

2 光制御・ナノ ICT 基盤技術 —基盤から応用まで—

2 *Optical Control and Nano-scale Control ICT Basic Research* — *Basic Technologies toward Applications* —

2-1 電気光学ポリマーの開発と応用技術

2-1 *Development and Application of Electro-optic Polymer*

2-1-1 電気光学ポリマーの高性能化と新規光制御デバイスへの応用

2-1-1 *High Performance Electro-optic Polymer and Application to New Optical Control Devices*

大友 明 山田千由美 上田里永子 横濱秀雄 山田俊樹

OTOMO Akira, YAMADA Chiyumi, UEDA Rieko, YOKOHAMA Hideo, and YAMADA Toshiki

データ利活用サービスや 5G 移動通信の本格運用により、膨大なデータを高速で通信し処理する需要が爆発的に増加しており、通信システムの高速化と低消費電力化が必須の課題である。我々は、通信速度を決定づける光変調器の高速化・低消費電力化を実現するために、電気光学ポリマーの高性能化の研究開発を行うとともに、様々な新規光制御デバイスへの応用展開も進めてきた。本稿では、実用性能が高い EO ポリマーと光フェーズドアレイや Si/EO ポリマーハイブリッド光変調器への応用展開について解説する。

With the full-scale operation of data utilization services and 5G mobile communications, the demand for high-speed communication and processing of enormous amounts of data has extremely increased, and high-speed communication systems and low power consumption are essential issues. In order to realize higher speed and lower power consumption of optical modulators that determine communication speed, we are conducting research and development on high performance of electro-optic polymer and proceeding with application development to various new optical control devices. In this paper, we explain the practical development of EO polymer and its application to optical phased arrays and Si/EO polymer hybrid optical modulators.

1 まえがき

クラウドサービスや AI、IoT などのデータ利活用システムや第 5 世代移動通信システム (5G) の本格運用で、膨大なデータを高速で通信し処理する需要が高まっているが、データセンターや高性能コンピュータを構成するサーバー内外のデータ通信速度が、処理能力のボトルネックであることが顕在化している。サーバー内外のデータ通信を担うインターコネクットの高速化の要求から、電気配線に代わり光通信技術を適用した光インターコネクットへの移行が進められ、その要求速度は 200 Gbps から 400 Gbps、800 Gbps、1.6 Tbps へと指数関数的増加の実現が求められている。光通信において、通信速度を決定づける重要なデバイスが光

変調器である。現在、長距離通信ではニオブ酸リチウム (LN : Lithium Niobate) 光変調器、光インターコネクットでは Si や InP などの半導体光変調器が使用されているが、いずれも高速化が 50 Gbaud 程度で限界に達しており、加えて LN 光変調器では小型化、半導体光変調器では消費電力に課題がある。

電気光学 (EO : Electro-Optic) ポリマーは、誘電率が低く EO 係数が大きいことから、LN や Si などに比べて高速性と変調効率、消費電力の面で優れており、光変調器の超高速化、小型化、低消費電力化が期待されている。NICT では、100 Gbaud を超える超高速光変調器の実現に向けて、実用性能の高い EO ポリマー材料開発から、デバイス作製プロセス技術開発、デバイス動作実証まで一貫通貫の研究開発を行っている。EO

ポリマー光変調器の動作原理は、物質に電場を印加した際に屈折率が変化する電気光学効果であり、光変調器以外にも光フェーズドアレイ (OPA : Optical Phased Array) やテラヘルツ波の発生・検出など様々な応用が期待できる。中でも位相変調器をアレイ化した OPA は、光偏向デバイスとして自動運転や 3D カメラへの実現に必要な LiDAR (Light Detection and Ranging) の小型・高速・軽量化への応用が期待されている。本稿では、デバイスの長期安定性とデバイス作製プロセスに自由度をもたらす耐熱性の高い EO ポリマー材料や光インターコネクで使われる O バンド (波長 1.3 μm 帯) で性能指数が高い EO ポリマー材料、高速 OPA、光インターコネク用 Si/EO ポリマー小型高効率光変調器の開発状況について解説する。

