

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06411

研究課題名(和文) テラヘルツ波高時間分解能オシロスコープの実現に向けた波長変換技術の開発

研究課題名(英文) Study for conversion technique for high-resolution oscilloscope for terahertz wave

研究代表者

齋藤 伸吾 (SAITO, Shingo)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員

研究者番号：80272532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波は、広帯域を確保できることから無線通信のキャリアに利用することが期待されている。

スタートとして非線形結晶としてMgO:LiNbO3を利用してTHz量子カスケードレーザー(THz-QCLs)の出力光とMOPAシステムからの近赤外光との上方置換信号を検出することに成功した。これは、THz-QCLsへの注入電流とMOPAシステムからの光パルスのタイミングが一致した際に観測されることから上方置換信号であることを確認した。上方置換信号発生技術はTHz-QCLの発振ダイナミクスに研究に有効であることを示した。また、上方置換信号発生に向けた導波路構造を持つE0ポリマーデバイスを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ量子カスケードレーザーで発生させたテラヘルツ波と1μm帯の強力なパルス光の上方置換信号が発生できることを実験的に確認した。シクロオレフィンポリマーをクラッド材とした導波路構造について、これらのポリマーを高精度かつ密着性良く接合する技術開発を行い、800nm付近に高い性能を持つ導波路構造を持つポリマーを開発した。このことによってテラヘルツ波の発生および検出に新技術を提供し、大容量無線通信に向けた要素技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Terahertz wave is expected to be used in such wireless communication systems due to its potentially broad bandwidth. In this presentation, we report on the detection of terahertz radiations from terahertz quantum cascade lasers (THz-QCLs) by up-conversion using the intense near-infrared with MgO:LiNbO3 crystal as a non-linear crystal. The near-infrared is generated from the microchip Nd:YAG laser based MOPA system. The up-converted signal was observed when the injection of the pulse current and the optical pulse pumping occurred at the same time. From this result, it is shown that the frequency up-conversion technique is useful to investigate the lasing dynamics of THz-QCLs. And we investigate the E0 polymer device which has a waveguide structure for up-conversion method.

研究分野：工学

キーワード：マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波 光学非線形性 情報通信

## 1. 研究開始当初の背景

携帯電話、スマホ、タブレット PC を始めとする情報携帯端末の進化に伴い、我々が取り扱う情報量は年々増加している。これらのデータのやり取りは 4G や Wi-Fi 等の無線を用いて行なわれており、2020 年のサービス提供開始を目指して次世代移動通信システムである 5G の研究開発が進められている。5G の向こうには、さらなる大容量通信を目指し、テラヘルツ帯通信の研究開発が精力的に進められている。現在、テラヘルツ波によるセンシング技術の研究開発が注目されているが、通信への利用に向けて、変調、発生、検出などの要素技術開発が進められている。

例えば、単一走行キャリアフォトダイオードや共鳴トンネリングダイオードを用いて 300GHz 帯、600GHz 帯無線通信の研究開発が進められている。また、量子カスケードレーザー (QCL) では、レーザー発振に必要な反転分布を光学フォノンによって達成するため、一般的な半導体レーザーではしばしば問題となる緩和発振がほぼ起こらないと予想されており、高い変調周波数でのテラヘルツ波発生源として期待されている。しかし、未だこれら信号源デバイスの強度変調特性は評価されていない。これは十分な応答速度及び検出感度を持つテラヘルツ帯の高速検出器が無いためである。

近年、室温でテラヘルツ帯信号を検出し、周波数情報を得ることを目的として、国内では理化学研究所のグループが、また、国外では自由電子レーザーを利用するグループが、テラヘルツ帯信号と近赤外光との和周波信号を発生 (上方置換) させ、この信号を検出したことを報告しているが、高速信号の検出には至っていない。

