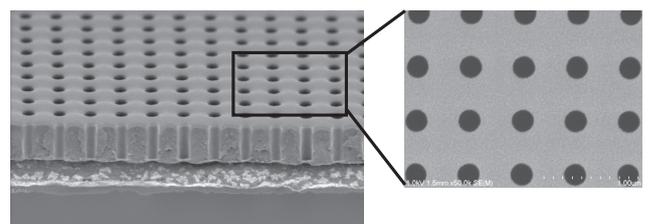


図1 作製した有機非線形光学ポリマー2次元フォトニック結晶の電子顕微鏡写真

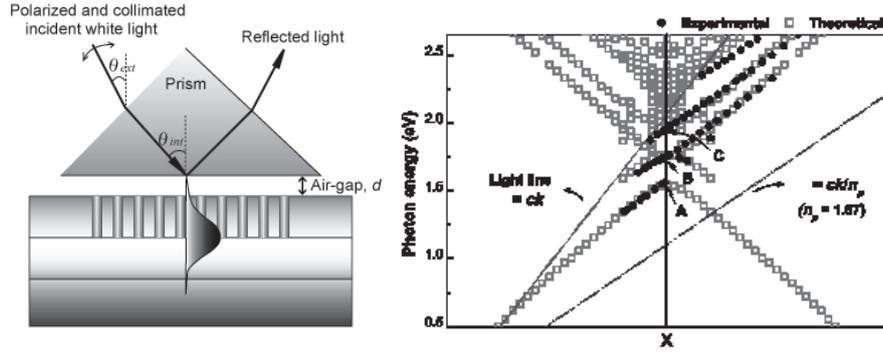


図2 分光角度分解プリズム結合測定法の概略図、及び得られた実験的バンド構造と理論計算結果との比較

ループットが得られており、有機材料ならではの低コスト化技術として期待される。

フォトリック結晶によるスローライト効果や光バンド分散制御を活用することで、有機 π 共役材料の非線形光学応答を著しく増大できる可能性があるが、この効果を実際のデバイスに対局的確に適用していくためには、いかに精度良く光バンドを計測・操作し、狙いの光分散状態を実現するかが重要となる。しかし通常、ライトライン下側のモードは外部光と結合しないため、これまで外部から直接的に導波モードの光バンド構造を観測した例はなかった。我々は、この問題を解決するため、分光角度分解プリズム結合技術により有機2次元フォトリック結晶内部の導波モードを外部から直接観測する新たな手法を開発し^[17]、ブリルアンゾーン全域に亘って理論計算結果と良く一致した実験的な光バンド構造を観測することに成功している (図2)。

3 スローライト技術を駆使した有機光非線形デバイスの性能向上

本項では、前項技術により作製した有機フォトリック結晶素子を用いて、非線形光学デバイスの性能向上についての実証例を示すと同時に、そのメカニズムについて明らかにした結果について紹介する。

3.1 光スイッチングデバイス

光強度に比例して屈折率が変化する3次の非線形光学過程 (光カー効果) は、テラビット (10^{12} bits $^{-1}$) 以上の超高速光スイッチングへの応用が可能であり、将来の超高速光信号処理へ向けた基本原理として期待されている。しかしながら、従来材料の光カー効果による非線形光学変化は非常に微弱なため、実用レベルの光スイッチを実現するためには、この効果を増大させることが大きな課題であった。本研究では、有機非線形2次元フォトリック結晶導波路を用いた高効率な全光・光スイッチング素子実現を目指し、光カー効果に

