

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04274

研究課題名（和文）広帯域・室温動作の連続発振テラヘルツ光源の開発

研究課題名（英文）Development of continuous-wave terahertz light source with broadband and room temperature operation

研究代表者

梶 貴博（Kaji, Takahiro）

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・主任研究員

研究者番号：40573134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：全テラヘルツ領域（0.1～10 THz以上）にて動作可能な室温動作の連続発振（CW）テラヘルツ波発生デバイスの実現を目指し、高効率かつ超広帯域（20 THz以上）のテラヘルツ波発生を可能とする電気光学（EO）ポリマーを用いたデバイス開発を実施した。予めポーリングを行ったEOポリマー膜を転写するプロセス技術を用いることで、スラブ導波路型およびエアーギャップ構造を有する導波路型テラヘルツ波発生デバイス、アレイアンテナとグラウンド電極を有する導波路型テラヘルツ波受信デバイスを試作し、評価を行った。小型で低出力なフェムト秒ファイバーレーザーを用いた導波路型デバイスによるテラヘルツ波発生を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、EOポリマーを用いた導波路型デバイスによるテラヘルツ波発生に成功した先駆的な成果であり、超大容量・超高速無線通信や非接触・非侵襲での物体センシングの実現のために必要となる全テラヘルツ領域（0.1～10 THz以上）にて動作可能な小型かつ室温動作のCWテラヘルツ光源の実現につながる成果である。

研究成果の概要（英文）：Aiming to realize continuous-wave (CW) terahertz wave generation devices that can operate at room temperature in the entire terahertz region (0.1 to 10 THz or higher), we developed devices using electro-optic (EO) polymers, which enable highly efficient and ultra-wideband (20 THz or higher) terahertz wave generation. We prototyped and evaluated slab waveguide-type terahertz wave generation devices, waveguide-type terahertz wave generation devices having air gap structures, and waveguide-type terahertz wave receiving devices having array antennas and ground electrodes by using a process technology of transferring a pre-poled EO polymer film. We demonstrated the generation of terahertz waves by the waveguide-type devices using a small and low-power femtosecond fiber laser.

研究分野：有機光デバイス

キーワード：電気光学ポリマー テラヘルツ波発生

1. 研究開始当初の背景

高度ビッグデータ活用・高度センシング社会の実現に向けて、小型デバイスによるテラビット級、ペタビット級の超大容量・超高速無線通信技術や非接触・非侵襲での物体センシング技術の開発が求められている。テラヘルツ波 (0.1~10 THz) は、マイクロ波やミリ波よりも周波数が高く、次世代の超大容量無線通信での利用や、サーバー間やボード間等の光配線 (「光インターコネクト」) を無線化した「ワイヤレスインターコネクト」での利用が期待されている。また、次世代の安心・安全な社会の実現に向けて、危険物質や異物などの物体に関するビッグデータ (物体ビッグデータ) を直接取得する技術が求められている。テラヘルツ波を用いたセンシングでは、非侵襲・非破壊で物体に関する情報を取得でき、例えば、未開封パッケージ内部の偽造医薬品の判別や非金属性の混入異物の検出などが可能になると期待されている。しかしながら、テラヘルツ高速無線通信などに用いられている単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) は、周波数帯が 2 THz 程度以下に限られ、かつ高周波側ほど出力が低下するという課題がある。また、共鳴トンネルダイオードや差周波型テラヘルツ量子カスケードレーザーの研究開発が行われているが、周波数帯がそれぞれ 2 THz 程度以下と 5 THz 程度以下に限られ、かつ高周波側で出力が低いという課題がある。

