

産経新聞社賞

電気光学ポリマーを用いたアンテナ結合型
テラヘルツ光変調器とプロセス技術の
研究開発

国立研究開発法人情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
神戸フロンティア研究センター

梶 貴博 山田 俊樹 大友 明

1. 緒 言

新たなサイバーフィジカルシステムを支える6G以降の無線通信システムの実現に向けて、無線通信の超高速・大容量化が必要とされており、従来のモバイル周波数帯と比較して広大な周波数帯域を利用できるテラヘルツ帯(0.1~10 THz)の利用が見込まれている。このような無線通信の超高速・大容量化を実現するためには、光ファイバーを用いた信号伝送が不可欠であり、光ファイバーを用いて無線信号を光信号として伝送する光ファイバー無線(Radio-over-Fiber(RoF))が注目されている(図1) [1, 2]。テラヘルツ波は指向性が高く、膨大な数のリモートアンテナが必要となるが、全てのリモートアンテナを光ファイバーで接続するには難しい局面がある。そこで、モバイルフロントホールの一部区間を無線化する技術が必要とされており、光信号と無線信号を相互に変換(O/E変換、E/O変換)する技術が必要となる。また、ユーザー端末との間で無線信号を送受信するリモートアンテナにおいても、光信号と無線信号の相互変換が必要となる。従来型のデジタルRoF(D-RoF)では、O/EおよびE/O変換部にDAC(デジタル-アナログ変換器)やADC(アナログ-デジタル変換器)に加えてDSP(デジタル信号処理装置)が使用されており、従来技術の延長ではテラヘルツ帯への対応が容易でないことに加えて、システム全体で見たときの消費電力や、帯域幅、レイテンシーにおいて課題がある。そこで近年、デジタル信号への変換を行うことなくO/EとE/O変換を行うアナログRoF(A-RoF)が注目されている(図2)。A-RoFは光通信技術との親和性が高く、これまで培ってきた光通信技術をそのまま適用できるという利点があり、様々な変調方式を利用した周波数利用効率の向上が可能であることから、超高速・大容量無線通信の実現につながることを期待されている。

