

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：17102  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17H03255  
研究課題名(和文) テラビット級超高繰り返しパルス波技術の研究

研究課題名(英文) THz high-repetition pulse wave 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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来の無線通信では、強度変調の場合、キャリア波6周期程度の時間に最大でも1ビットしかデータを乗せられないためビットレートはキャリア周波数の1/6にとどまる。本研究ではキャリア波としてパルス波を用いることで、パルス波の繰り返し周波数と同じ周期のデータが送信できることを示した。具体的には、複数光波の位相を揃えてフォトミキシングする技術を開発し、未踏領域であった100GHz～400GHzの超高繰り返しテラヘルツ波パルスの生成に成功した。また、このテラヘルツ波パルス測定するための、光-テラヘルツ波自己相関計を発明、開発し、950GHzまでの変調波形を観測した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

位相が精密に揃った複数の光波から超高繰り返しパルス波が生成できることに着目し、従来実現ができなかったテラビット級超高繰り返しパルス波を生成したことは、今後の無線通信高速化手法に一石を投じた成果であるという点で学術的意義がある。また、超高繰り返しパルス波をキャリアとして用いた無線通信への展開に着目し、その原理動作を実現することで、数百Gbit/s級の無線伝送の可能性が視野に入り、将来の情報通信技術の中で無線伝送の位置づけが大きく変革する可能性を示したという点で社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In a conventional wireless transmission system, a data bit needs at least six periods of the wave. Thus, for example, a maximum data rate is a most 70 GHz at a carrier frequency of 400 GHz. In this research, we used a pulse wave as a carrier and showed a feasibility of transmitting with as much data rate as that of pulse wave. We developed a way of photomixing with phase-aligned lightwaves and demonstrated generation of 100- or 400-GHz repetition pulse wave. We also devised a lightwave/THz wave autocorrelator so that we observed a 950-GHz modulated waveform.

研究分野：テラヘルツ波通信

キーワード：テラヘルツ波 高繰り返しパルス フォトミキシング 超高速無線通信

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

急加速で進展する情報通信の多様化、大容量化に対応するため、日本の基幹伝送ネットワークにおいては1波長あたり40Gbpsの光通信の実用化がなされている。また研究レベルでは光デバイス、高周波電子デバイスの進展によってデジタルコヒーレント光通信方式が躍進し、1波長で100Gbpsの伝送も技術的に可能となった。これら大容量通信技術は、NTTを始めとする日本の光通信デバイス技術の寄与が極めて大きい。

光通信デバイス技術はその高性能性、完成度ゆえに他分野への水平展開も図られている。その一つがテラヘルツ波無線である。テラヘルツ波(約100GHz~10THz)も光(光通信波長帯は約190THz)も同じ電磁波であり、両者は光デバイスを介して相互に変換が可能である。例えばフォトダイオードに、あるテラヘルツ周波数の差を持った光周波数(=波長)を持つ二つの光を入射するとフォトミキシングが起こりその差周波(テラヘルツ周波数)の交流電流が発生する。このような変換はフォトダイオードが高周波で動作できるようになって初めて実現された。

本研究代表者は超大容量光通信用フォトダイオードを世界に先駆けて開発しテラヘルツ級動作を実証した。また総務省SCOPE(H25-27)を受託し研究分担者(阪大)とともに単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)をフォトミキサとして用い300GHz帯での50Gbit/sリアルタイム無線通信を世界で初めてデモンストレーションし、さらに300GHz帯における伝送容量の理論限界(キャリア周波数の3分の1)である100Gbit/s実現の見通しを得ている。キャリア周波数にデータを重畳する従来方式では、一般にキャリア周波数の1/10、多値変調を使って最大でも1/3のビットレートの信号しか伝送できない。本研究で目指すテラビット級超高繰り返しパルスの応用例として、例えば一つ一つのパルスにビットを乗せることでキャリア周波数(=パルス繰り返し周波数)と同じビットレートの伝送が可能となり従来技術の理論限界をはるかに超える伝送量が実現できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らが開発に携わった日本発の超高周波デバイスであるフォトミキサ技術をベースに、近年同じく研究代表者らが確立した光干渉法によるテラヘルツ波位相安定化技術を融合し、光技術によってエレクトロニクス技術だけでは未開拓であったテラビット級超高繰り返しパルス波の生成およびパルス波形測定技術の実現にチャレンジする。マイルストーンとして400GHzの超高繰り返しパルス生成とパルスへのビット重畳を通じて提案技術の学術的ポテンシャルを確認する。