2 EO ポリマーの高性能化

2.1 耐熱性の向上

ポリマーの EO 効果は EO 分子の超分極率に比例する。我々は、EO 分子のアミノベンゼンナメタ位にアルキルオキシ基を置換することで π 共役骨格を安定化し、高い EO 効果を得られることを示した [1][2]。この EO 分子をメチルメタクリレート (MMA) ポリマーに側鎖として結合したサイドチェーン EO ポリマーでは、100 pm/V を超える高い EO 係数が得られた。EO ポリマーは、ガラス転移温度 (T_g) において電場配向処理 (ポーリング) することで EO 効果を発現することから、 T_g が低いと短期間で配向が緩和し EO 効果が低下するため、実用化のためには高 T_g 化が不可欠である。我々は、MMA のメチル基を環状アルキル基で置換したメタクリル酸誘導体を用い、EO 分子を架橋剤としてポリマー鎖をクロスリンクすることで最大で 206 $^{\circ}\text{C}$ の T_g を実現し、105 $^{\circ}\text{C}$ の高温環境下でもほとんど配向緩和しない高い熱安定性を得ることに成功した (図 1) [3]。

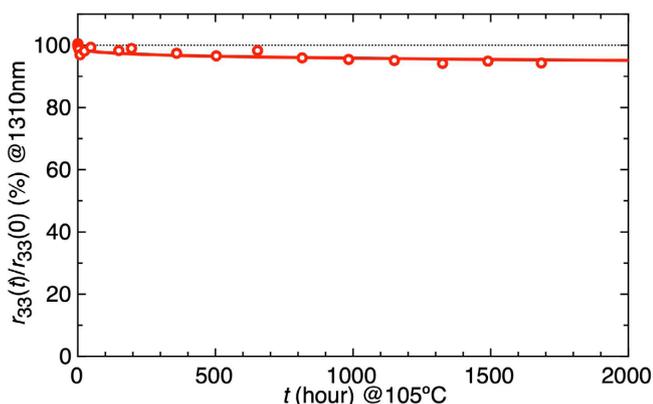


図 1 高 T_g -EO ポリマーの長期安定性

EO ポリマーの熱安定性が高くなったことで、デバイスの長期安定性が向上しただけでなく、デバイス作製プロセスの自由度が高くなり、これまで実現困難であったデバイスの作製が可能になった。従来の EO ポリマーデバイス作製では、熱処理により配向が緩和するため、ポーリングはデバイス構造作製工程の最後に行うことが常識であった。しかし、光フェーズドアレイのように多数のデバイスを同時にポーリングする場合には、一箇所でも絶縁が弱いところがあるとそこで短絡してしまい、ポーリングができなくなってしまう。また、高 T_g -EO ポリマーを使用する際に、従来のクラッド材料では高温でのポーリングに耐えられないなどの問題も生じた。そこで、加工工程の熱処理は 105 $^{\circ}\text{C}$ 以下とすることが可能であることから、高 T_g -EO ポリマーを使用すれば、EO ポリマーの成膜直後にポーリングしても、その後の加工で配向緩和しない。すなわち、加工前に大面積で均一なポーリングを行うことで、多数アレイから成る光フェーズドアレイの作製が可能になる。また、光変調器においては、導波路のクラッド材料の導電率を高めないと電場配向ができないためクラッド材料が有機シリカなどに限定される問題があった。しかし、高 T_g -EO ポリマーを使用すれば、EO ポリマー膜をポーリング後に別基板に加熱転写することが可能になり、**2-1-2** のテラヘルツデバイスの作製や **2-1-3** のシュタルク効果テラヘルツ検出素子作製の実現へ導いた。

2.2 O バンド用の高効率化

中短距離通信用の光インターコネクでは、光ファイバ分散が極めて小さく、広く普及している O バンド (波長 1.3 μm 帯) が今後主流になる。しかし、これまでの EO ポリマーの開発は、長距離通信用の C バンド (波長 1.55 μm 帯) での使用を前提としていたため、大きな EO 効果を示す EO ポリマーは O バンドでは吸収係数が大きく使用に適さない。そこで我々は、O バンドで吸収係数が小さくかつ EO 係数が大きい EO ポリマーの開発に取り組み、性能指数で従来の EO ポリマーを上回る高性能の O バンド用 EO ポリマーを開発に成功した。開発した O バンド用 EO ポリマーと従来の C バンド用 EO ポリマーの性能指数の比較を図 2 に示す。EO ポリマーの性能指数は、光変調器の性能指数である $V_{\pi}L$ 、 $V_{\pi} \cdot \text{Loss}$ を反映してそれぞれ n^3r/λ 、 $n^3r/\alpha\lambda$ と定義した。 V_{π} は、位相を π 変えるのに必要な電圧 (半波長電圧)、 L は電極の長さ、 Loss は導波路伝搬損失である。また、 n は EO ポリマーの屈折率、 r は電気光学係数、 λ は波長、 α は吸収係数である。いずれの性能指数においても従来の C バンド用 EO ポリマーの C バンドでの性能指数を上回っており、O バン