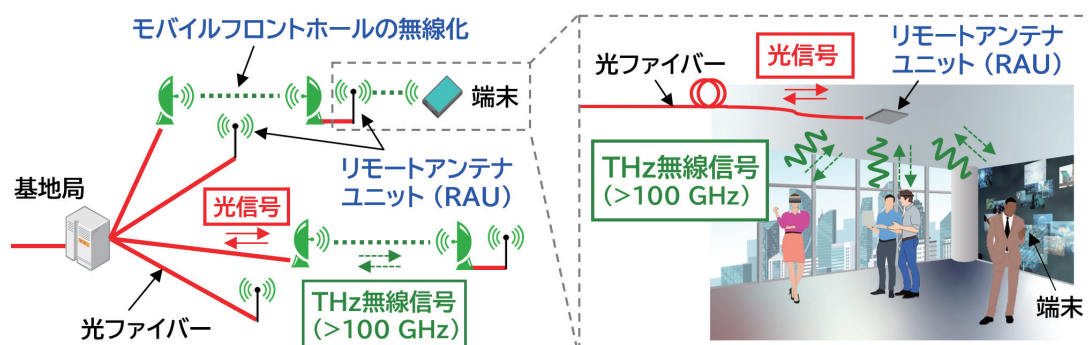


図1. 光ファイバー無線 (Radio-over-Fiber (RoF)) に基づく次世代無線通信システム

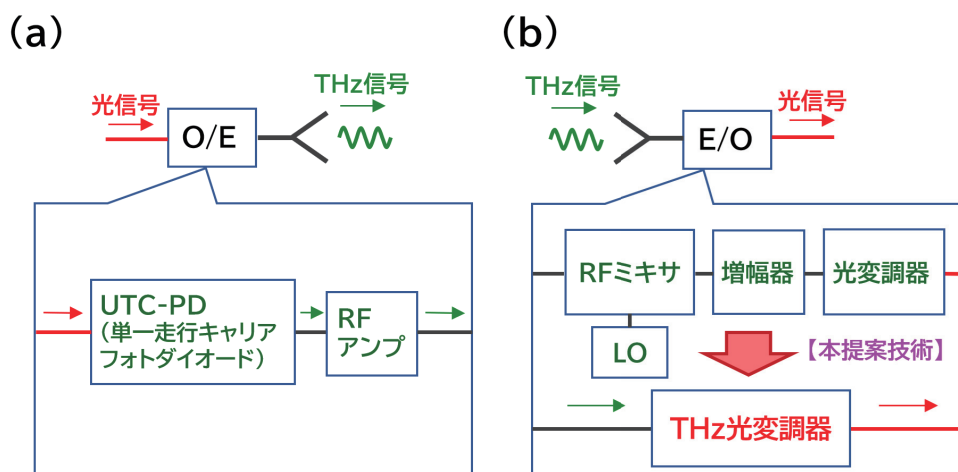


図2. テラヘルツ波を用いたアナログ RoF (THz-A-RoF) における (a) O/E 変換、
(b) E/O 変換技術

テラヘルツ波を用いた A-RoF (THz-A-RoF) における、光信号からテラヘルツ無線信号への変換 (O/E 変換) に関しては、単一走行キャリアフォトダイオード (Uni-Traveling-Carrier Photodiode: UTC-PD) を O/E 変換器として用いることで光信号から無線信号へ直接変換する技術が提案されている (図2) [3]。一方、テラヘルツ無線信号から光信号への変換 (E/O 変換) に関しては、局部発信機 (Local Oscillator: LO) と RF ミキサーによって中間周波数 (Intermediate Frequency : IF) 信号に変換し、増幅後、光変調器を用いることで光信号への変換が行われていた [3,4]。しかし、この方法は、部品点数が多く機構が複雑であるとともに高コストであるなどの課題があった。そこで、2次非線形光学材料を用いることで、電気信号への変換を介することなく、テラヘルツ無線信号から光信号への直接変換を行う E/O 変換器が注目を集めている。これまでの研究で、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) 光変調器を E/O 変換器として用いることで、28 GHz 帯 [5] や 101 GHz 帯 [6] での A-RoF による無線伝送が報告されている。また、電気光学 (EO) ポリマー / プラズモン導波路型光変調器を E/O 変換器として用いることで、60 GHz 帯 [7]、230 GHz 帯 [8]、288.5 GHz 帯 [9] での A-RoF による無線伝送が報告されている。このように、テラヘルツ帯での E/O 変換において、効率および高周波特性に優れた EO ポリマーを用いた E/O 変換器が分野をリードしている状況であるが、これまでに報告されている EO ポリマー / プラズモン導波路型光変調器は、光損失が非常に大きい (~ 500 dB/mm [10]) ことに加えて、素子ごとにポーリング処理 (EO 分子の配向化処理) が必要であるため、量産化が容易でないなどの課題があった。

著者らは、EO ポリマーを用いた E/O 変換器における上記の課題を解決するため、予めポーリング処理を行った EO ポリマー膜を転写するデバイス作製プロセス技術を世界で初めて開発し [11]、量産化可能なデバイス構造のアンテナ結合型 EO ポリマー光変調器 (E/O 変換器) の研究開発を行ってきた [12-15]。本論文では、転写法を用いたデバイス作製プロセスやこれまでに開発してきた 100 GHz 帯 [12,13]、150 GHz 帯 [14]、375 GHz 帯 [15] アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器について述べる。

2. 電気光学(EO)ポリマー膜を転写するデバイス作製プロセス技術の開発

2次非線形光学材料である EO ポリマー[16,17]は、電子ドナーと電子アクセプターが π 共役系を介して結合した基本構造をもつ EO 分子とポリマーから構成される(図3)。EO ポリマーは、LiNbO₃などの無機非線形光学材料と比較して EO 係数が大きく($r_{33} > \sim 100$ pm/V)、屈折率を考慮した光変調の性能指数(n^3r)が LiNbO₃などよりも大きい。また、LiNbO₃などの無機非線形光学結晶は結晶格子振動によるテラヘルツ波の吸収損失のため、使用可能なテラヘルツ領域が限られるのに対し、アモルファス材料である EO ポリマーは、テラヘルツ帯の広範囲でテラヘルツ波の吸収損失が比較的小さい[18]。これらの特徴から、EO ポリマーを用いることで、高効率かつ数百 GHz 以上の超高速動作が可能な光変調デバイスを実現できる。著者らのグループでは、ポリマー側鎖に EO 分子が結合した側鎖型 EO ポリマーの開発を進めてきた(図3)。側鎖型 EO ポリマーは、EO 分子とポリマーを混合したゲスト・ホスト型 EO ポリマーなどと比較して、熱緩和特性に優れるとともに高い EO 分子濃度を実現でき、高い熱安定性や高い EO 係数などの実用化の上で重要な特性を有している。また、EO ポリマーは、スピコート法による成膜が可能であるため、高効率な導波路型デバイスなどの作製のために重要となる薄膜化が容易であり、ドライエッチングなどの一般的な微細加工プロセスを用いた加工が可能であることも大きな利点である。