2. 研究の目的

本研究開発は、未開拓領域 (5~10 THz) を含む全テラヘルツ領域 (0.1~10 THz 以上) にて動作可能な室温動作の連続発振 (CW) テラヘルツ波発生デバイスの開発を目指すものである。2 次非線形光学材料である電気光学 (EO) ポリマーは、テラヘルツ波発生の性能指数 FOM ($n_{opt}^6 r^2 / 16 m_{THz}$ (ここで、 r : EO 定数、 n_{opt} , m_{THz} : 光領域とテラヘルツ領域での屈折率)) が、ニオブ酸リチウム (FOM: 1500) やテルル化亜鉛 (FOM: 160)、有機 DAST 結晶 (FOM: 5600) などの従来材料と比較して大きくなりうる (FOM: 8900 以上)。また、上記の無機結晶材料は格子振動の影響によりテラヘルツ波を吸収するため帯域が 2-4 THz 以下に制限されるが、EO ポリマーは 20 THz 以上の超広帯域でのテラヘルツ波発生が可能である。また、EO ポリマーはテラヘルツ帯と光領域の間の屈折率差が非常に小さく、大きなコヒーレンス長を有する。さらに、EO ポリマーは成膜性や微細加工性に優れ、デバイス化や量産化への展開が可能である。EO ポリマーを用いたテラヘルツ波発生に関しては、パルス光を用いた EO ポリマー膜からのテラヘルツ波発生がこれまで報告されているが、EO ポリマー光導波路を用いたテラヘルツ波発生については実現していなかった。本研究開発では、EO ポリマー光導波路を用いたテラヘルツ波発生や CW テラヘルツ波発生を目指す。

3. 研究の方法

従来の EO ポリマーを用いた導波路デバイスの作製プロセスでは、導波路コアにおける EO 色素の配向を揃える「ポーリング」を行うため、導電性を有するクラッドが必要であったが、導電性を有するクラッドが、発生したテラヘルツ波を吸収してしまうという大きな課題があった。この課題を解決するため、研究代表者が開発に成功している、予めポーリングを行った EO ポリマー膜をテラヘルツ波低吸収損失材料 (シクロオレフィンポリマー (COP)) 等からなるクラッド上もしくは基板上へ転写するというプロセス技術を用いることで、下記の (1) ~ (3) のデバイスを試作するとともに、デバイスの評価を行った。まず、パルス光を用いたテラヘルツ波発生を実証するため、(1) EO ポリマースラブ導波路型テラヘルツ波発生デバイスの試作と評価を行った。次に、横方向の光の閉じ込めを可能にするため、(2) エアギャップ構造を有する EO ポリマー導波路型テラヘルツ波発生デバイスの試作と評価を行った。さらに、垂直方向のテラヘルツ波の閉じ込めを可能にする構造の実現に向けて、(3) アレイアンテナとグラウンド電極を有する EO ポリマー導波路型テラヘルツ波受信デバイスの試作と評価を行った。

4. 研究成果

(1) EO ポリマースラブ導波路型テラヘルツ波発生デバイスの試作と評価

導波路型の EO ポリマーテラヘルツ波発生デバイスの試作を行うにあたり、EO ポリマーの光領域での屈折率 (1.63) に近い屈折率をテラヘルツ領域にて有する材料をクラッド材料として用いることで、光とテラヘルツ波の位相整合が可能になると考えられる。また、発生したテラヘルツ波の吸収損失を抑制するため、クラッド材料にはテラヘルツ波低吸収損失材料の使用が必要である。そこで、COP をクラッド材料 (基板材料) として用いたスラブ導波路型のテラヘルツ