## 2. 研究の目的

大容量通信のためのキャリアとして期待されるテラヘルツ帯信号源 (テラヘルツ帯量子カスケードレーザー、単一走行キャリアフォトダイオード、共鳴トンネリングダイオード等) の高速応答性に対する評価は行われていない。それは高速応答できる検出器が無いためである。本提案ではパルスレーザー技術及び高い非線形性を持つ有機電気光学 (EO) ポリマーを利用した高時間分解能テラヘルツ帯信号検出システムを構築し、テラヘルツ帯高時間分解能オシロスコープの原理動作を実証し、大容量通信に向けた計測評価技術開発を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

テラヘルツ帯信号とゲート光である近赤外レーザー光との上方置換信号検出技術を確立し、さらに、これを時間分解測定するための光学系を構築する。そのために、近赤外ピコ秒パルスレーザーのスペクトル整形、上方置換信号発生に最適化した導波路型 EO ポリマーデバイスの作製、上方置換信号と迷光を分離・検出するための光学系の構築、時間分解測定のための時間遅延システムの構築を行なう。

技術開発の内容は、「微弱な上方置換光の検出の邪魔となる迷光を低減するための近赤外ピコ秒パルスレーザーのスペクトル整形」、「テラヘルツ信号検出に最適化した導波路型 EO ポリマーデバイスの作製」、「テラヘルツ帯信号の上方置換光学系の構築」、「微弱な上方置換光を検出するための分光系の構築」、「時間分解測定のために用いる THz-QCL の発振を制御する光パルス時間遅延システムの構築」を行う。

ゲート光には超短パルスレーザーを使用する。このレーザーの発振に用いられるゲイン媒質はレーザー発振時にも広い波長領域の発光成分を持ち、微弱な上方置換信号を覆い隠すほどの強さを持つ。そのため、不要成分を除去し、テラヘルツ帯信号の測定に適切なゲート光を得るため、回折格子やフィルター幅の最適化を行なう。

また、上方置換信号の発生効率は  $10^{-8}$  程度と見積もっている。そのためテラヘルツ帯信号を上方置換するために使ったゲート光は、フィルターを使って十分に分離・除去しないと微弱な上方置換光を検出できない。これに対して、偏光フィルター、光学的ノッチフィルター及び分光器を利用することで上方置換信号を取り出し、さらに分光器に接続した CCD またはフォトンカウンティングシステムを利用することで検出する。

#### 4. 研究成果

最初に、パラメトリック波長変換によるテラヘルツ波検出実験を行った。3.7THz で発振するテラヘルツ量子カスケードレーザーの出力信号を Nd:YAG MOPA レーザー（400psec パルス幅、1kHz 繰り返し）との出力で上方置換し、その信号の検出を試みた。本実験は理化学研究所南出グループの協力のもと実施した。実験配置を図 1 に、InGaAs 検出器を用いた上方置換信号結果を図 2 に示す。

