

研究報告書

「有機・シリコン融合集積フォトニクスによる超高速電気光学デバイス」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 25 年 10 月～平成 29 年 3 月

研究者: 井上 振一郎

1. 研究のねらい

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。今後ますます情報通信システムの肥大化が進む中で、消費電力の増大を抑制しながら、通信速度の向上を実現していくためには、電子集積回路と光回路の融合が不可欠である。特に、光配線技術や次世代の超高速オンチップ光・電子融合回路を実現するためには、電気信号を光信号に変換する電気光学(EO)変調デバイスの高集積化、低消費電力化、超高速化が重要な課題となる。これまで、電気光学変調器の代表的なものとして無機酸化物結晶である LiNbO₃(ニオブ酸リチウム:LN)を用いた EO 変調器が実用化されているが、素子サイズが数 cm 以上と大きく、チップ間光配線への利用や、シリコン電子回路へのオンチップ集積は不可能であった。近年、そのような問題を解決するため、集積化・低コスト化に適したシリコンフォトニクス、シリコン光変調器の開発が活発に進められているが、シリコンは材料的に 2 次の非線形光学効果である電気光学効果をもたず、動作原理としてキャリアプラズマ効果を用いるため、変調帯域が数十 GHz 以下に制限される問題がある。一方、有機高分子マトリックス中に π 共役系非線形色素分子を分散あるいは結合させた有機 EO ポリマーは、マイクロ領域における π 電子の非局在化により、無機・半導体とは異なった光・電子物性を持ち、光デバイスにおいて、この特性は、極めて大きな電気光学係数や超高速な EO 応答速度(100GHz~THz)などの優れた特徴をもたらす。しかしながらこれまで、ナノ領域における分子配向制御の困難さや、波長オーダーの光閉じ込めを困難とする有機材料の屈折率の低さ、さらにはナノ微細加工ダメージの問題など、有機材料特有の極めてソフトな物理・化学特性が原因で、ナノ光・電子集積デバイスに対して有機 π 共役材料のポテンシャルを最大限発揮させることは困難であった。

ここで本研究は、高い電気光学係数と超高速応答性を併せ持つ有機電気光学ポリマーと、高集積化が可能なシリコン 1 次元フォトニック結晶からなるシリコンナノ構造プラットフォームとを 1 チップ上で効果的にハイブリッドする新たな有機・Si 融合集積デバイス(図 1)を創出することで、上記の技術課題をクリアーし、動作スピード × 消費電力 × 素子サイズ において従来デバイスを桁で上回る EO 変調デバイスを実証することを目標とした。またさらに、異種材料との 1 チップ内でのマルチ融合や、EO 変調動作の温度無依存化など、従来の LN 変調器やシリコン CMOS フォトニクスでは達成不可能であった新たな光機能性の創出も本研究の重要なターゲットとした。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究において、超高速動作(>100GHz)、小型・集積化可能(<100 μ m)、低消費電力(デ

デバイス内の電気光学性能指数： $r_{33}=500\text{ pm/V}$ 超（従来 LN 変調器の 15 倍以上に相当する値）な電気光学変調デバイスを実証した。さらに異種材料との Si チップ上でのマルチ光機能融合や、EO 動作の温度無依存化（同デバイス構造の Si 単独と比較し、温度変化に伴う位相シフト量を 1/25 に低減）という従来デバイスには達成困難な新たな機能性を実証した。

これらの特性は主に、有機分子へのナノ微細加工時のダメージ抑制技術や、デバイスの光低損失化技術を含む有機 EO ポリマー材料とシリコンナノ構造との新しい融合プロセス技術の確立と、ナノ領域での分子配向制御技術やスローライトやフォトニック結晶構造を駆使した EO 位相変調増幅技術を組合せることによって実現した。

達成した成果は、微細加工ダメージや低屈折率性という、有機 π 共役材料の光集積化に向けた、最大の弱点を解消し、ナノ領域での高い分子配向効率や温度無依存動作化、さらには従来実用化素子の性能を一桁以上凌駕する優れた電気光学性能を実証するものである一方、シリコンチップとの効果的な融合を果たすなど低コスト化や既存の産業プロセスとの親和性といった側面も熟慮されている。ニオブ酸リチウム光変調器やシリコン CMOS フォトニクス等の従来技術には達成できない性能と新しい機能性を提供し、従来 EO 技術の苦手領域を補完するもので、将来のより広帯域の光配線技術や超高速オンチップ光・電子融合回路、ミリ・THz 波センシング分野の基盤技術としてなど、幅広い分野に対する利活用が可能な技術である（図 2）。