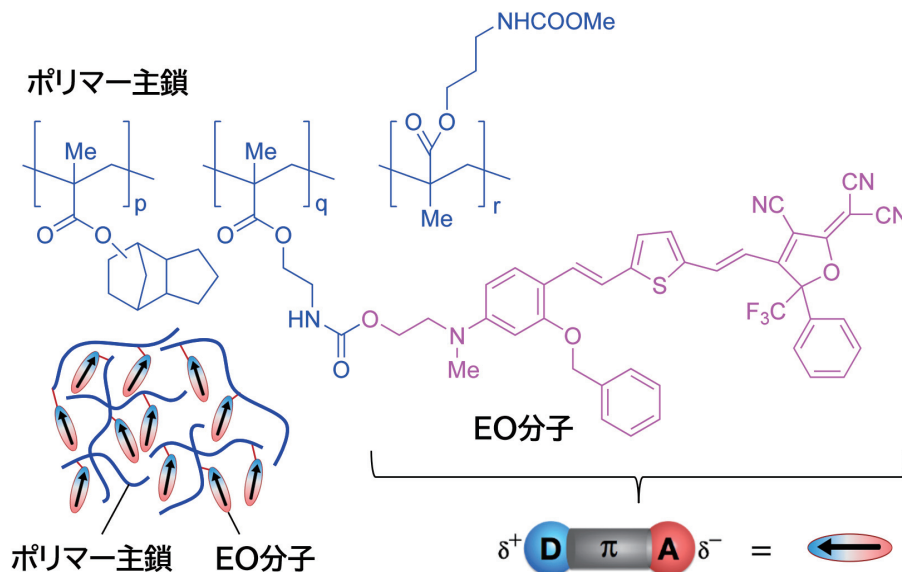


図3. 側鎖型電気光学(EO)ポリマーの構造例

EO ポリマーが2次非線形光学効果を発揮するためには、EO ポリマーに含まれる EO 分子を配向させるポーリングと呼ばれるプロセスが必要である。そのため、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、導電性クラッド層、EO ポリマー層を含むデバイス構造を先に作製し、その後、電極間に電圧を印加して EO ポリマー層のポーリングが行われていた[19]。ここで、光導波路のコアとなる EO ポリマー層に加えて導電性のクラッド層が必要となるのは、電圧降下を抑制し EO ポリマー層に効率的に電界を印加するためである。しかしながら、この方法で作製されたデバイスは、ポーリング電極の配置に自由度が

なくデバイス構造に制約があることに加え、導電性のクラッド層によるテラヘルツ波の吸収損失が大きいことが課題となっていた。このような背景から、著者らは、予めポーリングを行った EO ポリマー膜を任意の基板上へ転写するプロセス技術を開発した [11]。図4に転写法によるデバイス作製プロセスの概要を示している。まず、下部ポーリング電極を有する基板を用意し、その上にスピコート法によって EO ポリマー層を形成した。さらに上部ポーリング電極を形成し、EO ポリマーのガラス転移温度付近まで加熱した状態で電極間に電圧を印加することでポーリング処理を行った。その後、上部ポーリング電極を除去し、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) 基板等の任意の基板上へ EO ポリマー膜を転写した。この方法の開発により、従来プロセス技術では作製が困難であった COP などの導電性をもたない材料基板や任意の基板と EO ポリマーを組み合わせたデバイス作製が初めて可能となった。