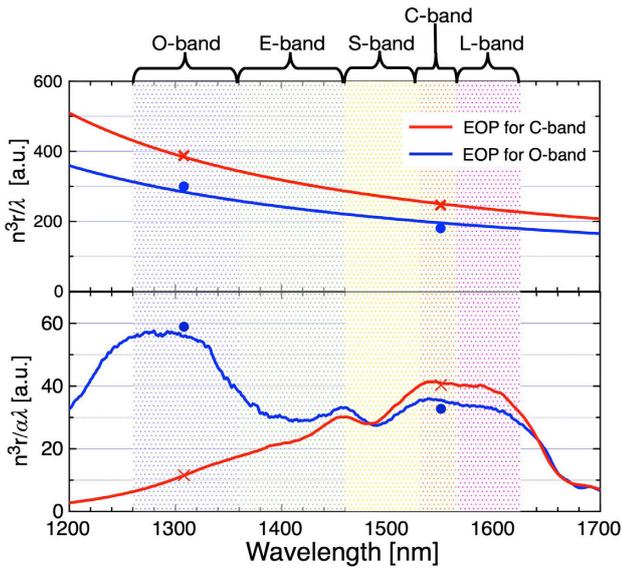


図2 光変調性能指数の比較

ドでの高効率な変調が期待できる。

3 高速光フェーズドアレイ

光フェーズドアレイ (OPA : Optical Phased Array) は、光位相変調器をアレイ状に配置した素子であり、機械的可動部なしに相互の位相関係により出射光ビームの形状と方向を制御できることから、3次元測距カメラや自動車、ドローンなどに搭載できる超小型・超軽量の LiDAR などの光投影部としての応用が期待されている。アレイピッチが狭いほど高角度に偏向できることから、高屈折率の Si 光導波路を用いた OPA の研究開発が主流であるが、多くの Si-OPA の位相調整は温度により屈折率が変化する熱光学効果やキャリア濃度により屈折率が変化するキャリアプラズマ効果を動作原理としており、光ビームの走査速度や消費電力に課題がある。一方で、長距離光通信で使用される高速位相変調器として印加電界に応じて屈折率が変化する

る電気光学効果を用いた LN 変調器があるが、LN は加工性が悪く横方向に強く閉じ込める導波路作製や印加電極間隔を狭くできないため、広角走査や低電圧駆動が困難である。

我々は、高速・広角走査の光ビーム制御素子を実現することを目的に、EO ポリマー光位相変調器を用いた OPA の開発を行っている。EO ポリマーは加工性が良く、矩形導波路に加工できることから横方向の閉じ込めを強くできる。また、電極を上下に配置し EO ポリマーを挟む構造にできることから低電圧で駆動可能である。図3に、試作した EO ポリマー導波路型 OPA の基本構造を示す。入射光は分岐部で8チャンネル (ch) のアレイ導波路に分配され、位相制御部で各導波路 ch に印加される電圧に応じて位相が調整される。アレイピッチが狭いほど広角度に偏向できるが、位相調整部でアレイピッチを狭くすると印加電極相互間で短絡することからアレイピッチを 20 μm と広げている。その後ピッチコンバータによりアレイピッチを減少させ、出射端で 4 μm としている。図4は、出射端面の走査電子顕微鏡像と出射光強度分布である。横方向に強い閉じ込めができる矩形導波路に加工できていることが確認できる。出射光強度分布は、入射光が各 ch に均一分配され、ch 間の重なりが無く出射まで分離独立した光が伝搬していることを示している。最大偏向角の測定では、まず、隣接 ch 間位相差がゼロとなるようにオフセット電圧を調整した後に、偶数 ch にのみ V_{π} の矩形波を入力した際の2つのビーム間隔から偏向角を算出すると 22.1 度であり、理論値 (22.3 度) に近い偏向角が得られた [4]。また、高速偏向の測定では、隣接 ch 間の振幅差を V_{π} とした周波数 2 MHz の正弦波電圧を印加し、フォトダイオードを横切る光を測定することにより高速動作を確認した [5]。