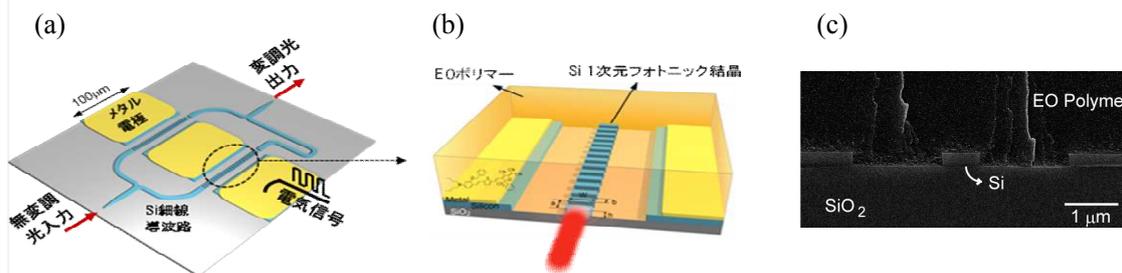


図 1：今回開発したマツハツェンダ型の有機・シリコン融合型電気光学変調デバイス：(a) 変調器の模式図、(b) 変調部の断面模式図、(c) 断面の電子顕微鏡（SEM）写真

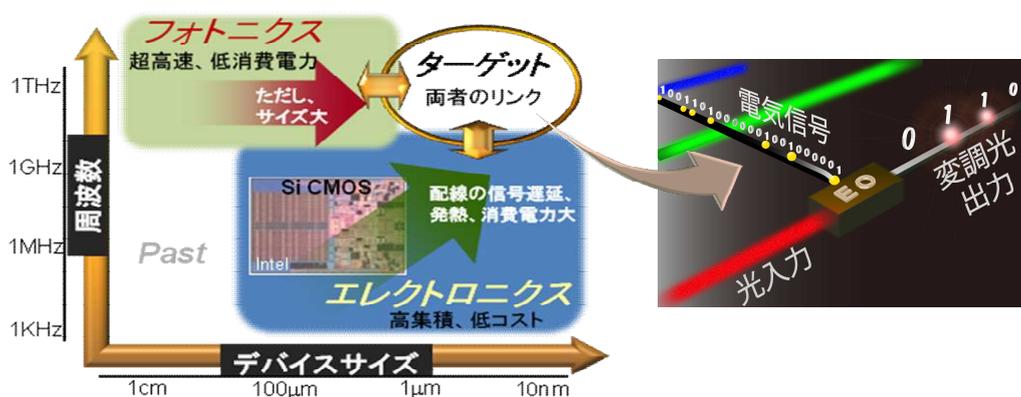


図 2：本研究の結果、実現可能性が拓かれる新たなナノ光・電子融合領域

(2) 詳細

研究テーマ1「有機 EO ポリマー材料とシリコンナノ構造との新しい融合プロセス技術の確立」

ナノ構造を用いた光集積デバイスに関しては、従来では、Si、InP や GaAs などの半導体材料で構成されたものが主流であり、有機材料のような低屈折率の材料では、素子サイズを小型化できず、さらにソフトな有機分子への微細加工ダメージの問題もあり、半導体のような高密度光集積化は困難であると考えられてきた。しかしながら、半導体材料を用いた素子が成熟段階に達しつつある中で、有機 π 共役材料のような半導体でない優れた光アクティブ機能性を有する材料に新たに展開していくことが不可欠であった。その中で本研究は、有機 EO ポリマー材料と 1 次元 Si フォトニック結晶導波路をナノ領域で組み合わせた独自の素子構造を提唱し、半導体や酸化物結晶を凌駕する非線形光学特性 (EO 係数: $r_{33}=500$ pm/V 超) を発現する電気光学変調デバイスを作製することに成功した。従来、Si スロット導波路を用いたハイブリッドデバイスが報告されていた。しかしスロット導波路の場合、数十~100nm 程度の極めて狭いスロット領域に EO ポリマーを充填し、その中を光が伝搬する形となるが、有機材料の不均質性やリーク電流などの問題により、電界ポーリング処理による EO ポリマーの分子配向効率が低く、また光伝搬ロスも大きいという問題があった。本研究では、有機 EO ポリマー材料と 1 次元 Si フォトニック結晶導波路とのハイブリッドデバイスを理論提案し、それを実験的に実現するインクジェット法を用いた要素技術を世界に先駆けて開発した。これにより、光の電磁界分布として屈折率の低い EO ポリマー材料の中に選択的に分布しながら光伝搬するとともに、ナノ光閉じ込めとスローライト効果を同時に達成することで、高い光非線形効果の発現が可能である。また本デバイス構造は、有機 EO ポリマーの分子配向制御に適した構造であることが特徴であり、Si ナノ構造内において、バルク薄膜の場合と遜色ない優れた分子配向効率 (対バルク比: $>95\%$) を達成した。さらに、EO ポリマーを用いた Si 導波路とのスポットサイズコンバーターを開発することで光ファイバーとの結合損失を低減するとともに、Si の微細加工条件と有機材料とのハイブリッド条件を最適化することで、比較的低損失 (0.8dB/mm) な有機・Si ハイブリッド 1 次元 フォトニック結晶導波路の光伝搬を確認した。またさらに、インクジェット法で EO ポリマーを位置選択的に後工程でハイブリッド化することにより、スピコート法などの他の製法に比べ、有機 π 共役材料の消費コストを大幅に低減し、また微細加工によるダメージの問題を解消した。