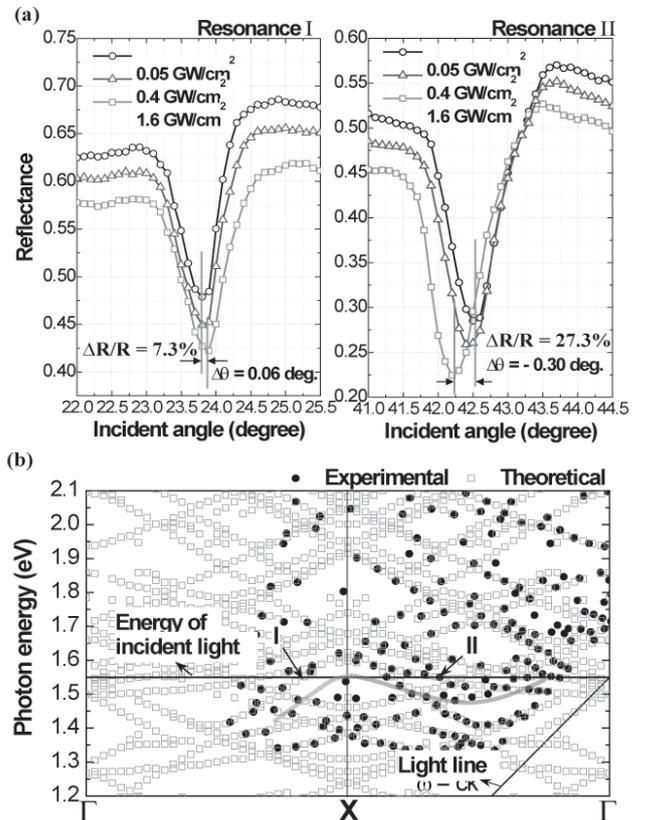


図3 (a) 光カー効果による光スイッチング特性と (b) 対応する実験・理論的光バンド構造

よる光スイッチング特性に関する評価及び解析を行った。2次元フォトリック結晶導波路は、PMMA中にDisperse Red 1 (DR 1) をドープしたゲストホスト型の非線形光学ポリマーを用いて作製した。本素子に対しピコ秒パルスレーザーを用いた角度分解反射分光測定により、光カー効果に基づいた非線形光学応答特性を評価した結果、励起光強度に対する非線形反射スペクトル変化が、入射したレーザー光に共鳴する光バンドの分散特性、及び群速度に直接的に依存した振る舞いを示すことが明らかになった^[13]。光バンドの分散性の違いに起因した正負逆向きの非線形シフトや、群速度の遅延効果 (スローライト効果) による非線形光学

2 有機ナノデバイス

変化の増大効果を観測することに初めて成功し、有機非線形フォトニック結晶の非線形光学現象に対する新規な振る舞い、その有用性を実証した(図3)。本実験結果は、理論計算で示した光バンド特性と非常に良い一致を示しており、これは有機フォトニック結晶内の光バンド操作によって、有機 π 共役材料の非線形光学応答を自在に制御可能であること、そしてその性能を大幅に向上させることが可能であることを示している。

3.2 波長変換デバイス

有機2次元非線形フォトニック結晶を用いて、レーザー光と物質との間の相互作用を制御することにより、物質中の非線形光学変化を増幅させ、それを任意に制御することは、光スイッチ素子以外にも様々な光非線形デバイスへ適用が可能である。実際、我々は2次の非線形光学効果である和周波混合、及び第二高調波発生過程における本素子の応用可能性を検討し、光非線形性高分子(DRI/PMMA)を母体とした有機2次元フォトニック結晶を用いて、レーザー光と物質との間の相互作用を制御した結果、物質固有の物理・化学特性を人工的に増幅させることで^{[18][19]}、紫外領域での和周波、第二高調波発生、及びその強度増大実証(170倍)に初めて成功している(図4)。本結果は、波長変換効率の大幅な向上を実証するもので、これまで相互作用が弱く小型化、高効率化が困難であった深紫外(200–350 nm)や中遠赤外(2–10 μm)波長領域、さらにはテラヘルツ領域における小型コヒーレント光源の開発に有効な技術として期待される。

3.3 2光子励起蛍光デバイス

3次の非線形光学効果である2光子吸収励起過程は回折限界以下の解像度と3次元的な空間選択性が得られるため、次世代の超高密度な3次元光メモリや立体的な蛍光イメージング、3次元ナノ・マイクロリソグラフィなど、様々な応用分野でその利活用が期待されている。しかしながら一般的な2光子吸収材料の励起効率は極めて低く、極めて大きな励起レーザーパワーが必要とされるため、広く実用化されるには至っていない。筆者らは、高い2光子吸収断面積を有する bis(styryl) benzene 誘導体分子をドーパした非線形光学ポリマー材料を用いて、有機2次元フォトニック