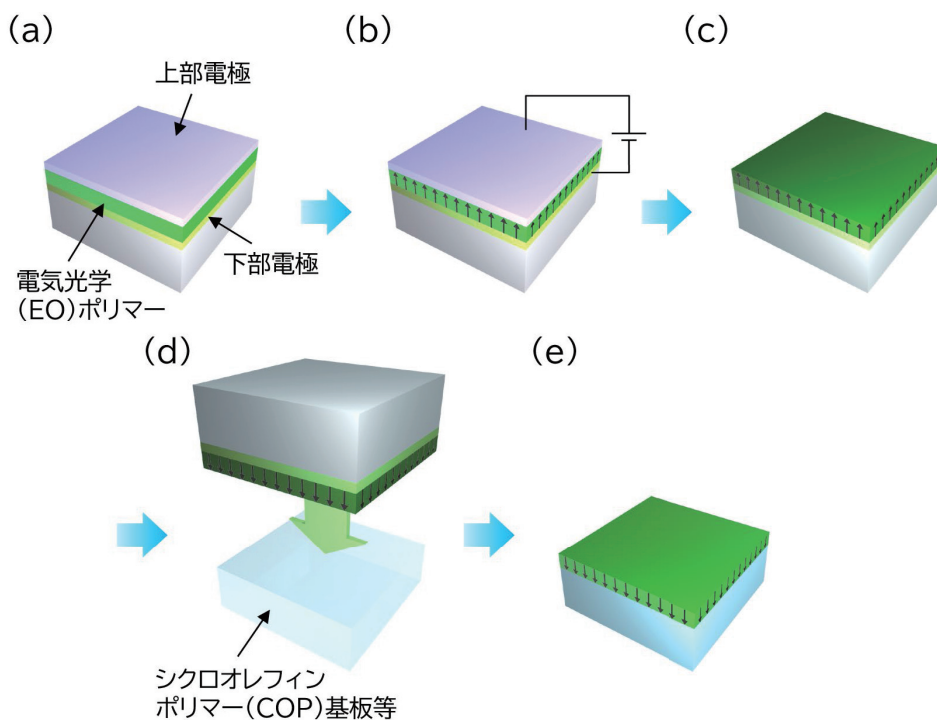


図4. 転写法による EO ポリマーデバイスの作製プロセス；(a) 下部ポーリング電極と EO ポリマー層、上部ポーリング電極の形成、(b) EO ポリマー層のポーリング、(c) 上部電極の除去、(d) (e) EO ポリマー層の転写

3. 上下配置パッチアンテナアレイを有するアンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の開発

著者らは、EO ポリマーの転写法を用いることで、ギャップ埋め込み型平面パッチアンテナアレイを有する 100 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器 [12]、上下配置パッチアンテナアレイを有する 100 GHz 帯 [13] および 150 GHz 帯 [14]、375 GHz 帯 [15] アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の開発を行った。図5にギャップ埋め込み型平面パッチアンテナ (図5 (a, b)) および上下配置パッチアンテナ (図5 (c, d)) を有する 150 GHz 帯 EO ポリマー光

変調器の有限要素法による電磁場シミュレーション結果を示している[14]。ギャップ埋め込み型平面パッチアンテナでは、EO ポリマー導波路の直上にパッチアンテナのギャップ部におけるエッジが来るように配置されているのに対して、上下配置型パッチアンテナでは、EO ポリマー導波路の直上および直下に上部および下部パッチアンテナのエッジが来るように配置されている。電磁場シミュレーションにおいて、 y 方向の偏波を有するテラヘルツ波をアンテナ上部から照射した結果、ギャップ埋め込み型平面パッチアンテナでは、照射テラヘルツ電場に対する EO ポリマー導波路位置での z 方向電場の増強率が42倍 (150 GHzにおいて)であったのに対し、上下配置パッチアンテナでは、照射テラヘルツ電場に対する EO ポリマー導波路位置での z 方向電場の増強率が121倍 (150 GHzにおいて)であり、上下配置パッチアンテナでは電場増強率が約3倍向上することが示された。また、3 dB 帯域幅は約15 GHzであったことから、広帯域の無線信号の受信に使用できると考えられる。

