

4-3-2 EO ポリマーデバイス技術

4-3-2 EO Polymer Device Technology

大友明 鎌田隼 梶貴博

OTOMO Akira, KAMADA Shun, and KAJI Takahiro

EO ポリマーは、大きな電気光学 (Electro-Optic: EO) 効果と低誘電率の特徴から、光変調器などの光制御デバイスの超高速化、低消費電力化、小型化が期待され、材料とデバイスの開発が進められている。半導体や無機誘電体などを用いたデバイス作製では、ある程度作製技術が成熟していることから、デバイス構造設計に注力できる側面があるが、有機材料である EO ポリマーのデバイス作製では、プロセス、構造、設計全てにおいて新規開発が必要となる。本稿では、EO ポリマー特有のプロセス技術開発を伴う可視光用 EO ポリマー光変調器、上下配置パッチアンテナを用いたアンテナ結合型光変調器について紹介する。

Electro-optic (EO) polymers are expected to contribute to ultra-high speed, low power consumption, and miniaturization of light control devices such as optical modulators, due to its large EO effect and low dielectric constant. In device fabrication using semiconductors and inorganic dielectrics, the fabrication technology has matured to some extent, so there is an aspect where we can focus on device structural design. However, the device fabrication of EO polymer, which is an organic material, requires new developments in all processes, structures, and device designs. This paper introduces an EO polymer optical modulator for visible light and an antenna-coupled optical modulator using non-coplanar patch antennas, which are the devices using EO polymer-specific process technology.

1 まえがき

Beyond 5 G (B5G) では、5 G の 10 倍以上の高速化と同時にビットレートあたり 1/100 の省電力化が必要とされ、データセンターなどの中短距離のデータ通信を担う光インターコネクタにおいては、高速化、低消費電力化とともに小型集積化が必要になる。また、超高速・大容量の無線通信を実現するために、無線周波数が 100 GHz 以上のテラヘルツ領域 (0.1-10 THz) に達することが見込まれている。テラヘルツ波は電線伝送損失が大きいことから、テラヘルツ波の信号波形を、光ファイバーを用いて伝送する光ファイバー無線 (Radio-over-Fiber: RoF) 技術が注目されている。光ファイバー無線システムのモバイルフロントホールの一部無線区間やリモートアンテナなどにおける無線信号の受信において、無線信号から光信号への変換を行うデバイスとして、空間伝搬するテラヘルツ波で直接変調できるアンテナ結合型テラヘルツ変調器が必要となる。さらに、B5G のプラットフォームを活用した仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) などのユーザーインター

フェースとして、3D ディスプレイやスマートグラスなどの実現のために、可視光で利用可能な超高速光フェーズドアレイや空間光変調器が必要となる。

光インターコネクタにおいて、その通信速度を決定づけるデバイスが光変調器であり、高速変調が可能な電気光学 (Electro-Optic: EO) 効果を用いた変調器が用いられている。長距離基幹系光通信では、EO 材料として無機強誘電体の LiNbO_3 (LN) が使われている。しかし、LN は誘電率が高く加工性にも難があるため、高速化、小型化が困難である。これに対して EO ポリマーは、大きな電気光学係数を有し、性能指数が LN を上回る。さらに、誘電率が低く高速光変調に有利である。また、テラヘルツ領域において吸収係数が比較的小さく、高効率なテラヘルツ変調器が実現できる。また、スピコートにより成膜が可能で薄膜化が容易であることや、反応性イオンエッチングなどの半導体加工技術が適用できることから、高精度な光導波路加工が可能である。

一方で、これまで有機ポリマーを用いたパッシブな導波路としての作製技術開発はされてきたものの、ア

クティブデバイスとしてのデバイス作製は例が少ない。特にEOポリマーは、成膜後に電場配向(ポーリング)が必要であり、その制限がある中での有機材料あるいはポリマー特有のプロセス技術開発が求められる。本稿では、NICTで開発しているEOポリマー超高速光制御デバイスの中で、EOポリマー特有のプロセス技術を用いた可視光用EOポリマー光変調器、上下配置パッチアンテナを用いたアンテナ結合型光変調器のデバイス作製と特性について紹介する。