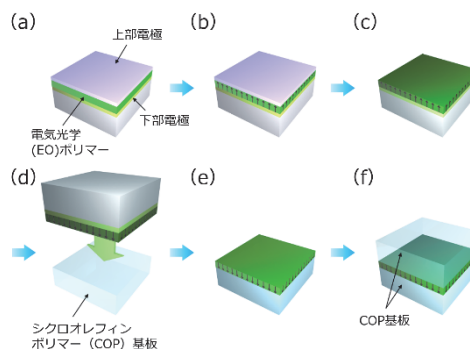


図1 デバイス作製プロセス

波発生デバイスの試作を行った。図 1 にデバイス作製プロセスを示している。下部電極を有する基板上に EO ポリマー膜をスピコートにより形成し、その上に上部電極を形成した。電極間に電圧を印加することでポーリングを行った。その後、上部電極を除去し、COP 基板上へポーリングを行った EO ポリマー膜を転写した。さらに、別の COP 基板を接合し、ダイシングすることでデバイスを試作した。図 2 (a-c) に試作したデバイスの模式図と外観、断面走査電子顕微鏡画像をそれぞれ示している。EO ポリマー導波路コアの厚さ $4.5\ \mu\text{m}$ であり、デバイス長は $0.5\ \text{mm}$ であった。また、透過型エリプソメトリー法により、EO ポリマーの波長 $1.55\ \mu\text{m}$ での EO 係数は $46\ \text{pm/V}$ であると見積もられた。テラヘルツ波発生のためのポンプ光として、波長 $1.56\ \mu\text{m}$ 帯の小型で低出力なフェムト秒ファイバーレーザー ($100\ \text{fs}$, $50\ \text{MHz}$) を使い、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) により測定を行った。図 2 (d, e) に試作したデバイスから発生したテラヘルツ波の時間波形とスペクトルを示している。EO ポリマー導波路と波長 $1.56\ \mu\text{m}$ 帯の小型で低出力なフェムト秒ファイバーレーザーを用いたテラヘルツ波発生に成功した。得られたテラヘルツ波のスペクトルには、有機非線形光学結晶である DAST を用いて発生した時のテラヘルツスペクトルに見られる、結晶格子振動に由来するディップ ($1.1\ \text{THz}$ 付近) が見られず、スペクトルギャップフリーのテラヘルツ波発生が可能であることが示された ($1.7\ \text{THz}$ 付近のディップは大気中の水による吸収が原因と考えられる)。また、テラヘルツスペクトルにおける $3\ \text{THz}$ 以上の領域での強度の低下は、検出に用いたテルル化亜鉛 (ZnTe) による吸収の影響と考えられ、実際は、これよりも広帯域でテラヘルツ波が発生しているものと考えられる。

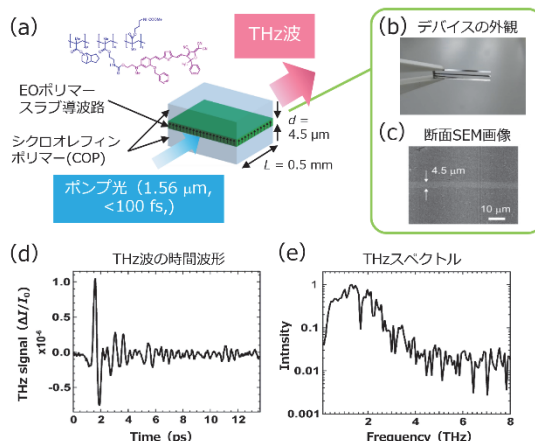


図 2 試作したスラブ導波路型デバイスとテラヘルツ波の発生

(2) エアーギャップ構造を有する EO ポリマー導波路型テラヘルツ波発生デバイスの試作と評価

上記のスラブ導波路型テラヘルツ波発生デバイスでは、水平方向の光閉じ込めができないことから、テラヘルツ波の発生効率を高くすることができないと考えられる。そこで、水平方向の光閉じ込めを可能にする構造として、エアギャップ構造を有する EO ポリマー導波路型テラヘルツ波発生デバイスの試作を行った。デバイスの試作には、図 1 に示したデバイス作製プロセスに EO ポリマーの導波路加工を含めた新たなプロセスを用いた。図 3 (a, b) に試作したデバイスの模式図と顕微鏡画像をそれぞれ示している。EO ポリマー導波路コアの高さは $4.2\ \mu\text{m}$ であり、デバイス長は $0.5\ \text{mm}$ であった。図 3 (c) に試作したデバイスからの出射光のビームパターンを示している。エアギャップ構造を有する EO ポリマー導波路とすることで横方向のビーム広がりが抑制されることが確認された。(1) での実験と同様の実験系を用い、試作デバイスからのテラヘルツ波発生の評価を行った。デバイス長 $0.5\ \text{mm}$ のエアギャップ構造を有する導波路型デバイスとデバイス長 $0.5\ \text{mm}$ のスラブ導波路型デバイスで比較を行ったところ、テラヘルツ波信号強度に大きな差は見られなかった。 $0.5\ \text{mm}$ のデバイス長では、スラブ導波路型デバイスにおけるビーム広がりによる効率低下の影響は大きくないことが示唆された。

