

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18730

研究課題名（和文）テラヘルツ級任意電磁波形生成の探索的研究

研究課題名（英文）Feasibility study of terahertz-frequency arbitrary electromagnetic waveform generation

研究代表者

加藤 和利（Kato, Kazutoshi）

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：10563827

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：THz級の周波数成分を持つ任意電磁波形を生成する技術を創成した。具体的には、異なる中心利得周波数に設計したアンテナを接続した光電変換デバイスをアレー状に集積したチップを開発した。設計では各アンテナ形状を最適化した。試作ではアンテナへの接続に必須のマイクロストリップ線路とコプレーナ線路との接続において、2D-3D変換構造を考案、作製した。THz級電磁波の波形評価技術として、被測定THz波を分岐し、一方に遅延を加えて合波する方式のTHz波自己遅延干渉計を考案、構築した。開発したデバイスを用いてTHz級繰り返し電磁パルス波を生成し、波形評価を基に1THz級無線通信への適用可能性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の要素技術一つである光波形生成では、繰り返し300GHzの光パルス波生成および自己相関計による波形観測に成功している。もう一方の要素技術である光電変換では、アレー化した同じ特性を持つ複数のフォトダイオードにより100GHz～700GHzの電磁波生成と空間合波による強度増大を実現している。本研究は、光波形生成と、アレー状フォトダイオードでの光電変換という、それぞれ独創的研究を、帯域補完型アレーという新奇コンセプトのもとで融合し任意電磁波形生成に挑戦するものである。またこの成果を用いて、未知領域であるサブピコ秒領域での物質やデバイスの電磁波応答という新分野開拓の可能性を秘めた探索研究である。

研究成果の概要（英文）：A technology for generating arbitrary electromagnetic waveforms with THz-frequency components has been developed. Specifically, a chip that integrates an array of photoelectric conversion devices connected to antennas designed for different center-gain frequencies was devised. In the design, the shape of each antenna was optimized. For the prototype fabrication, a 2D-3D conversion structure was devised and realized for the connection between the microstrip line and coplanar line, which is essential for the connection to the antenna. A THz self-delay interferometer was designed and constructed to evaluate THz electromagnetic waveforms by splitting the THz wave to be measured, adding a delay to one of the THz waves, and then combining the two waves.

The developed device was used to generate THz-frequency repetitive electromagnetic pulse waves, and its applicability to 1 THz-class wireless communications was examined based on waveform evaluation.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光電変換デバイス テラヘルツ波 フォトミキシング アレー集積

1. 研究開始当初の背景

本研究の要素技術である光波形生成と光電変換について、それぞれ別々のテーマとして研究を行ってきた。光波形生成に関しては、300GHz 級パルス波無線の搬送波を光電変換して生成することを目指し、5つの光波を重ね合わせて、繰り返し 300GHz の光パルス波生成および自己相関計による波形観測に成功し同分野で高い評価を受けている（論文賞3件受賞）。

一方、光電変換に関してはアレー化した同じ特性を持つ複数のフォトダイオードにより、二つの光波の差周波（ビート信号）から 100GHz~700GHz の電磁波の生成と空間合波による強度増大を実現している。この技術により 100~700GHz の高周波領域では初めてビーム状 THz 波を実現した（論文は光通信研究分野で最高権威の国際会議 OFC2018 において Top scored で採択）。

次にこれら二つの技術を融合し 1THz 級の電磁パルス波の生成に挑戦してきた。しかしパルスのような、正弦波とは異なる波形は広い帯域での光電変換が必要であり、フォトダイオードの容量が起因する帯域制限のため、原理的に電磁パルス波の生成は不可能であることが判明した。一方、本研究者らは強度増大のためにアレー状フォトダイオードによる THz 波の空間合波を研究していた。これは同じ特性を持つ複数のフォトダイオードそれぞれにおいて、強度と位相が揃った正弦波の光波形を重ねて光電変換する手法である。この実験を進める中で、特性の異なるフォトダイオードからの電磁波を重ね合わせるとパルス形状が変化することに着目し、これを積極的に利用して所望のパルス波形が得られること、さらに任意の波形を生成できるのではないかという着想を得た。また、実験系を構成している各種デバイスの過渡応答特性について、製造メーカーでも測定手段がないため、実験系を高精度に校正できないという問題についても、任意電磁波形を用いれば過渡応答特性が得られるという利点に気が付いた。