2 EOポリマーデバイス技術

2.1 EOポリマー光変調器構造

表1に、EOポリマーを用いた光変調器構造の種類とその特徴についてまとめる。表中①~③は、EOポリマーをコアとした導波路構造で、EOポリマーの低誘電率を活かした帯域300GHzを超える超高速光変調器を実現可能である。EOポリマーデバイス開発の初期には、EOポリマーを加工しない①逆リッジ構造が用いられたが、高性能化を図る過程で、高耐熱ポリマーを用いた場合のクラック発生や、上部クラッド界面が凹み導波路モードが歪むなどの問題が顕在化した。しかし最近では、EOポリマーの加工条件を整えることで、性能劣化させることなく加工できるようになり、②リッジ型や③チャンネル型が可能になった。また、①は構造作製後にポーリングしなければならないため低抵抗率クラッドが必要になるが、②③はポーリング済のEOポリマーを転写する転写プロセスにより作製できるため、クラッドの抵抗率には依存しない。転写

プロセスについては2.3で詳述する。表中④~⑤は、Siなどの半導体[1][2]やAuなどの金属スロット構造[3]とのハイブリッド導波路であり、EOポリマーコア導波路よりも小型化に優位である。特に、④Siハイブリッド導波路は、Siフォトニクスとの互換性が高く、集積化、大量生産に優位である。しかし、幅100nm程度の狭い溝にEOポリマーを充填しポーリングするため、電荷注入抑制などの界面制御が課題である。

2.2 可視光用EOポリマー光変調器

EOポリマーデバイスは、これまで光ファイバー通信波長帯で使用する超高速光変調器の実現を目標に開発が進められてきたが、可視光までの短波長帯で利用できれば、安価なSiディテクタと組み合わせた短距離LiDARや立体ディスプレイなどの新たな応用展開も期待できる。しかし、光通信用に開発されたCバンド用のEOポリマーは、短波長帯では吸収が大きく使用できない。一方で、波長1,000nm以下の短波長帯で透明なEOポリマーはEO係数が小さく、高効率の変調ができないと考えられてきた。NICTでは、新たに可視光用の高性能EOポリマーの合成に成功し、可視光で動作する高効率な光変調器の開発に成功した[4]。

可視光用EOポリマー導波路には、入射光ファイバーとのモードサイズマッチングを図るため、図1(a)に示すようにリッジ型導波路を採用した。導波路コアはEOポリマー、クラッドは有機シリカとした。リッジ型導波路の幅はフォトリソグラフィで作製できるように1.0μmとした。シングルモード導波路になるように、数値計算によりリッジ高さ0.25μm、スラブ厚

表1 EOポリマー光変調器の構造

導波路	EOポリマーコア導波路			ハイブリッド導波路	
	①逆リッジ型	②リッジ型	③チャンネル型	④Siスロット	⑤プラズモン
構造					
長さ [mm]	5 ~ 10			0.5 ~ 1	0.01 ~ 0.02
電極間隔 [μm]	5 ~ 10			0.1 ~ 0.2	0.05 ~ 0.1
優	<ul style="list-style-type: none"> EOポリマーをエッチング加工しない 超高速 (>300GHz) 	<ul style="list-style-type: none"> スラブ/クラッド界面が平坦 	<ul style="list-style-type: none"> リッジ型に比べて横閉込めが強い 	<ul style="list-style-type: none"> コンパクト Siフォトニクス互換 クラッド不要 DC制御が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 超コンパクト 超高速 (>300G)
	劣	<ul style="list-style-type: none"> 上部クラッド界面が凹(モードが変形) 低抵抗クラッドが必要 	<ul style="list-style-type: none"> EOポリマーのエッチング加工が必要(加工条件の最適化によりRIEが可能) 		<ul style="list-style-type: none"> RC時定数が大きい(~100GHz)
		<ul style="list-style-type: none"> 大きい(cmスケール) DC制御が困難(クラッドの室温での抵抗が高い) 			<ul style="list-style-type: none"> 高い加工精度が必要 ポーリング効率の改善が課題