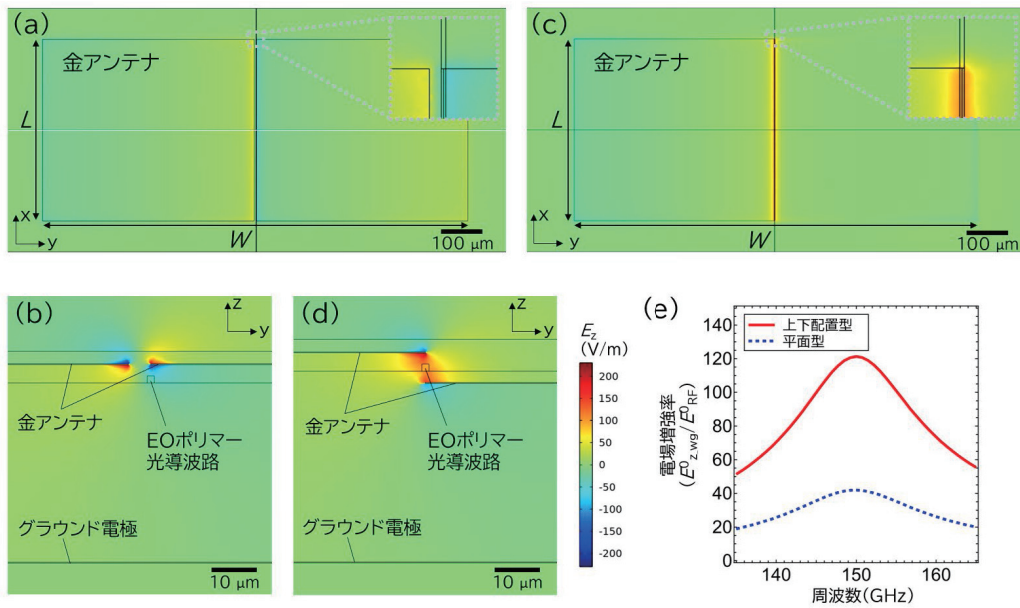


図5.(a, b) ギャップ埋め込み型平面パッチアンテナおよび (c, d) 上下配置パッチアンテナを有する150 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の電磁場シミュレーション結果、(e) EO ポリマー導波路位置での電場増強率

図6 (a-d) に上下配置パッチアンテナアレイを有する150 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の構造と試作した素子の外観、顕微鏡画像を示している。EO ポリマー光変調器 (光位相変調器) では、EO ポリマー導波路において EO 分子のポーリング方向に対応する z 方向の電場が印加されると、EO 効果 (ポッケルス効果) による屈折率変化が生じ、導波路中を伝搬する光の位相が変調される。本研究のアンテナアレイを有する光位相変調器では、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、テラヘルツ波が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、複数のパッチアンテナ対の配置により光位相変調が蓄積される。さらに、上下のパッチアンテナの配置を導波路に対して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ることで、テラヘルツ波の「山」だけでなく「谷」も利用して光位相変調できるようになる。

り、光位相変調の蓄積が2倍になる。試作した150 GHz 帯光変調器のデバイス長は7 mm であり、反転配置を含むパッチアンテナ対の総数は10であった。また、透過型エリプソメトリー法[20]で測定したデバイス作製に使用したEO ポリマー膜の波長1.55 μm におけるEO 係数は36 pm/V であった。図6 (e) に150 GHz 電磁波を照射したときの出力光のスペクトルを示している。デバイスに入射した波長1.5 μm 帯のキャリア光から150 GHz 離れた位置に明瞭な光変調サイドバンドが観測された。光変調サイドバンドのキャリアサイドバンド比は42.3 dB(照射電力密度：34.3 W/m²)であり、これは15.3 mrad の光位相シフトに相当するものであった。図6 (f) は、キャリアサイドバンド比の照射電磁波周波数依存性を示している。波線はEO ポリマーのEO 係数を36 pm/V として計算した値である。設計値である150 GHz 付近で最も変調効率が高く、また、計算値と実験値が概ね一致することが確認された。また、カットバック法によって見積もられたEO ポリマー導波路の波長1.55 μm 帯における伝搬損失は約3 dB/cm であり、ロスが大きな課題となっているEO ポリマー / プラズモン導波路型光変調器と比較して光損失において利点を有するものと考えられる。