本研究は、光波形生成と、アレー状フォトダイオードでの光電変換という、それぞれ独創的研究として先導してきた技術を、帯域補完型アレーという新奇コンセプトのもとで融合し、さらに独創性の高い任意電磁波形生成に挑戦するものである。またこの成果を用いて、未知領域であるサブピコ秒領域での物質やデバイスの電磁波応答という新分野開拓に発展する可能性を秘めた探索研究である。

2. 研究の目的

超高周波電磁波の分野において、通信応用では Beyond 5G やさらにその先の技術として期待されるテラヘルツ (THz) 級超高速無線通信の研究が加速されつつある。またセンシング、イメージング応用では、高分解能レーダー、高精細セキュリティ用ボディスキャナ、非破壊成分検査において THz 級電磁波の利用に注目が集まっている。これらは従来の正弦波状の電磁波利用の延長線上の技術であるが、もし任意波形の超高周波電磁波が実現できたとしたら新たな応用分野が開拓できる。例えば、波形と位相が揃った THz 級電磁パルス波ができれば、パルス一つ一つに情報を載せた新概念の THz 級無線通信が可能となる。また、THz 級電磁矩形波や電磁三角波が生成できれば物質や超高速デバイスの電磁波に対するサブピコ秒領域の過渡応答を明らかにすることができる。本研究は、THz 級電磁波の新たな応用分野開拓の必須技術として、THz 級の周波数成分を持つ任意電磁波形を生成する技術の創成を目的とする。具体的には、提案する任意電磁波形生成法の要素技術である(1) THz 級任意光波形生成と、(2)帯域補完型アレー光電変換の技術を確立する。そして (3)両技術を用いて 1THz 繰り返し電磁パルス波、サブ THz 繰り返し

矩形波、三角波を生成し、特にパルス波に関しては波形評価をもとに 1THz 級無線通信への適用可能性を検討する。

3. 研究の方法

本研究で実現する超高周波電磁波形生成システムは、本研究代表者が開発した高繰り返し電磁パルス発生システム上に構築する。このシステムは光波形生成部と光電変換部からなる。前者は光コムから波長選択フィルタを用いて複数の光波長を選択して重ね合わせ、任意光波形を生成している。後者は、超広帯域フォトダイオード (3dB 帯域 600GHz) を用いて光波形を電流波形に光電変換し、フォトダイオードに集積された微小平面アンテナから空間へ電磁波を放射している。本システムで高繰り返し電磁パルス生成に成功しているが、光電変換では高周波になるほど応答特性が劣化するため、繰り返し周波数が 1THz 付近ではパルス幅が広がり正弦波状になるという、光電変換デバイスが本来持つ原理的限界 (動作帯域の限界) に達していた。そこで本研究では、空間における電磁波はインピーダンス整合の制限を受けず自由に合分波できるという性質に着目し、従来広帯域設計が必須と考えられていた光電変換デバイスについて、それぞれ異なる利得周波数に設計した複数のアンテナ集積フォトダイオードをアレー化することが最大の特徴である。これにより光波形に含まれる周波数成分が、それぞれの周波数帯域ごとに光電変換され、空間で元の波形を再現した電磁波が形成されるため、繰り返し 1THz 以上の電磁パルス波形のみならず、任意電磁波形の生成が可能となる。

(1) THz 級任意光波形生成

本研究のベースとなる高繰り返し光パルス発生システムは、挑戦的研究 (萌芽) (H29-30) の一部として開発したもので、25GHz 間隔で発生させた光コムから、波長選択フィルタを用いて複数の波長を取り出す手法である。本研究では、波長の選択に加えて、波長ごとの強度と光位相を調整し、さらに光合分波の容易性を利用した自己時間多重を併用することで、極めて自由度の高い波形設計ができることに着目している。これらの技術を用い、THz 級 (サブピコ秒分解能) の高繰り返し高精細任意光波形生成に挑戦する。具体的には、1THz 繰り返しパルス波、サブ THz 矩形波、サブ THz 三角波を生成し自己相関計で波形観測を行う。

(2) 帯域補完型光電変換アレー

本研究代表らが 300GHz 帯で実現している 8 アレー光電変換デバイスについて、ボウタイアンテナの 2 電極間の長さをパラメータにとり、これにフォトダイオードの容量を考慮した電磁界解析により、100-300GHz, 300-500GHz, 500-700GHz, 700-900GHz, 900GHz-1.1THz, 1.1-1.3THz, 1.3-1.5THz, 1.5-1.7THz の利得帯域を持つアンテナ集積フォトダイオードを設計する。そして異なる特性で互いに補完関係を持つ素子のアレー化という新たなコンセプトによる、8 アレー光電変換デバイスを試作する。