さ $0.35 \mu\text{m}$ に設計した。

デバイス作製では、まずシリコン基板上に下部電極 IZO を RF スパッタで成膜/パターニングした。導波路の下部クラッドである有機シリカをゾル-ゲル法で成膜した後、EO ポリマーを成膜してアニール処理した。EO ポリマーの EO 効果を発現させるために、ガラス転移温度近傍で電場を印加し、ポーリング処理を施した。ポーリング処理後、フォトリソグラフィでエッチングマスクを Mach-Zehnder 型干渉計 (MZI) 形状にパターニングし、 O_2/CHF_3 混合ガスによる反応性イオンエッチング (RIE) を用いてリッジ型導波路に加工した。その後、導波路の上部クラッドである有機シリカを成膜して、上部電極 IZO を成膜/パターニングした。用いた可視光用 EO ポリマーのガラス転移温度 ($T_g = 164 \text{ }^\circ\text{C}$) に対して、ポーリング後のプロセス温度は $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下であることから、後工程による配向緩和に伴う特性劣化はほとんどない。リッジ型導波路の断面 SEM 像を図 1(b) に示す。下部/上部電極の IZO 電極、導波路クラッドの有機シリカ、導波路コアの EO ポリマーの各層から形成されている。リッジ型導波路は、幅 $1.14 \mu\text{m}$ 、リッジ高さ $0.27 \mu\text{m}$ 及びスラブ

厚さ $0.33 \mu\text{m}$ であり、側壁は 85° 以上の垂直性の高い導波路が作製できている。

波長 640 nm の TM 偏光のレーザー光をエッジカップリングで MZI に入射し、作製した EO ポリマー光変調器の変調特性を評価した。位相が π シフトする電圧 (半波長電圧) は、 $V_\pi = 1.30 \text{ V}$ であった。光変調器において、半波長電圧 V_π と位相変調器の長さ L の積 $V_\pi L$ は、光変調器の性能を比較する上で重要な性能指数であり、小さいほど高性能であることを示す。上記光変調器の位相変調器の長さは 0.4 cm であり、性能指数 $V_\pi L$ は 0.52 Vcm であった。この値は、通信波長帯で動作する EO ポリマー変調器と比較して $1/3$ 以下の非常に小さい値である。可視光で動作する高効率な EO ポリマー光変調器の開発に成功し、今後 3D ディスプレイやスマートグラスなどの次世代表示デバイスへの応用展開が期待できる。

2.3 上下配置パッチアンテナを用いたアンテナ結合型光変調器

NICT ではこれまで、テラヘルツ無線信号から光信号への直接変換を行う無線-光信号変換デバイスの実現を目指し、EO ポリマー導波路とギャップ埋め込み型パッチアンテナを用いた W バンド帯 ($75\text{--}110 \text{ GHz}$) アンテナ結合型光変調器を報告してきた [5]。光変調効率の更なる向上を目指し、EO ポリマー導波路と上下配置パッチアンテナを用いた D バンド帯 ($110\text{--}170 \text{ GHz}$) アンテナ結合型光変調器を試作した [6]。