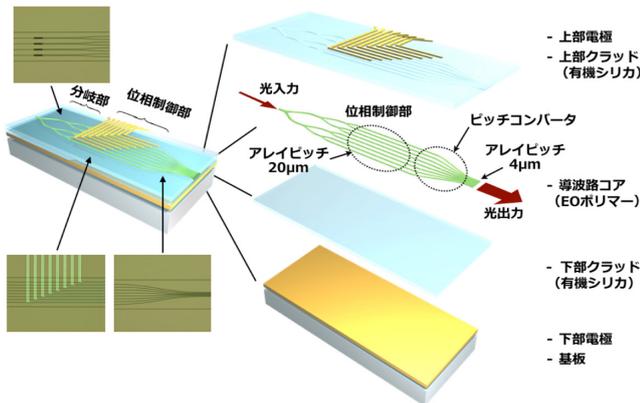


図3 光フェーズドアレイの基本構造

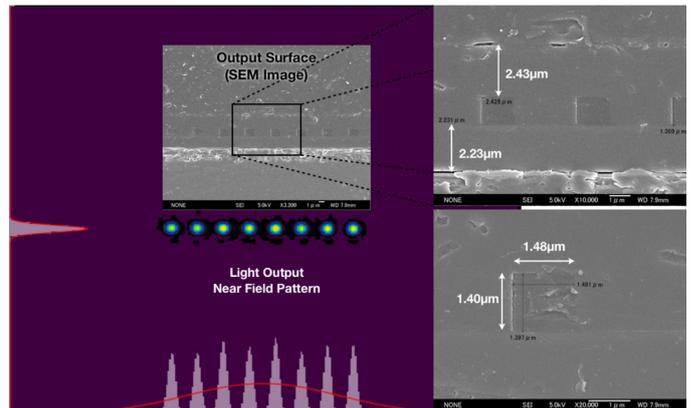


図4 出射端のSEM像と出射光強度分布

4 Si/EO ポリマーハイブリッド小型高性能光変調器

光インターコネクタでは数センチメートルサイズのトランシーバモジュールに、信号処理電子回路、レーザー、フォトダイオード等と共に光変調器を集積する必要があることから、高速であるとともにミリメートルサイズの小型化が必要である。Siは屈折率が高く微細加工プロセスが確立していることから小型化が容易であり、光インターコネクタ用の光変調器として実用化されている。しかし、高速化は50 Gbaud程度で限界に達しており、高速変調のためにはイコライザアンプが必要であることから消費電力も大きい。一方で、EOポリマー光変調器は、超高速光変調が可能ではあるものの屈折率が低いため小型化が困難である。

Siスロット導波路の幅100 nmほどの隙間に、EOポリマーを充填したSi/EOポリマーハイブリッド光変調器(図5)は、100 Gbaudを超える高速変調が可能であるとともに、光変調器の性能指数である $V_{\pi}L$ (半波長電圧×電極長)が小さく、低電圧駆動と小型化が可能である。光インターコネクタにおいては、Si光変調器のキャリア吸収による損失が小さく低駆動電圧に有利なOバンドが主流となっている。我々は、2.2に記載の新規開発したOバンド用高性能EOポリマーを用いてSiハイブリッド光変調器を試作した。表1に、このEOポリマーを用いて試作したSiスロットハイブリッドマッハツェンダ光変調器の変調性能指数と他の光変調器との比較を示す。変調周波数が1 kHzのとき、 $V_{\pi}L$ は単一アーム駆動で0.73 Vcmであった[6]。比較対象の他の変調器の値はプッシュプル駆動の値を2倍して単一アーム駆動に換算した値である。今回の試作では、スロット幅やEO色素濃度、ポーリング電圧な

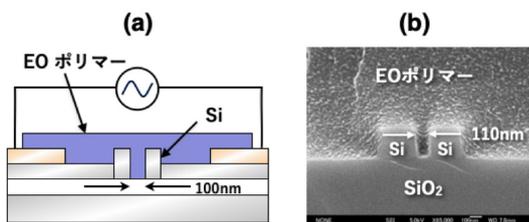


図5 Si/EOポリマーハイブリッド変調器のa) 模式図、b) SEM像

表1 光変調性能指数の比較

	EOポリマー	Si/EOポリマーハイブリッド	Si
$V_{\pi}L$ [Vcm]	2.2 ^{*[7]}	0.73	0.92 ^{*[8]}

* 単一アーム駆動に換算

どがまだ最適化ができていないものの、従来のEOポリマーやSi単独の変調器に比べて低い $V_{\pi}L$ を示した。 $V_{\pi}L$ の設計上の見込値は0.07 Vcmであり、今後、構造等の最適化による更なる改善を見込んでいる。