(3) 超高周波繰り返し電磁波形生成

上記要素技術を用いて任意電磁波形生成システムを構築する。典型的な評価用波形として、電磁パルス波、矩形波、三角波を生成し、本研究代表者が開発した THz 波自己相関計を用いて波形評価を行う。特にパルス波に関しては世界最高繰り返し 1THz に挑戦し、さらに各パルスに個別に変調をかけることで無線通信適用性の検討を行う。

4. 研究成果

THz 級電磁波の新たな応用分野開拓の必須技術として、THz 級の周波数成分を持つ任意電磁波波形を生成する技術を創成した。具体的には、従来広帯域設計が必須と考えられていた光電変換デバイスについて、それぞれ 100GHz、200GHz、300GHz、400GHz の異なる中心利得周波数に設計したパッチアンテナを接続した光電変換デバイスをアレー状に集積したチップの設計、試作を行った。

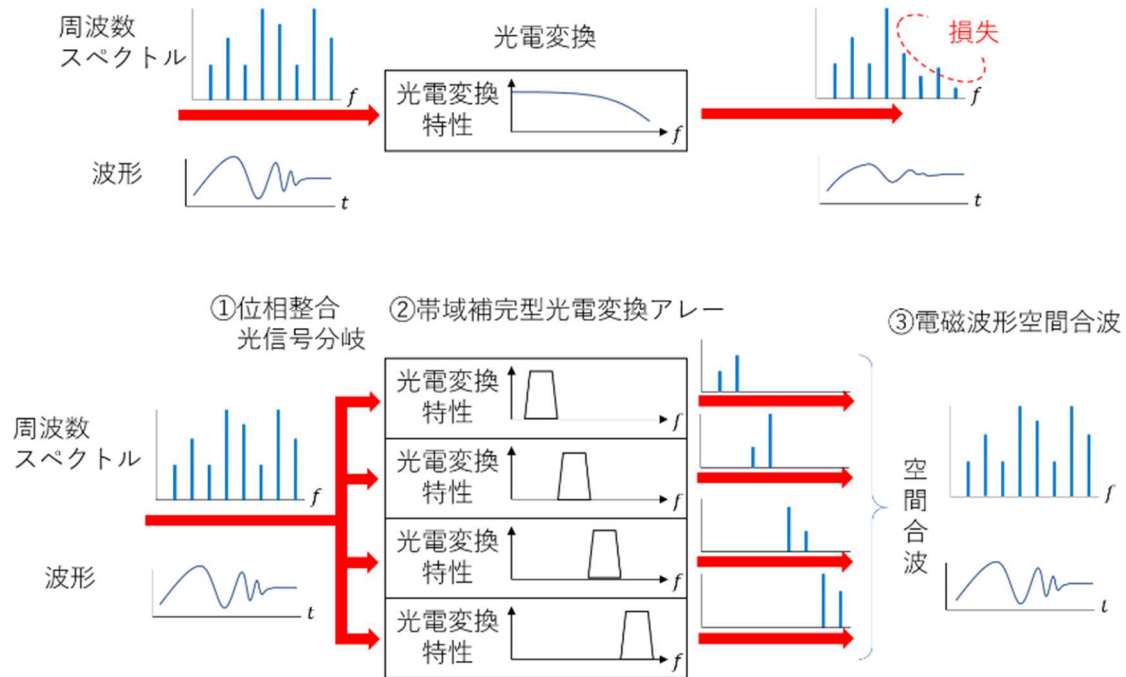


図1 光波形の光電変換 従来（上）と本研究の方法（下）

設計では各パッチアンテナの一辺の長さを動作周波数の半波長程度に設定しそこから電磁界シミュレーションによって電磁波出力が最大となり、かつ反射特性が許容値以下になることを指標にアンテナ形状を最適化した（図2）。試作ではパッチアンテナへの接続に必須のマイクロストリップ線路と、光電変換デバイスからのコプレーナ線路との接続において、2D-3D 変換構造を考案、作製し、光電変換デバイスで発生した THz 級信号を低損失でアンテナへ給電することを可能とした（図3：S2,1 が透過特性、S1,1 が反射特性）。この設計において両線路のグランドの接続点と信号線の距離と、電磁波の波長とに密接な関係があることを発見した。