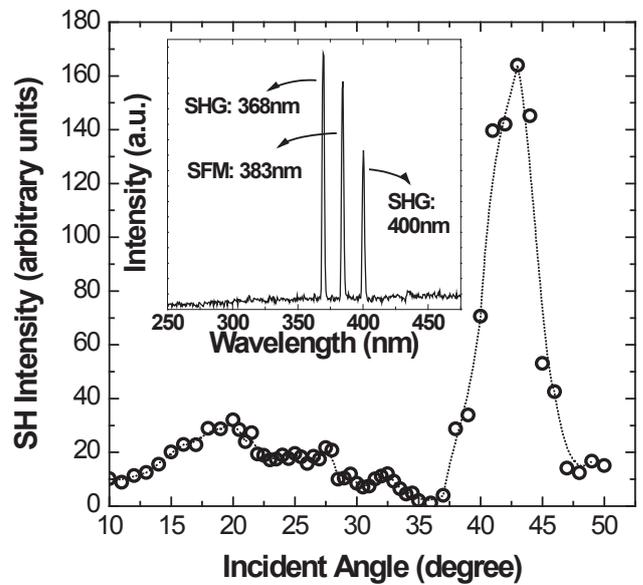


図4 波長変換(SHG)デバイス性能の向上結果と紫外SHG、SFMスペクトル

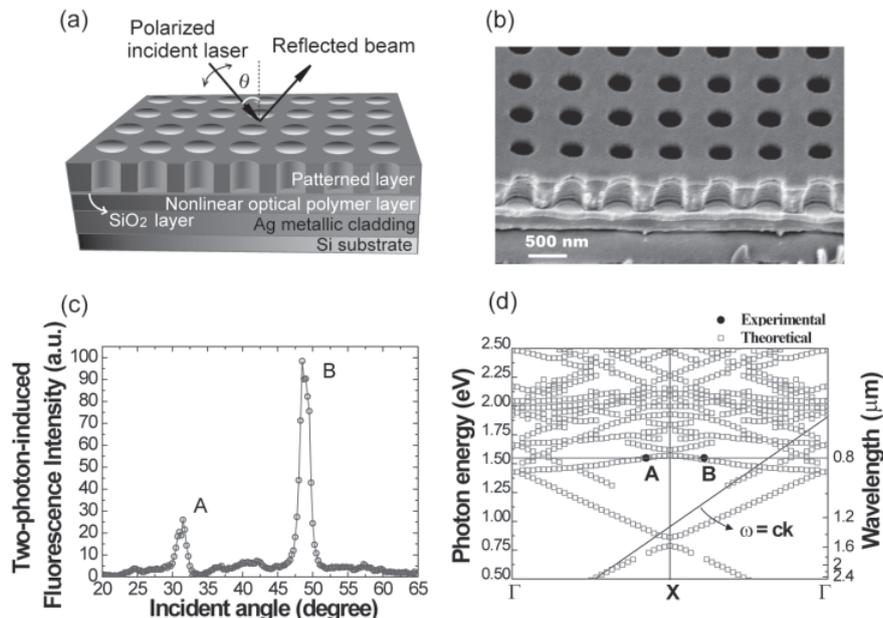


図5 (a)、(b) 作製した素子の模式図と断面SEM像、(c) 2光子励起蛍光強度の入射角依存性、(d) 同素子の対応する光バンド構造

結晶を作製し、人工的に物質内の群速度を制御することにより、光と物質間の非線形相互作用を増強させ、2光子吸収励起に伴う蛍光強度を100倍以上大きく増大させることに成功している(図5)。実験的な光バンド構造解析と角度分解2光子励起蛍光強度測定を組み合わせることで^[14]、2光子吸収過程の増強効果が光バンド共鳴及びスローライト効果に起因することを直接的に実証した。この2光子吸収効率の向上結果は、2光子吸収断面積 $\sigma^{(2)}$ の値として90000 GM という極めて大きな値に相当し、本素子が2光子吸収デバイスの大幅な高性能化に対し有効であることを明確に立証している。