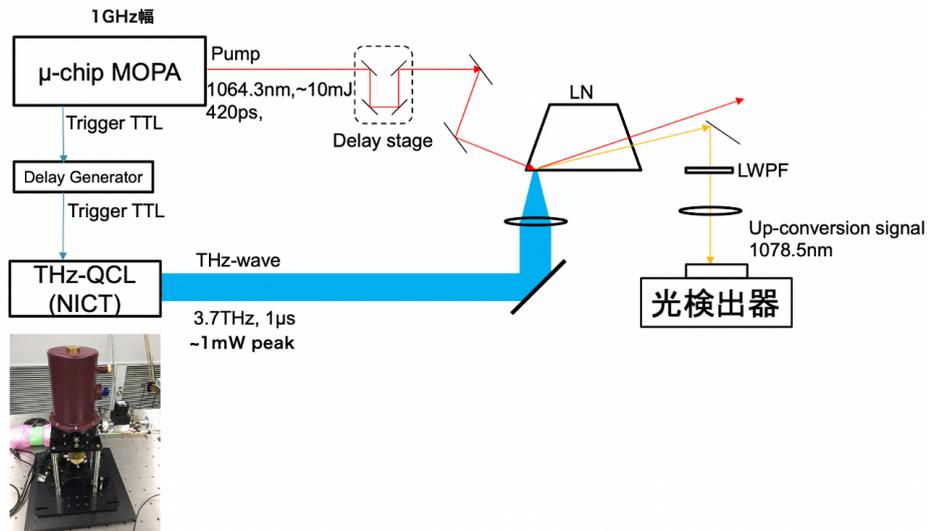


図 1: 実験配置図。光検出器には InGaAs イメージャと InGaAs PIN-PD 検出器を用いた。

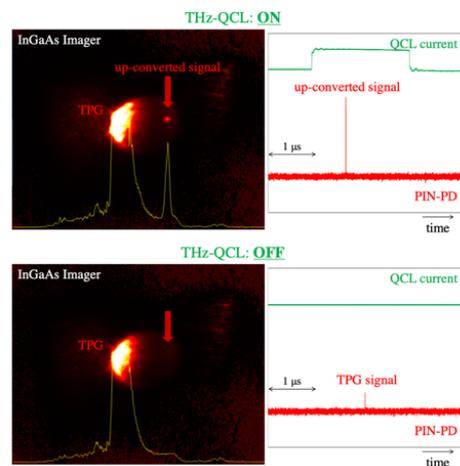


図 2: 上方置換信号。左図は InGaAs イメージャによる検出信号。右図は InGaAs PIN-PD 検出器による信号強度と THz-QCL への印加電圧を時間でプロットしたもの。それぞれ上図は THz-QCL への印加電圧 on 時、下図は off 時である。

図 2 では THz-QCLs への注入電流と MOPA システムからの光パルスのタイミングが一致した際に観測されることから上方置換信号であることから、400psec 時間分解能で Nd:YAG MOPA レーザーによる THz-QCL 出力光の上方置換に成功したことを示している。

次に、ゲート光に含まれる広い波長領域の発光成分によって、微弱な上方置換信号を覆い隠すことを防ぐために、回折格子を用いた分光器をもとにしたフィルター光学系を構築し、ゲート光を整形した。また、上方置換信号の発生効率は  $10^{-8}$  程度と見積もっている。そのため、上方置換するために使ったゲート光は、フィルターを使って十分に分離・除去しないと微弱な上方置換光を検出できない。これに対して、偏光フィルター、光学的ノッチフィルター及び分光器を利用することで上方置換信号を取り出すよう検出側にもフィルター光学系を構築し、分光器に接続した CCD またはフォトンカウンティングシステムで検出することとした。また、時間分解測定を行

うために、遅延光学系を導入、整備した。

これらの光学系の概念図を図3に示す。また、フィルター光学系による不要光の除去の効果を図4に示す。不要光が除去できていることがわかる。

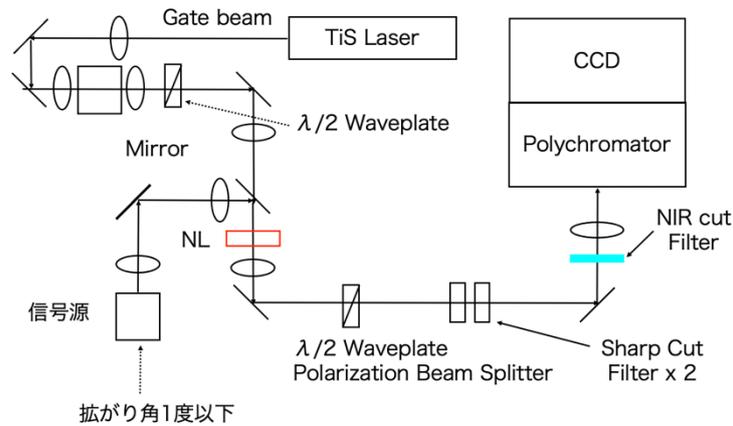


図3: 上方置換信号発生検出系の概念図。ゲート光のスペクトルをフィルター分光器で整形し、上方置換信号発生後の信号に含まれる不要光を複数のフィルターを組み合わせることで除去。