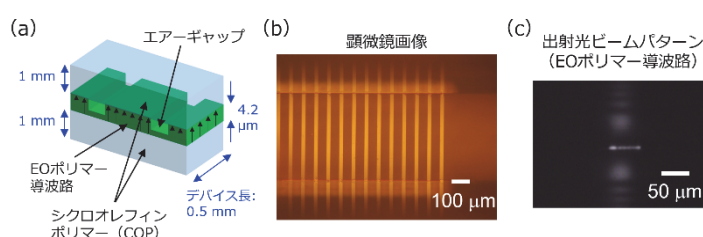


図 3 エアギャップ構造を有する導波路型デバイスと出射光ビームパターン

(3) アレイアンテナとグラウンド電極を有する EO ポリマー導波路型テラヘルツ波受信デバイスの試作と評価

従来プロセスでは、EO ポリマー導波路の下部に COP クラッド層と金属層を形成することが困難であり、高効率なテラヘルツ発生に必要な垂直方向のテラヘルツ波の閉じ込めを可能とする構造の作製が困難であった。そこで、垂直方向のテラヘルツ波の閉じ込めを可能にする構造の実現に向けて、EO ポリマー導波路とアレイアンテナ、下部 COP クラッド、下部グラウンド電極を有する新規なテラヘルツ波受信デバイスの試作を行った。図 4 (a-c) に試作した W バンド帯 ($75\text{-}110\ \text{GHz}$) デバイスの模式図とデバイスの外観、顕微鏡画像をそれぞれ示している。

デバイスは、グラウンド電極と下部 COP クラッド層、EO ポリマー導波路、ギャップを有する金パッチアンテナアレイを含む構造となっており、パッチアンテナのギャップのエッジの直下に EO ポリマー導波路が配置されている。デバイスの上部から W バンド帯電磁波が照射されると、ギャップ付近で電場が増強され、増強電場の垂直方向の電場成分による EO 効果によって導波路を伝搬する光の位相が変調される。さらに、導波路に対して位置をシフトしたパッチアンテナを交互に配置することで、照射電磁波の「山」と「谷」の両方を利用できるようになり、光変調効率が向上する。図 1 に示したデバイス作製プロセスを改良した新たなプロセスを開発し、デバイスの試作を行った。具体的には、Si 基板上にグラウンド電極を形成し、その上に、COP からなる下部クラッド層を形成した。さらに、ポーリングを行った EO ポリマー膜を転写し、導波路加工と上部クラッドの形成後、パッチアンテナの形成を行った。透過型エリプソメトリー法

により、EO ポリマーの波長 $1.55 \mu\text{m}$ での EO 係数は 36 pm/V であると見積もられた。また、今回試作した長さ 1 cm のデバイスを用いた場合の結合損失と伝搬損失の合計は 15 dB 程度であったが、デバイス加工条件の最適化により、結合損失は 4 dB 程度まで、伝搬損失は 3 dB/cm 程度まで改善可能である。実験では、波長 $1.535 \mu\text{m}$ の CW レーザー光をデバイスに導入し、デバイス上部から W バンド帯電磁波を照射し、出力光を光スペクトラムアナライザーにより測定した。図 4 (d, e) に測定結果を示している。光スペクトラムにおいて照射電磁波の周波数に対応する位置に光変調サイドバンドが観測された。得られたキャリアサイドバンド比は 56 dB (照射パワー密度: 12.8 W/m^2) であり、 3 mrad の光位相シフトに対応するものであった。試作デバイスを用いることで W バンド帯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。この結果は、グラウンド電極を有しないデバイス構造を用いた場合よりも高効率なものであり、グラウンド電極によるテラヘルツ波の垂直方向の閉じ込め効果が確認された。本研究で開発したプロセス技術を発展させることで、(1)、(2) で開発したテラヘルツ波発生デバイスよりもさらに高効率なテラヘルツ波発生デバイスや CW テラヘルツ波発生デバイスの実現が期待できる。