研究テーマ2「超高速動作、小型、低消費電力な電気光学 (EO) 変調デバイスの実証」

有機 EO ポリマーと融合させるシリコンナノ構造プラットフォームとして、適切にデザインしたシリコン 1 次元フォトニック結晶を用いることで、作製した素子長 $80\mu\text{m}$ のマツハツエンダ (MZ) 型 EO 光変調器において、従来 LN 変調器の 15 倍以上に相当する EO 性能指数 ($r_{33}=500$ pm/V 超) を達成した。これらの結果は、Si ナノ構造内において、バルク EO ポリマー薄膜の場合と遜色ない極めて高い分子配向効率を達成したこと、そして同時に有機 EO ポリマーの中を光が伝搬しながら、スローライト状態を作り出すことによって実現された。またコプレナ伝送路による高周波印加時の光サイドバンド測定を行った結果、有機 EO ポリマー・Si 融合集積型の提案デバイスにおいて、100GHz を超える明瞭な変調サイドバンドの観測に成功した。また 5 ~20Gbps で PRBS 変調された光信号を光サンプリングオシロスコープにより測定した結果、

アイパターンの観測に成功した。

研究テーマ3「EO 変調動作の温度無依存化など、新たな光機能性の創出」

本研究の重要な点は、EO デバイス性能の向上を達成するだけでなく、EO 変調動作の温度無依存化など、EO 集積化に向けた新たな機能性を提供することである。本研究では、大きな負の熱光学係数をもつ有機 EO ポリマーと、大きな正の熱光学係数をもつシリコンとのナノ領域での光モード配分を適切に制御し、その熱光学係数差による屈折率の温度分散を補償し、光位相差を相殺することにより、温度変動に対して安定に動作する電気光学変調器を提案し、実証した。この機能により、隣接する電子デバイスの発熱によって生じる温度変動を補償する新たな仕組みの EO 変調デバイスを実現できる。実際に有機 EO・Si ハイブリッド MZ 型 EO 変調器を作製し、温度変化に対する位相シフト量を見積もった結果、Si 単独デバイスと比較し、位相シフト量を 1/25 に低減できることを確認し、提案デバイスの明瞭な温度補償効果を実証した。またインクジェット法による有機 EO ポリマーの位置選択的なハイブリッド技術により、シリコン 1 チップ内において EO 変調部や受光部などの異なる光機能のマルチ集積化も実現した。

3. 今後の展開

今回実証した有機 EO ポリマーとシリコンを融合した EO 変調デバイスは、既存のシリコン CMOS プロセス、シリコンフォトニクスとの整合性も高く、低コスト化や実用性に配慮した構造でありながら、従来の LN やシリコン CMOS フォトニクスでは、決して同時に実現できない(1)超高速 EO 特性、(2)超小型、(3)低消費電力という3つのデバイス特性を併せ持つ。また EO 変調時の温度補償動作の実現は、電気光学変調器の高性能化だけでなく、デバイス動作の安定性や信頼性を飛躍的に高める新しい技術である。これらは、100GHz~THz の超高速・低消費電力なオンチップ光配線やチップ間光通信の実現といった光・電子融合領域の新たな発展可能性を切り拓くものとして期待される。