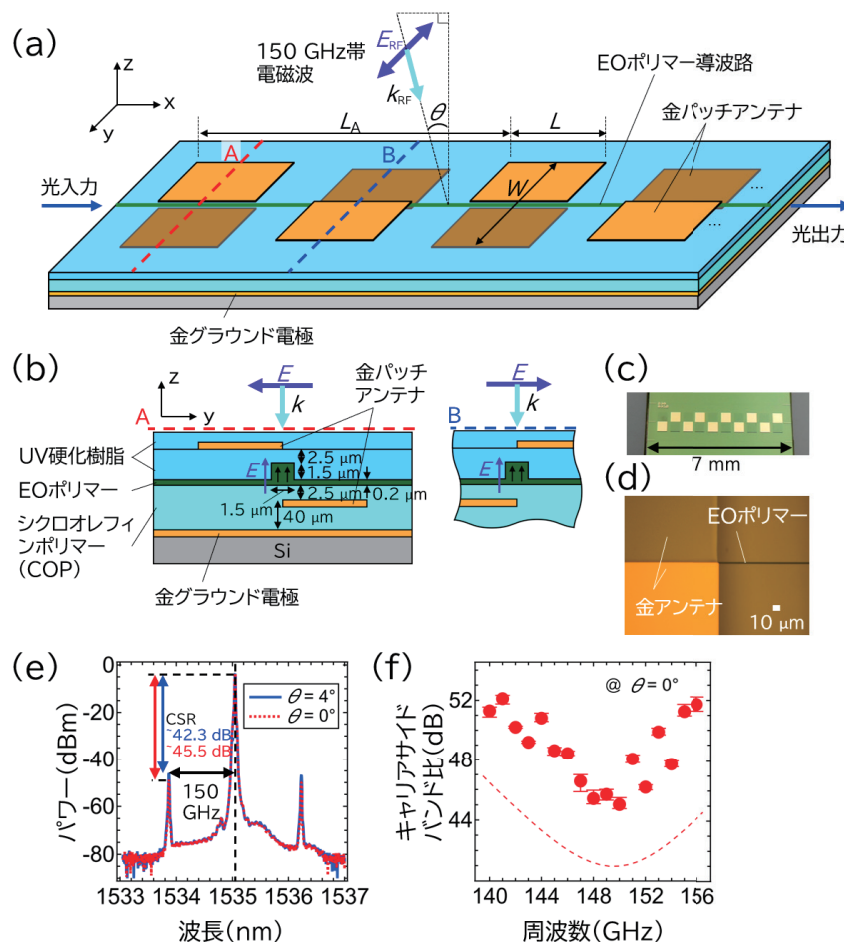


図6. 上下配置パッチアンテナアレイを用いた150 GHz 帯アンテナ結合型EO ポリマー光変調器の (a, b) 模式図と (c) 外観、(d) 顕微鏡画像、(e) 150 GHz 電磁波照射時の出力光のスペクトル、(f) キャリアサイドバンド比の周波数依存性

さらに、最近の実験において、市販の UTC-PD と RF アンプをテラヘルツ波送信機 (O/E 変換器) として用い、本研究の上下配置アンテナアレイを有する 150 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器をテラヘルツ波受信器 (E/O 変換器) として用いた A-RoF による無線伝送評価を実施した。その結果、150 GHz 帯にて 10 Gbps の QPSK 信号の無線伝送 (ビットエラーレート: 1×10^{-3}) の実証に成功している [21]。本結果は、量産化可能なデバイス構造を有する EO ポリマー素子を使用した A-RoF による無線伝送として、これまでで最も高い周波数での報告であるとともに、LiNbO₃ 光変調器を用いた A-RoF による無線伝送の報告 [5,6] と比較しても高い周波数であるといえる。

次に、300 GHz 以上の高周波を用いた A-RoF の実証に向けて、上下配置パッチアンテナアレイを用いた 375 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の試作と評価を行った [15]。試作した 375 GHz 帯光変調器のデバイス長は 10 mm であり、反転配置を含むパッチアンテナ対の総数は 40 であった。図 7 (a, b) に試作した 375 GHz 帯アンテナ結合型光変調器の顕微鏡画像とデバイス評価系を示している。マイクロ波発生器からの信号を逡倍器に導入することで 375 GHz 帯電磁波を発生させ、ホーンアンテナを用いることで EO ポリマー光変調器に照射した。また、波長 1.55 μm 帯の連続発振レーザー光を、テーパードレンズドファイバーを用いてデバイスに入射し、出力光を光スペクトラムアナライザーで測定した。図 7 (c) に出力光のスペクトルを示している。47 dB (照射電力密度: 290 W/m^2) のキャリアサイドバンド比を有する明瞭な光変調サイドバンドが観測された。本結果から、本研究開発のアンテナ結合型 EO ポリマー光変調器を用いることで、375 GHz という高周波電磁波であっても電磁波照射による直接光変調が可能であることが示された。本結果は、電磁波照射による直接光変調の報告として、これまでで最も高い周波数での報告であると考えている。