従来の EO ポリマーデバイスの作製プロセスでは、ポーリング電極と導電性のクラッド層、EO ポリマー導波路コアを有する構造を作製し、導電性のクラッド層を介して EO ポリマー導波路コアのポーリングが行われていた。しかし、この方法で作製したデバイスは、ポーリング電極の配置などデバイス構造に制約があるだけでなく、導電性のクラッドによるテラヘルツ波の吸収損失が課題となっていた。NICT では、あらかじめポーリングを行った EO ポリマーを基板上へ転写するという独自のプロセス技術の開発を行っており、EO ポリマーとテラヘルツ波低吸収損失材料であるシクロオレフィンポリマー (COP) を組み合わせたデバイス作製を可能とした [5]–[7]。図 2 に転写法を用いたデバイス作製プロセスを示している。グラウンド電極と COP 層、下部パッチアンテナ、下部 COP クラッド層を有する基板上に、あらかじめポーリングを行った EO ポリマー層を転写した。光リソグラフィーとドライエッチングを用いた微細加工プロセスにより導波路構造を作製後、UV 硬化樹脂からなる上部クラッド層を形成し、微細加工プロセスにより上部パッチアンテナを作製した。

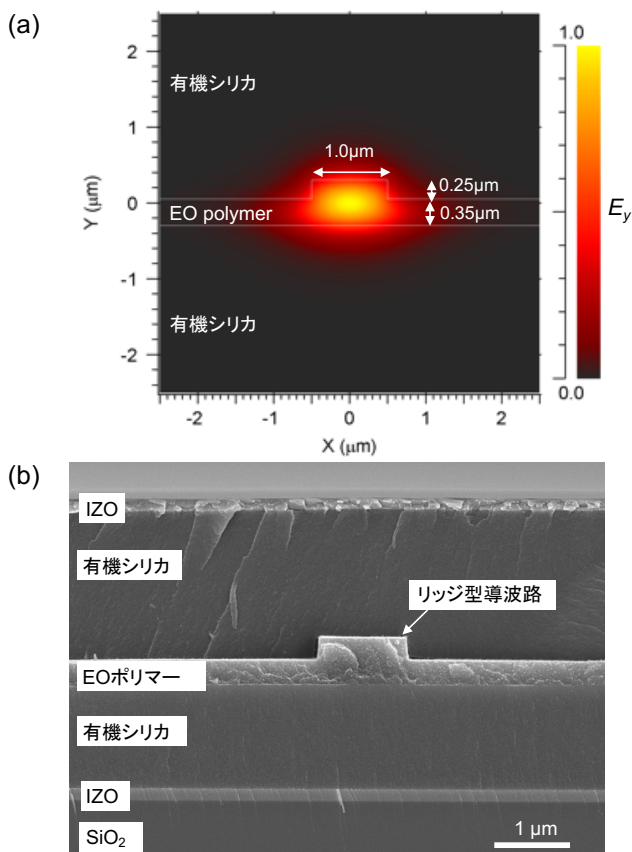


図 1 可視光用 EO ポリマー光導波路、(a) リッジ型導波路のモードフィールド、(b) 断面 SEM 像

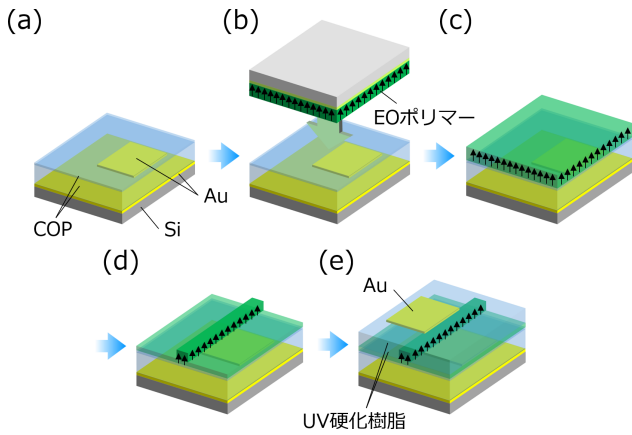


図2 転写法を用いたアンテナ結合型EOポリマー光変調器の作製プロセス

率が2倍になる。図3(d)に150 GHz電磁波を照射したときの光スペクトルを示している。150 GHz電磁波照射時のキャリアサイドバンド比は42.3 dB(照射パワー密度: 34.3 W/m²)であり、15.3 mradの光位相シフトに対応するものであった。図3(e)にキャリアサイドバンド比の周波数依存性を示している。波線は、EOポリマーの電気光学係数を36 pm/Vとして計算した値を示しており、実験値とおおむね一致することが確認された。今後は、光変調効率の更なる向上と高周波動作化に向けた改良を進めるとともに無線通信実験への適用を進めていく。