また今回の成果は、上記だけでなく、有機 7 共役材料の高い非線形性と光集積性を活かすことで、量子光学のオンチップ化やミリ・THz 波センシングなど、幅広い分野への応用展開を可能とするものである。今後は、有機・シリコン融合集積フォトニクス技術を更に発展させ、電気光学、非線形光学デバイスの一層の高性能化と新機能性創出を目指すとともに、安定性や信頼性の検証といった社会実装に向けた取り組みについても総合的に進めていきたい。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究では、有機電気光学ポリマーとシリコン 1 次元フォトニック結晶とを 1 チップ上でハイブリッドした有機・Si 融合型 EO 変調デバイスを提案、作製することで、100GHz を超える超高速動作化、小型・高集積化が可能で、且つ従来の LN 変調器の 15 倍以上の値に相当するデバイス内 EO 係数 ($r_{33}=500$ pm/V 超) を有する電気光学変調デバイスを実証した。これによりほぼ当初の目標については達成し、さらに異種材料との Si チップ上でのマルチ光機能融合や、EO 動作の温度無依存化という従来の LN や Si CMOS デバイスには達成困難な機能性を新

たに実証することで、提案したデバイスの本分野における有効性をより深く特徴付けることに成功したと考えている。

本研究の実施体制としては、記載した主テーマに係る部分は全て個人で研究を実施し、その研究費については、研究に必要な EO 測定設備等に有効に使用させて頂いた。

波及効果に関しては、前項の今後の展開にも記載した通り、本技術は、100GHz~THz 領域の次世代の超高速オンチップ光配線やチップ間光通信技術を新たに切り拓く可能性を有し、また有機 π 共役材料を用いた高い非線形性や光集積性は、電気光学変調デバイスに限らず、波長変換素子、量子光学のオンチップ化、あるいは、ミリ・THz 波センシングなど、幅広い分野の発展に寄与するものである。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

独自開発の有機電気光学(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 EO 光変調器を作製し、その動作を初めて実証した。特に、ナノオーダーの高い加工精度をもとに、有機 EO ポリマーとシリコンフォトニクスとの融合プロセス技術を開発し、EO 変調効率の向上、極めて大きな電気光学係数を達成した点で大きな成果に繋がったと評価される。電気光学変調デバイスにより、「超高速動作(>100GHz)、LN 変調器の1/1000以下の素子サイズ(<100 μm)、低消費電力性を同時に達成する」という高い目標をほぼ実現しており、高く評価でき、インパクトの大きな成果と考える。ポリマーとシリコンで温度依存性が相反することを利用して温度無依存を実現したのはアピールできる成果である。

企業との共同研究等により、実デバイスとしての可能性を示すことが望まれる。

今後、有機材料の弱点である耐水性から懸念される信頼性・長期安定性、電界集中から懸念される劣化について、実デバイスを念頭に置いて検討することを期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. S. Inoue and A. Otomo, "Electro-optic polymers/silicon hybrid slow light modulator based on one-dimensional photonic crystal waveguides", Appl. Phys. Lett., **103**, 171101-1-4 (2013).
2. S. Ishii, S. Inoue, and A. Otomo, "Electric and magnetic resonances in strongly anisotropic particles", J. Opt. Soc. Am. B, **31**, 218-222 (2014).
3. S. Ishii, S. Inoue, R. Ueda, and A. Otomo, "Optical detection in a waveguide geometry with a single metallic contact", ACS Photonics, **1**, 1089-1092 (2014).
4. K. Waki, T. Yamashita, S. Inoue, S. Miki, H. Terai, R. Ikuta, T. Yamamoto, and N. Imoto, "Fabrication and characterization of superconducting nanowire single-photon detectors on Si waveguide", IEEE Trans. Appl. Supercond., **25**, 2200704 (2015).
5. S. Inoue, N. Tamari, T. Kinoshita, T. Obata, and H. Yanagi, "Light extraction enhancement of

265 nm deep-ultraviolet light-emitting diodes with over 90 mW output power via an AlN hybrid nanostructure”, Appl. Phys. Lett., **106**, 131104-1-4 (2015).

(2)特許出願

研究期間累積件数:0

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 著書: S. Inoue, 『Organic Nanophotonics: Fundamentals and Applications』 Chapter 6: Nonlinear Optical Polymer Photonic Crystals and Their Applications, Springer (2014).
2. ニュース解説: 井上振一郎、『電子情報通信学会誌』、「有機電気光学ポリマーとシリコンを融合した超小形・高性能な電気光学変調器の開発に成功」、Vol.97, 262-253 (2014).
3. 招待講演: S. Inoue, “Compact ultrafast EO modulators and high-power DUV-LEDs based on photonic crystal structures”, EMN Ultrafast Meeting (Las Vegas) (18 Nov 2015)
4. 招待講演: 井上振一郎、「有機EOポリマー/Si融合集積フォトニクスと深紫外LEDナノ光取出し技術」、応用物理学会 微小光学研究会(東京)(2015年5月26日)
5. 招待講演: 井上振一郎、「有機電気光学ポリマーとシリコンを融合した超小型光変調器」、電子情報通信学会 ソサイエティ大会(徳島)(2014年9月26日)