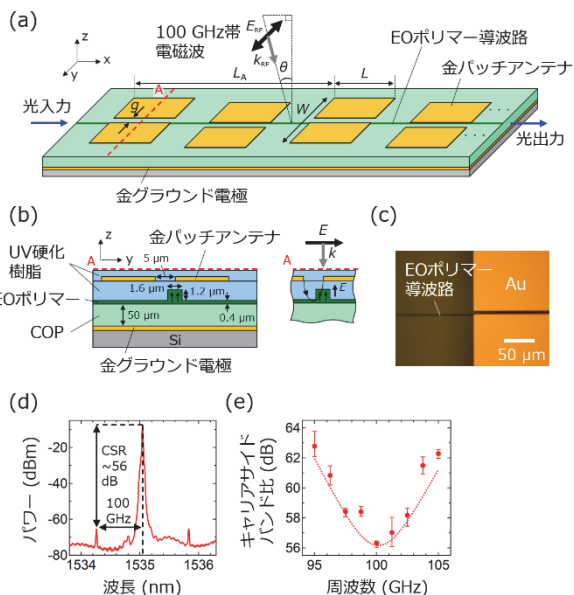


図 4 アレイアンテナとグラウンド電極を有する導波路型テラヘルツ波受信デバイスと測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kaji Takahiro, Tominari Yukihiro, Yamada Toshiki, Saito Shingo, Morohashi Isao, Otomo Akira	4. 巻 26
2. 論文標題 Terahertz-wave generation devices using electro-optic polymer slab waveguides and cyclo-olefin polymer clads	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 30466 ~ 30475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.030466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kaji Takahiro, Morohashi Isao, Tominari Yukihiro, Sekine Norihiko, Yamada Toshiki, Otomo Akira	4. 巻 29
2. 論文標題 W-band optical modulators using electro-optic polymer waveguides and patch antenna arrays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29604 ~ 29604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.434028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 梶 貴博、富成 征弘、齋藤 伸吾、諸橋 功、山田 俊樹、大友 明
2. 発表標題 有機EOポリマーを用いた導波路型テラヘルツ波発生デバイスの作製と評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaji Takahiro, Morohashi Isao, Tominari Yukihiro, Yoh Ogawa, Norihiko Sekine, Yamada Toshiki, Otomo Akira
2. 発表標題 Fabrication of electro-optic polymer waveguide devices for continuous-wave terahertz detection
3. 学会等名 44rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaji Takahiro, Morohashi Isao, Tominari Yukihiro, Yoh Ogawa, Norihiko Sekine, Yamada Toshiki, Otomo Akira
2. 発表標題 Electro-optic polymer waveguide devices for continuous-wave terahertz detection
3. 学会等名 Photonics-Applied Electromagnetic Measurement (PEM) International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaji Takahiro, Tominari Yukihiro, Yamada Toshiki, Saito Shingo, Morohashi Isao, Otomo Akira
2. 発表標題 Terahertz-wave generation devices using electro-optic polymer slab waveguides and terahertz-wave low-loss polymer clads
3. 学会等名 SPIE photonics west 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaji Takahiro, Tominari Yukihiro, Yamada Toshiki, Saito Shingo, Morohashi Isao, Otomo Akira
2. 発表標題 Terahertz-wave generation devices using electro-optic polymer waveguides and terahertz-wave low-loss cladding materials
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梶 貴博、諸橋 功、富成 征弘、小川 洋、山田 俊樹、大友 明
2. 発表標題 有機電気光学ポリマー光導波路を用いたテラヘルツ波検出デバイスの試作
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www2.nict.go.jp/frontier/nano/results/publications-new.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------