5 展望

EOポリマーの材料開発は、これまで光ファイバ通信の高速化を目的に、まず光通信波長帯のCバンドをターゲットに開発が進められ、本稿で紹介したように光インターコネクタの必要性からOバンドで高効率な材料開発へと展開してきた。今後、データ通信量の増大は更に加速すると予測され、通信波長帯を更に短波長の1 μm帯へ拡大することが検討されている。また、空間光通信やLiDARの応用では、安価なシステムとしてSiディテクタが使用できる800 nm~1,000 nmの波長帯での運用が検討されている。NICTでは、この状況に鑑み、短波長で使用できる高性能なEOポリマーの開発を進め、可視光の640 nmまで使用可能な高性能EOポリマーの開発にめどを立てており、光通信だけでなくプロジェクターや3次元ディスプレイ、スマートグラスなど幅広い応用展開が期待できる。

謝辞

光フェーズドアレイの研究は、NHK放送技術研究所と共同で行った。Si/EOポリマーハイブリッド小型光変調器の研究の一部は、科学技術振興機構事業研究成果最適展開プログラム(A-STEP)シーズ育成タイプの支援を受けて行った。

【参考文献】

- 1 T. Yamada, I. Aoki, H. Miki, C. Yamada, and A. Otomo, "Effect of methoxy or benzyloxy groups bound to an amino-benzene donor unit for various nonlinear optical chromophores as studied by hyper-Rayleigh scattering," *Mater. Chem. Phys.*, vol.139, pp.699-705, 2013.
- 2 T. Yamada, H. Miki, I. Aoki, and A. Otomo, "Effect of two methoxy groups bound to an amino-benzene donor unit for thienyl-di-vinylene bridged EO chromophores," *Opt. Mater.*, vol.35, pp.2194-2200, 2015.
- 3 大友明, 青木勲, 山田千由美, 山田俊樹, "クロスリンクEOポリマーの光学特性と高温安定性," 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-C42-5, Sept. 2016.
- 4 平野芳邦, 宮本裕司, 本山 靖, 町田賢司, 田中 克, 山田俊樹, 大友 明, 菊池宏, "電気光学ポリマーを用いた4 μmピッチ光フェーズドアレイによる偏向動作," *映像情報メディア学会誌*, vol.73, no.2, pp.392-396, 2019.
- 5 Y. Hirano, Y. Miyamoto, M. Miura, Y. Motoyama, K. Machida, T. Yamada, A. Otomo, and H. Kikuchi, "High-Speed Optical-Beam Scanning by an Optical Phased Array Ising Electro-Optics Polymer Waveguides," *IEEE Photonics Journal*, vol.12, no.2, pp.1-7, art no.66807, 2020.
- 6 大友明, 青木勲, 山田千由美, 横濱秀雄, 山田俊樹, 田澤英久, 村上泰典, "Oバンド用有機EOポリマー/Siハイブリッド光変調器の開発," 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-E204-2, Sept. 2019.
- 7 Y. Shi, C. Zhang, H. Zhang, J. H. Bechtel, L. R. Dalton, B. H. Robinson, and W. H. Steier, "Low (Sub-1-Volt) Halfwave Voltage Polymeric Electro-optic Modulators Achieved by Controlling Chromophore Shape," *Science*, vol.288, pp.119-122, 2000.

- 8 Z. Yong, W. D. Sacher, Y. Huang, J. C. Mikkelsen, Y. Yang, X. Luo, P. Dumais, D. Goodwill, H. Bahrami, P. G.-Q. Lo, E. Bernier, and J. K. S. Poon, "U-shaped PN junctions for efficient silicon Mach-Zehnder and microring modulators in the O-band," Opt. Express, vol.25, no.7, pp.8425-8439, 2017.



大友 明 (おおとも あきら)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
上席研究員
Ph.D.
非線形光学、集積光学デバイス、有機分子フォ
トニクス



山田千由美 (やまだ ちゆみ)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
有期研究技術員
分析化学



上田里永子 (うえだ りえこ)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
有期研究技術員
有機デバイスプロセス技術



横濱秀雄 (よこはま ひでお)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
有期研究技術員
光・電子デバイス、微細プロセス技術



山田俊樹 (やまだ としき)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
主任研究員
博士(工学)
有機材料光・電子物性、光・電子デバイス、
テラヘルツデバイス