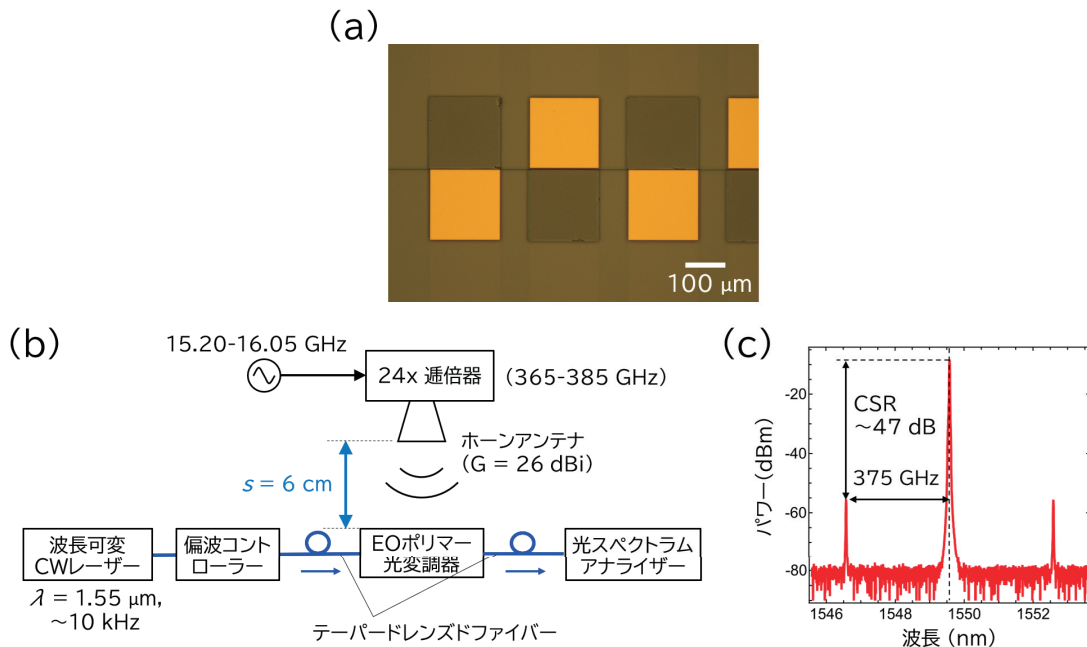


図 7. 上下配置パッチアンテナアレイを用いた 375 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の (a) 顕微鏡画像、(b) 評価系、(c) 375 GHz 電磁波照射時の出力光のスペクトル

4. まとめと展望

著者らは、EO ポリマーの転写プロセス技術を開発し、転写プロセス技術を用いることで量産化可能なデバイス構造の100 GHz 帯、150 GHz 帯および375 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器を作製した。作製したデバイスを用いることで375 GHz までの高周波電磁波照射による直接光変調を実証した。さらに、150 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器をテラヘルツ波受信器として用いた A-RoF による無線伝送についても実証した。今後の展望として、デバイス構造の最適化やポーリング方法の最適化による EO 係数の向上により光変調効率のさらなる向上を目指すとともに、無線伝送のデータレートの向上とさらなる高周波帯での無線伝送の実証を目指す。さらに、デバイスのパッケージング技術の開発やシステム適用を進めるなど、社会実装に向けた取り組みを進めていく。