4 有機・シリコン融合型オンチップ光変調デバイス

情報処理の光化を進めるためには、複雑な論理処理に優れた電子集積回路と、高速化・省エネルギー化に優れた光集積回路とを融合する技術の開発が不可欠となる。電気信号を光信号へ変換するデバイスとして、電気光学 (EO) 変調器があるが、現在、ニオブ酸リチウム (LN) 結晶を用いた変調器が実用化されている。しかしながら素子サイズは数 cm 以上あり、小型・集積化には適していない。そこで近年、シリコンフォトニクスによる光変調器の研究開発が世界的に本格化している。CMOS ベースのシリコンフォトニクスにおいて集積化、低コスト化に適した各種のモノリシック光変調器が既に開発されているが、その動作原理にキャリアプラズマ効果を用いるため、キャリアダイナミクスにより変調帯域が数十 GHz 以下に制限される問題があり^[2]、デバイスサイズ (~数 mm)、高速動作 (< 数十 GHz)、ともに更なる高性能化が求められている。このため、単チャンネルあたり 100 Gbits⁻¹ 以上の超

高速な新世代光集積ネットワークを実現しようとした場合、全く新しい光デバイスのデザインが必要となる。

超高速性 (> 100 GHz) や高いEO係数 ($r_{33} > 100$ pm/V) を併せ持つ有機EOポリマーと、シリコンフォトニクスとのハイブリッド技術は、そのような高集積化・低消費電力化された超高速EO変調デバイスを実現する上で、極めて有望な技術と考えられる。EOポリマーはLNより遥かに大きな電気光学係数を有しており、素子の低電圧化が可能で、さらにLN、半導体と比較し、光波-高周波帯間の屈折率分散が極めて小さいため、100 GHz ~ THz に亘る超高速な光変調が可能となる。さらに、シリコンとのハイブリッド構造を実現することで、屈折率の小さな有機材料でも十分な屈折率差を確保できるため、ナノ微小領域での光閉じ込め、光伝搬も可能となる。したがって、有機材料とシリコンフォトニクスとのハイブリッド技術を開発し、両技術のメリットを融合することで、無機・半導体デバイスでは不可能な、超高速・集積型EO変調デバイスの実現が見込める。

一般的に光は屈折率の高いコア領域を伝搬するため、Si に対し屈折率の低い有機材料はクラッド領域となり、伝搬モードの電界分布はSi領域に集中してしまう。よって、有機・Siハイブリッド構造では、有機 π 共役材料の光機能性を活用するために、有機クラッド中を光が伝搬するように工夫する必要がある。そのような構造として最も典型的な構造は、スロット導波路である。Si導波路の中央に極めて狭い溝(スロット)を掘り、その中に有機材料を充填することで、屈折率の低い有機領域でも、伝搬モードの主要電界を局所的に閉じ込めることができる。これをより発展させた構造に、Siスロット2次元フォトニック結晶がある。2次元フォトニック結晶内の線欠陥導波路の中央にスロット部を設け、その中に有機材料を充填し光を局所的に伝