3 おわりに

NICTで研究開発中のEOポリマーデバイスの一部について紹介した。NICTでは、材料開発とプロセス技術開発、デバイス構造設計をコンカレントに取り組むことで、新規EOポリマーデバイスの動作実証を世界に先駆けて実現してきた。今回紹介したデバイス以外にも、光インターコネク用Oバンド超高速小型光変調器、機械動作なしに光ビームを操作する光フェーズドアレイ、レーザー核融合の燃焼ダイナミクス解析のための高時間分解中性子検出器などの原理実証に成功している。これらの各種光制御デバイスの原理実証に成功したことで企業との連携が深化しており、今後は光トランスミッターやLiDAR、空間光通信用のビーム操作光エンジンなどのサブシステム開発に連携して取り組んでいく。また、近年多くの材料メーカーがEOポリマー開発に参画するようになり、材料の更なる高性能化も期待できる。NICTは、EOポリマーの評価技術を積極的技術指導し、多くの企業が独自に開発できるよう支援を行っている。EOポリマーデバイスの実用化に向けて、NICTがコアとなり、材料メーカー、デバイスメーカー、応用システムメーカーとの連携を深め、社会実装を目指していく。

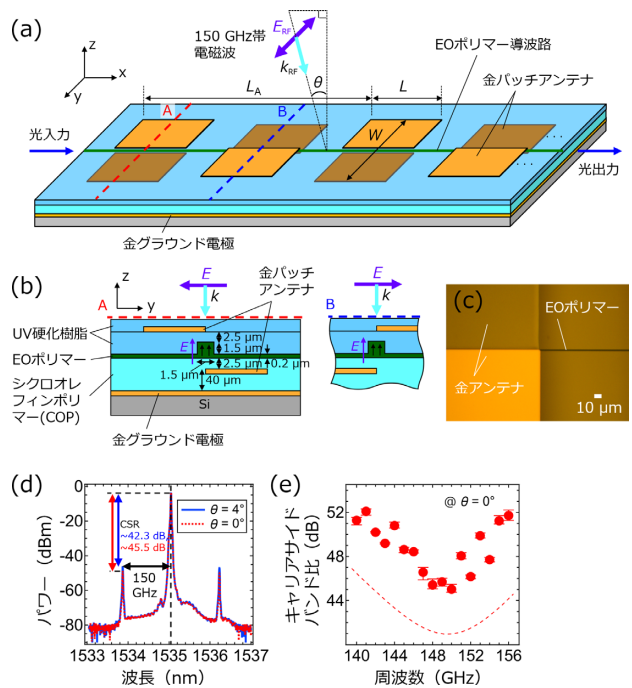


図3 (a), (b) アンテナ結合型光変調器の模式図と(c)顕微鏡画像、(d)150 GHz電磁波照射時の光スペクトル、(e)キャリアサイドバンド比の周波数依存性

図3(a)-(c)にDバンド帯アンテナ結合型光変調器の模式図とデバイスの顕微鏡画像を示している。電磁場シミュレーションの結果、上下配置アンテナ型とすることで、導波路位置における垂直方向(z方向)の電場強度が平面アンテナ型と比較して約3倍向上することが示された[6]。また、上部パッチアンテナと下部パッチアンテナから構成されるパッチアンテナ対が、高周波電磁波が1波長進む時間に光が導波路中を進行する距離に対応した周期(L_A)で配置されており、光位相変調の効果が蓄積される。さらに、上下のパッチアンテナの配置を反転させたパッチアンテナ対が半周期(L_A/2)ごとに交互に配置されており、高周波電磁波の「山」と「谷」の両方を利用することで、光位相変調の効