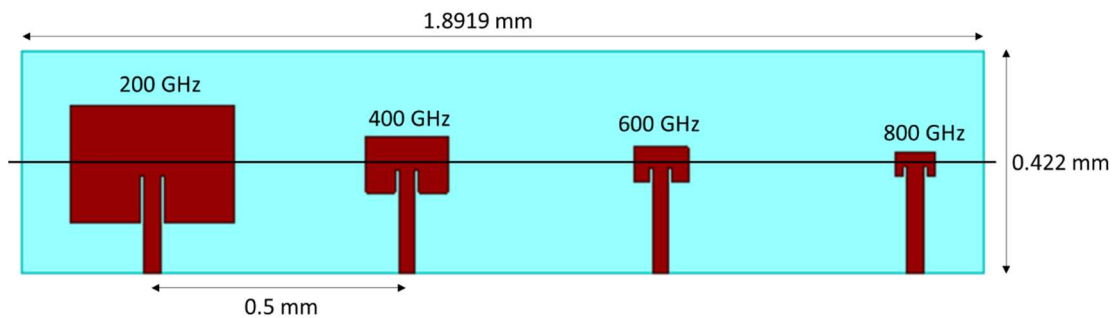


図2 4種類の異なる周波数応答特性を持つパッチアンテナアレー

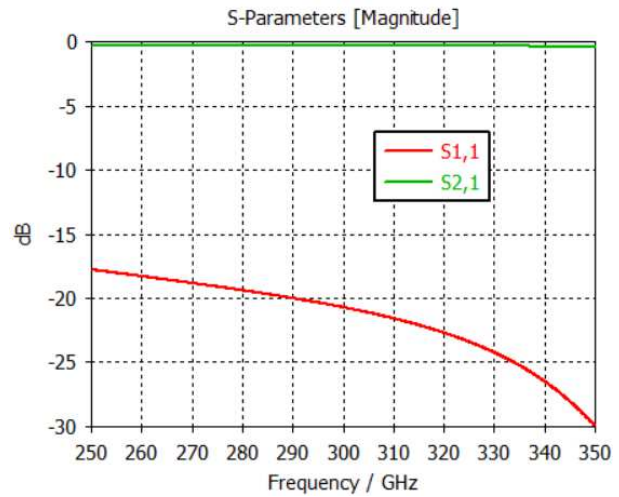
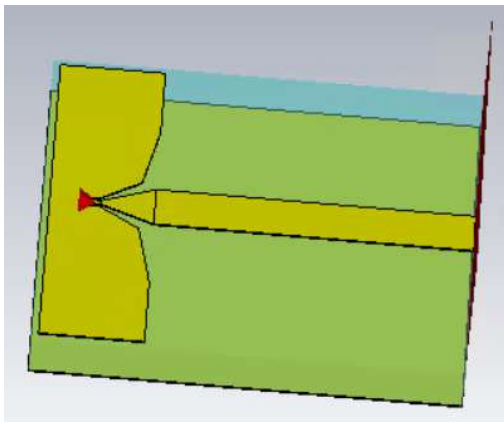


図3 ストリップ線路とコプレーナ線路との接続モデル（左）と高周波特性（右）

THz 級電磁波の波形評価技術として、被測定 THz 波を分岐し、一方に遅延を加えて合波する方式の THz 波自己遅延相関計を考案、構築した（図4）。この自己遅延干渉計の動作実証実験では、0.9THz までの正弦波形の観測に成功した

開発したデバイスを用いて THz 級繰り返し電磁パルス波を生成し（図5）、波形評価を基に 1THz 級無線通信への適用可能性を検討した。本研究成果により、光波形生成と、アレー状光電変換デバイスで、サブピコ秒領域での物質やデバイスの電磁波応答という新分野開拓に発展する可能性を確認した。