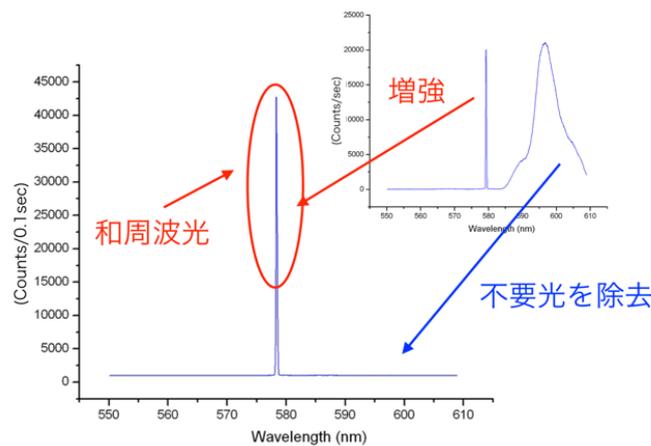


図4: フィルター光学系による不要光の除去効果。迷光として分光器に張り込んでいた不要光が除去されている。

また、和周波信号を高効率で発生するために重要なEOポリマーを導波路構造とする研究を行い、シクロオレフィンポリマーをクラッド材とした導波路構造について、これらのポリマーを高精度かつ密着性良く接合する技術開発を行い、導波路デバイスの作成に成功した。図5に導波路構造の断面の概念図を示す。

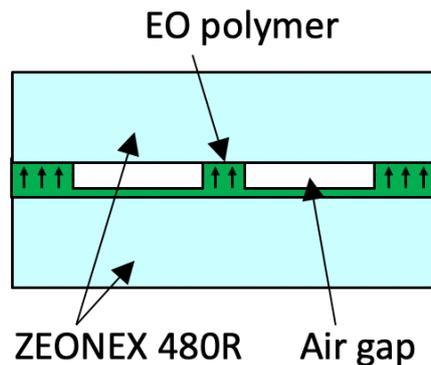


図5: 導波路型に整形したEOポリマーの概念図。

上記のようにテラヘルツ量子カスケードレーザーで発生させたテラヘルツ波と  $1\mu\text{m}$  帯の強力なパルス光の上方置換信号が発生できることを実験的に示した。シクロオレフィンポリマーをクラッド材とした導波路構造について、これらのポリマーを高精度かつ密着性良く接合する技術開発を行い、 $800\text{nm}$  付近に高い性能を持つ導波路構造を持つポリマーを開発した。このことによってテラヘルツ波の発生および検出に新技術を提供し、大容量無線通信に向けた要素技術を開発した。

また、これらの研究成果は、論文、学会等で発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TAKAHIRO KAJI, YUKIHIRO TOMINARI, TOSHIKI YAMADA, SHINGO SAITO, ISAO MOROHASHI, AND AKIRA OTOMO	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Shingo Saito, Kouji Nawata, Shin' ichiro Hayashi, Yoshinori Uzawa, Hiroaki Minamide, and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Real-time Detection of Terahertz Emission from Quantum Cascade Lasers by Frequency Up-conversion in ad nonlinear crystal
3. 学会等名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Shingo Saito and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Spectroscopic measurement in the terahertz region by optical heterodyne detection
3. 学会等名 The 19th EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop will be jointly held with the 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Shingo Saito and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Optical heterodyne detection by parametric up-conversion at room temperature
3. 学会等名 The 19th EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop will be jointly held with the 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Kaji, Yukihiro Tominari, Toshiki Yamada, Shingo Saito, Isao Morohashi, Akira Otomo
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 Photonics West 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 伸吾, 縄田 耕二, 林 伸一郎, 関根 徳彦, 笠松 章史, 鶴澤 佳徳, 南出泰亜
2. 発表標題 Real-time Detection of Terahertz Emission from Quantum Cascade Lasers by Frequency Up-conversion Technique
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 梶 貴博, 富成 征弘, 山田 俊樹, 齋藤 伸吾, 諸橋 功, 青木 勲, 大友 明
2. 発表標題 有機E0 ポリマーを用いた導波路型テラヘルツ波発生素子の作製と評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分 担 者	梶 貴博  (Kaji Takahiro)  (40573134)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員   (82636)	

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
---------	---------