謝辞

アンテナ結合型光変調器の研究開発の一部は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254)のうち「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」の支援を受けて行った。

【参考文献】

- 1 C. Kieninger, Y. Kutuvantavida, D. L. Elder, S. Wolf, H. Zwickel, M. Blaicher, J. N. Kemal, M. Laueremann, S. Randel, W. Freude, L. R. Dalton, and C. Koos, "Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator," *Optica*, vol.5, pp.739-748, 2018.
- 2 大友 明, 山田 千由美, 上田 里永子, 横濱 秀雄, 山田 俊樹, "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,” 情報通信研究機構研究報告, 先端 ICT 基盤技術特集号, vol.66, no.2, 2-1-1, 2020.
- 3 A. Melikyan¹, L. Alloatti, A. Muslija, D. Hillerkuss, P. C. Schindler, J. Li, R. Palmer, D. Korn, S. Muehlbrandt, D. Van Thourhout, B. Chen, R. Dinu, M. Sommer, C. Koos, M. Kohl, W. Freude, and J. Leuthold, “High-speed plasmonic phase modulators,” *Nature Photon.*, vol.8, pp.229–233, 2014.
 - 4 S. Kamada, R. Ueda, C. Yamada, K. Tanaka, T. Yamada, A. Otomo, “Superiorly low half-wave voltage electro-optic polymer modulator for visible photonics,” *Opt. Express*, vol.30, pp.19771–19780, 2022.
 - 5 T. Kaji, I. Morohashi, Y. Tominari, N. Sekine, T. Yamada, and A. Otomo, “W-band optical modulators using electro-optic polymer waveguides and patch antenna arrays,” *Opt. Express*, vol.29, pp.29604–29614, 2021.
 - 6 T. Kaji, I. Morohashi, Y. Tominari, M. Ohara, T. Yamada, and A. Otomo, “D-band optical modulators using electro-optic polymer waveguides and non-coplanar patch antennas,” *Opt. Express*, vol.31, pp.17112–17121, 2023.
 - 7 T. Kaji, Y. Tominari, T. Yamada, S. Saito, I. Morohashi, and A. Otomo, “Terahertz-wave generation devices using electro-optic polymer slab waveguides and cyclo-olefin polymer clads,” *Opt. Express*, vol.26, pp.30466–30475, 2018.



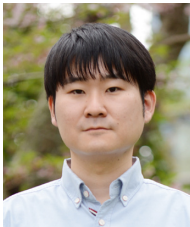
大友 明 (おおとも あきら)

未来 ICT 研究所 上席エキスパート
未来 ICT 研究所
神戸フロンティア研究センター
ナノ機能集積 ICT 研究室
室長 (兼務)
Ph.D.

有機分子フォトンクス、非線形光学デバイス、
集積光学

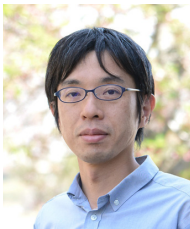
【受賞歴】

2023 年 第 68 回 (令和 4 年度) 前島密賞



鎌田 隼 (かまだ しゅん)

未来 ICT 研究所
神戸フロンティア研究センター
ナノ機能集積 ICT 研究室
研究員
博士 (工学)
光デバイス、ナノフォトンクス



梶 貴博 (かじ たかひろ)

未来 ICT 研究所
神戸フロンティア研究センター
ナノ機能集積 ICT 研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
超高速有機光デバイス

【受賞歴】

2023 年 第 68 回 (令和 4 年度) 前島密賞