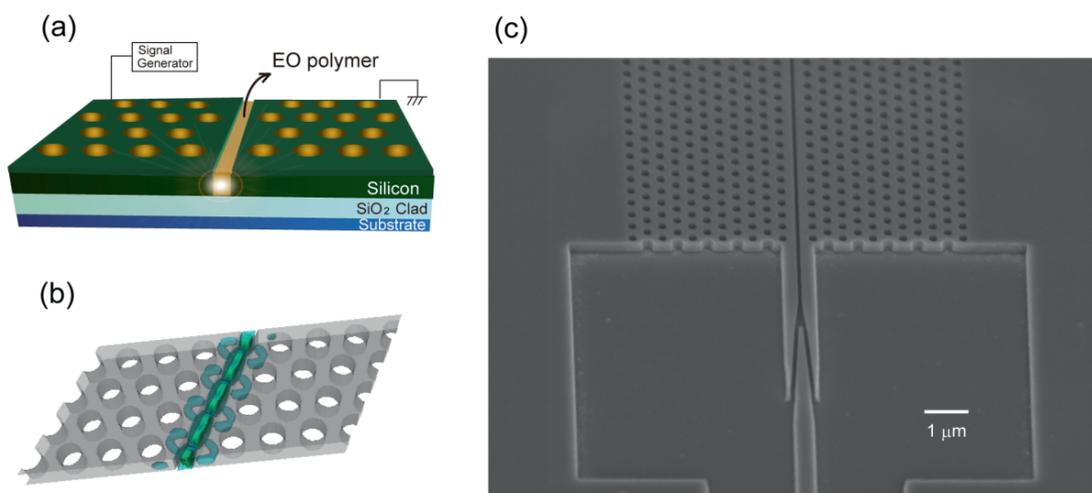


図6 (a) 有機EOポリマーとSiスロット2次元フォトニック結晶の融合デバイスの模式図、(b) 光伝搬モード分布、(c) 作製素子のSEM像

搬させるものである。素子の模式図と実際に作製した構造を図6に示す。50～250 nm 幅程度のスロット内に光が局在して伝搬するだけでなく、フォトニック結晶の効果で群速度を大きく遅延させることが可能となる。このスローライト効果により、EO 変調に伴う位相変化が大幅に増大されるため、EO 変調効率が飛躍的に向上できる。

SOI基板を用いたSi スロット2次元フォトニック結晶中のナノスロット空隙内に有機EOポリマーを充填したマッハツェンダ(MZ)型EO変調器を設計し、ナノスロット内を局所的に伝搬するスロットモード特性を3次元光バンド構造計算と3D-FDTD計算により理論的に評価した。その結果、スローライトによる位相差($\Delta\phi \propto \Delta k$)増大効果と、ナノスロット(すなわちSiナノ電極ギャップ)による電界集中効果を適切に利用することによって、MZ干渉アーム長50 μm という極めて短い素子長ながら、低動作電圧(半波長電圧 $V_{\pi}=0.75\text{ V}$)、超高速動作(動作帯域 $f_{3\text{dB}}=121\text{ GHz}$)のEO変調が達成可能であることを理論的に立証した^[10]。

このようにSiスロット2次元フォトニック結晶は、EO変調デバイスの高性能化に極めて有効であるが、Siナノ電極ギャップを介して有機EOポリマーの電界ポーリング(分子配向処理)を行う必要がある。この際、ナノSi電極間のリーク電流などが原因で、スロット内の有機EOポリマーの分子配向特性が大きく低下する問題があった。

このような問題を解決するため、筆者らは、有機EOポリマーとシリコン1次元フォトニック結晶導波路とをハイブリッドしたマッハツェンダ(MZ)型EO光変調器を提案している。詳細は省略するが、EOポリマー/Si融合型1次元フォトニック結晶は、一般的な導波路構造に近い、EOポリマーの配向制御に適した構造であることが特徴であり、Siプラットフォームにおいて、バルク状態と遜色ない優れたポーリング配向特性を示す。このような手法によって、有機EOポリマーとシリコンフォトニクスを高い精度で融合するプロセス技術を確立した。本構造の非対称MZI素子($L=100\ \mu\text{m}$)を作製し、EO変調特性を評価した結果、スローライト効果による明確なEO変調効率の向上が得られ、 $0.73\text{ V}_{\pi}\text{-cm}$ という低電圧駆動、及び実デバイス内における極めて大きな電気光学係数($r_{33\text{eff}}=343\text{ pm/V}$)を達成した^[11]。これは現在実用化されているニオブ酸リチウム(LN)光変調器の約1/1000の素子サイズ、10倍以上に相当する性能(デバイス内の実効 r_{33} 値)であり、本提案デバイスの高い優位性を示す結果であると言える。

5 まとめ

本稿では有機 π 共役材料とフォトニック結晶やシリコンフォトニクスとの融合技術が、非線形フォトニックデバイスの小型・集積化、高速化、低消費電力化に直結する有望な技術であることを紹介した。これらの技術は、半導体・無機材料には無い有機材料特有の光機能性を使って、従来光素子では不可能な様々な新しい光学技術への展開を可能にするもので、 100 Gbits^{-1} を超える超高速光変調デバイスやオンチップ光・電子融合回路の開発以外にも、全光・光制御や光バッファ、超高感度センサー、さらにはバイオフォトニクス応用など、広範な光デバイス分野・光ICT技術領域への波及効果、展開が見込まれる。有機光機能性材料は近年、その材料性能や、低光損失性、熱安定性の特性が大幅に向上してきており、今後その重要性がますます高まることが予想される。実用化に向けた安定性、信頼性などの検証も含め、有機材料科学とデバイス技術、双方の研究進展がリンクすることにより、有機・無機融合フォトニックデバイス分野の今後更なる発展に期待したい。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金(若手研究(A)10013413)の支援により実施された。