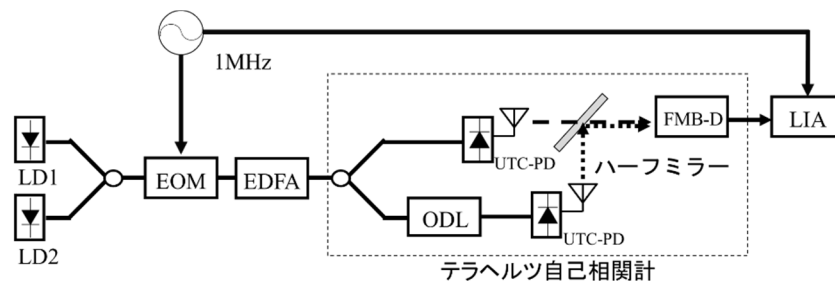


図4 THz 波自己遅延相関計

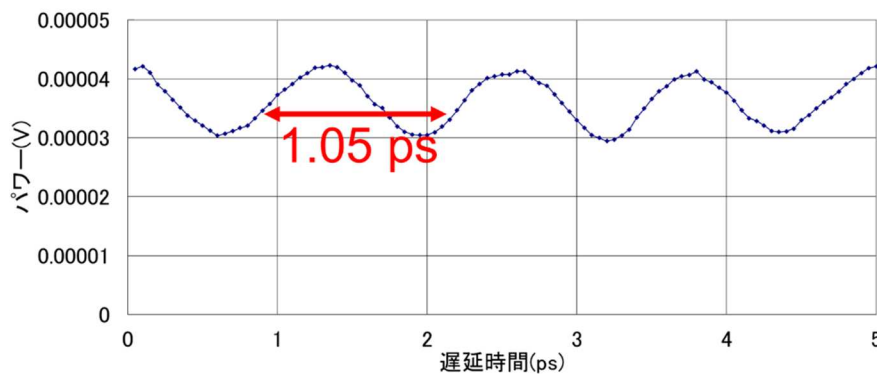


図5 950GHz 自己相関波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 近藤和哉, 土居諒, 車明, 三上裕也, 加藤和利	4. 巻 Vol. J106-C
2. 論文標題 光フェーズドアレーを用いたテラヘルツ波の電子制御ビームステアリング	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 86-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2022JCL0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 白水孝始, 清木直哉, 松本凌, 榎富直人, 三上裕也, 上田悠太, 加藤和利	4. 巻 51
2. 論文標題 波長可変レーザーを用いた変調テラヘルツパルス波の生成	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 242-243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ming Che, Kazuya Kondo, Kazutoshi Kato	4. 巻 13
2. 論文標題 Generating and Enhancing THz Pulses Via an Antenna-Coupled Uni-Traveling-Carrier Photodiode Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 280-285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TTHZ.2023.3251736	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ming Che, Kazuya Kondo, Haruichi Kanaya, Kazutoshi Kato	4. 巻 40
2. 論文標題 Arrayed Photomixers for THz Beam-Combining and Beam-Steering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 6657-6665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2022.3204113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ming Che, Ruo Yamamoto, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato	4. 巻 242
2. 論文標題 Optically controlled THz power tuning based on interference at transmission line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OPTIK	6. 最初と最後の頁 167203-167203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijleo.2021.167203	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 Ming Che, Haruichi Kanaya, Kazutoshi Kato	4. 巻 Vol. 29, No. 13
2. 論文標題 Optically controlled THz power tuning based on interference at transmission line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OPTICS EXPRESS	6. 最初と最後の頁 20043-20043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.423308	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 Kazutoshi Kato	4. 巻 2022, 9, 9
2. 論文標題 Photonics-Assisted Terahertz-Wave Beam Steering and Its Application in Secured Wireless Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics9010009	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Ming Che, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Passive WR3 combiner with a reflector-integrated horn for 50 dB gain
3. 学会等名 Photonics West2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hussein Ssali, Ming Che, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Performance Analysis of a Wilkinson Power Combiner-Fed Patch Antenna for 300-GHz Arrayed Photomixers
3. 学会等名 10th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations (JAC-ECC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amalina Athira Ibrahim, Takashi Shiramizu, Shenghong Ye, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Pilot-Lightwave-based Terahertz Wave Phase Stabilization
3. 学会等名 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Shiramizu, Naoya Seiki, Ryo Matsumoto, Naoto Masutomi, Yuya Mikami, Yuta Ueda, Wataru Kobayashi, and Fumito Nakajima, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Demonstration of Novel THz Wave Generation Based on a Fast Wavelength Switching Laser
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hanwei Chen, Yusuke Kawai, Takuya Yano, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Demonstration of Secure Wireless Transmission at 500 Mbit/s Based on 300-GHz Waves from Separated Transmitters
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qingjie Song, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 First Demonstration of 405-nm Two-Tone Lightwave from GaN Laser for High Power Terahertz Wave Generation
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Kondo, Ming Che, Ryo Doi, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 THz-Wave Beam Steering with 4-Channel Optical Phased Array
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amalina Athira Ibrahim, Takashi Shiramizu, Hanwei Chen, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Novel Phase Stabilization Technique at Photomixing-Based Terahertz Wave Phase Modulation System
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qingjie Song, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Demonstration of 405-nm Two-Tone Lightwave for Terahertz-wave Generation at InGaN Photodiode
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Seiki, Takashi Shiramizu, Ryo Matsumoto, Naoto Masutomi, Yuya Mikami, Yuta Ueda, Fumito Nakajima, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 THz-wave intensity modulation by combining a high-speed wavelength-tunable laser and photomixing technique
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Amalina Athira Ibrahim, Hanwei Chen, Takashi Shiramizu, Yuya Mikami, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Terahertz-Wave Phase Modulation Enabled by Optical Interferometric Phase Stabilization
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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