謝 辞

本研究開発の一部は、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」によって実施した成果を含む。

参考文献

- [1] J. Capmany and D. Novak, “Microwave photonics combines two worlds,” *Nat. Photonics* **1**(6), 319–330 (2007).
- [2] Kanno, “Seamless convergence between terahertz radios and optical fiber communication toward 7G systems,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **29**(5), 8600509 (2023).
- [3] S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold, and I. Kallfass, “Wireless sub-THz communication system with high data rate,” *Nat. Photonics* **7**(12), 977–981 (2013).
- [4] T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. C. Renaud, “Advances in terahertz communications accelerated by photonics,” *Nat. Photonics* **10**(6), 371–379 (2016).
- [5] H. Murata, H. Yokohashi, S. Matsukawa, M. Sato, M. Onizawa, and S. Kurokawa, “Antenna-coupled electrode electro-optic modulator for 5G mobile applications,” *IEEE J. Microwaves*, **1**(4), 902–907 (2021).
- [6] P. T. Dat, Y. Yamaguchi, M. Motoya, S. Oikawa, J. Ichikawa, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “Transparent fiber-millimeter-wave-fiber system in 100-GHz band using optical modulator and photonic down-conversion,” *J. Lightw. Technol.*, **40**(5), 1483–1493 (2022).
- [7] Y. Salamin, B. Baeuerle, W. Heni, F. C. Abrecht, A. Josten, Y. Fedoryshyn, C. Haffner, R. Bonjour, T. Watanabe, M. Burla, D. L. Elder, L. R. Dalton, and J. Leuthold, “Microwave plasmonic mixer in a transparent fibre-wireless link,” *Nat. Photonics* **12**(12), 749–753 (2018).
- [8] Y. Horst, T. Blatter, L. Kulmer, B. I. Bitachon, B. Baeuerle, M. Destraz, W. Heni, S. Koepfli, P. Habegger, M. Eppenberger, E. D. Leo, C. Hoessbacher, D. L. Elder, S. R. Hammond, L. E.

- Johnson, L. R. Dalton, Y. Fedoryshyn, Y. Salamin, M. Burla and J. Leuthold, “Transparent optical-THz-optical link at 240/192 Gbit/s over 5/115 m enabled by plasmonics,” *J. Lightwave Technol.*, **40**(6), 1690–1697 (2022).
- [9] S. Ummethala, T. Harter, K. Koehnle, Z. Li, S. Muehlbrandt, Y. Kutuvantavida, J. Kemal, P. Marin-Palomo, J. Schaefer, A. Tessmann, S. K. Garlapati, A. Bacher, L. Hahn, M. Walther, T. Zwick, S. Randel, W. Freude, and C. Koos, “THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator,” *Nat. Photonics* **13**(8), 519–524 (2019).
- [10] M. Burla, C. Hoessbacher, W. Heni, C. Haffner, Y. Fedoryshyn, D. Werner, T. Watanabe, H. Massler, D. L. Elder, L. R. Dalton, and J. Leuthold, “500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics,” *APL Photonics* **4**, 056106 (2019).
- [11] 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* **26**(23), 30466–30475 (2018).
- [12] 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* **29**(19), 29604–29614 (2021).
- [13] Y. Matsumura, Y. Tokizane, E. Hase, N. Kuse, T. Minamikawa, J. Fujikata, H. Kishikawa, M. Haraguchi, Y. Okamura, T. Kaji, A. Otomo, I. Morohashi, A. Kanno, S. Hisatake, and T. Yasui, “Carrier conversion from terahertz wave to dual-wavelength near-infrared light for photonic terahertz detection in wireless communication,” *Opt. Express* **31**(20), 33103–33112 (2023).
- [14] 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* **31**(11), 17112–17121 (2023).
- [15] T. Kaji, T. Yamada, N. Wada, and A. Otomo, “Terahertz optical modulators using electro-optic polymer waveguides and non-coplanar patch antennas,” *2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, DOI: 10.1109/ICTON62926.2024.10648268
- [16] L. R. Dalton, P. A. Sullivan, and D. H. Bale, “Electric field poled organic electro-optic materials: state of the art and future prospects,” *Chem. Rev.* **110**(1), 25–55 (2010).
- [17] 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.* **139**(2-3), 699–705 (2013).
- [18] T. Yamada, T. Kaji, I. Aoki, C. Yamada, M. Mizuno, S. Saito, Y. Tominari, S. Tanaka, and A. Otomo, “Terahertz time domain and far-infrared spectroscopies of side-chain electro-optic polymers,” *J. Appl. Phys.* **55**(3S2), 03DC11 (2016).
- [19] Y. Enami, C. T. Derosé, 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,” *Nat. Photonics* **1**(3), 180–185 (2007).
- [20] T. Yamada and A. Otomo, “Transmission ellipsometric method without an aperture for simple and reliable evaluation of electro-optic properties,” *Opt. Express* **21**(24), 29240–29248 (2013).

- [21] 梶貴博、諸橋功、山田俊樹、大友明、「150 GHz 帯アンテナ結合型 EO ポリマー光変調器の無線通信実験への適用」、2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-14-04