【参考文献】

- 1 M. Paniccia, "Integrating silicon photonics," *Nature Photon.*, 4, 498, 2010.
- 2 G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nature Photon.*, 4, 518, 2010.
- 3 A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu, and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," *Nature*, 427, 615, 2004.
- 4 A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky, and M. Paniccia, "High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide," *Opt. Express*, 15, 660, 2007.
- 5 L. Liao, A. Liu, D. Rubin, J. Basak, Y. Chetrit, H. Nguyen, R. Cohen, N. Izhaky, and M. Paniccia, "40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications," *Electron. Lett.*, 43, 1196, 2007.
- 6 S. Klinger, M. Berroth, M. Kaschel, M. Oehme, and E. Kasper, "Ge on Si p-i-n Photodiodes with a 3-dB bandwidth of 49 GHz," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, 920, 2009.
- 7 L. R. Dalton, P. A. Sullivan, and D. S. Bale, "Electric field poled organic electro-optic materials: State of the art and future prospects," *Chem. Rev.*, 110, 25, 2010.
- 8 Y. Enami, C. T. Derose, D. Mathine, C. Loychik, C. Greenlee, R. A. Norwood, T. D. Kim, J. Luo, Y. Tian, A. K.-Y. Jen, and N. Peyghambarian, "Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients," *Nature Photon.*, 1, 180, 2007.

- 9 X. Piao, X. Zhang, S. Inoue, S. Yokoyama, I. Aoki, H. Miki, A. Otomo, and H. Tazawa, "Enhancement of electro-optic activity by introduction of a benzyloxy group to conventional donor-p-acceptor molecules," *Organic Electronics*, 12, 1093, 2011.
- 10 S. Inoue and A. Otomo, "Slow light electro-optic Modulator based on EO polymer-infiltrated slotted silicon photonic crystal waveguides," *SPIE Photonics West*, Abstr., 8264-3, 2012.
- 11 S. Inoue and A. Otomo, "Design and fabrication of EO polymer-clad one-dimensional silicon photonic crystal nano-wire modulators," *SPIE Photonics West*, Abstr., 8627-3, 2013.
- 12 S. Inoue, K. Kajikawa, and Y. Aoyagi, "Dry-etching method fabricating photonic-crystal waveguides in nonlinear optical polymers," *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2966, 2003.
- 13 S. Inoue and Y. Aoyagi, "Design and fabrication of two-dimensional photonic crystals with predetermined nonlinear optical properties," *Phys. Rev. Lett.*, 94, 103904, 2005.
- 14 S. Inoue and S. Yokoyama, "Enhancement of two-photon excited fluorescence in two-dimensional nonlinear optical polymer photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, 93, 111110, 2008.
- 15 S. Inoue and Y. Aoyagi, "Photonic band structure and related properties of photonic crystal waveguides in nonlinear optical polymers with metallic cladding," *Phys. Rev. B*, 69, 205109, 2004.
- 16 M. Okinaka, S. Inoue, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Defect-free two-dimensional-photonic crystal structures on a nonlinear optical polymer patterned by nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, 25, 899, 2007.
- 17 S. Inoue, S. Yokoyama, and Y. Aoyagi, "Direct determination of photonic band structure for waveguiding modes in two-dimensional photonic crystals," *Opt. Express*, 16, 2461, 2008.
- 18 S. Inoue and Y. Aoyagi, "Ultraviolet second-harmonic generation and sum-frequency mixing in a two-dimensional nonlinear optical polymer photonic crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, 6103, 2006.
- 19 S. Inoue and S. Yokoyama, "Nonlinear optical responses in Two-dimensional photonic crystals," *Thin Solid films*, 518, 470, 2009.



井上 振一郎 (いのうえ しんいちろう)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員
 博士 (工学)
 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



大友 明 (おおとも あきら)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室室長
 Ph.D.
 ナノフォトニクス、非線形光学