### 3. 研究の方法

従来の無線通信では図1(a)に示すように、強度変調の場合、キャリア波の振幅を変調してデータ伝送する。この図の例ではキャリア波6周期に1ビットを乗せているためビットレートはキャリア周波数の1/6、例えばキャリア周波数400GHzの場合は $400 \div 6 = 70$  Gbit/sとなる。位相変調の場合でもビットレートの上限はほぼ同様である。さらに多値変調を用いてキャリア周波数の1/3までの高速変調の報告があるが、それ以上のビットレートは原理的に不可能である。その理由はキャリア周波数に近い周波数での変調ではもはやキャリア波は正弦波ではなくなり、単一周波数のキャリアとしての機能を果たせなくなるからである。そこで本研究では図1(b)に示すようにキャリア波としてパルス波を用いた、キャリア周波数と同じビットレート実現が可能な無線通信方式の可能性にヒントを得、そのキー技術であるパルス波を、現在未踏の200GHz~1THzの領域、具体例として400GHzの超高繰り返しで生成することを目指す。あわせて必要となる超高繰り返しパルス波形の測定法を提案、確立する。このような超高繰り返しパルス波は電気回路技術や従来の短光パルス波生成技術では実現が不可能であり、光位相を厳密に制御できる技術を用いて初めて可能となるものである。

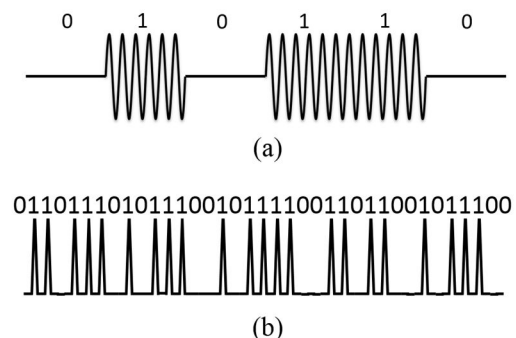


図1 (a)従来のキャリア波変調  
(b)本研究のパルス波変調

以下に本研究で実現する各要素技術について記述する。

#### (1) テラビット級超高繰り返しパルス波生成

光波長安定化技術と位相差安定化技術を用いて、波長と位相を精密に制御した光周波数400GHz間隔で並んだ複数波長の光波の生成にチャレンジする。本研究代表者らによって300GHz帯で確立されているテラヘルツ波生成技術を利用して位相安定化された300GHzの正弦波を生成するものである。この技術を利用し、本研究では、複数の光波において精密な光波長と光位

相差の安定化が可能となれば、UTC-PD の二乗検波特性を利用してテラビット級パルス波の生成が可能であることに着目した。そして光波の数を増加すれば反比例してパルス幅は狭くなる。本研究では約 2THz までの応答が確認されている UTC-PD を使用し、三つ以上の光波からパルス幅 1ps 以下の 400GHz テラビット級パルス波を生成する。

## (2) テラビット級超高繰り返しパルス波形測定法

無線通信用としてのパルス波の品質としては、パルス幅、タイミングジッタ、強度変動がある。伝送品質を見積もるためにはこれらパルス波の基本的特性を精度よく測定する必要がある。そこで無線通信応用をキラーアプリケーションと想定している本研究では、生成したパルス測定法の提案と測定系の構築も研究課題とした。光技術を使った工夫でパルス波生成を行うのと同様に、パルス波測定方法においても光技術ならではの工夫をする。その一つが光学分野で確立されている自己遅延干渉法であり、この手法に本研究代表者らが開発した UTC-PD アレイによる空間合波技術を融合することでテラビット級パルス波を準光学的に操作することが可能となる。

## (3) テラビット級パルス波変調

パルス波は変調信号が乗せられて初めて無線伝送に使用可能となる。本研究では単にパルス波生成にとどまることなく、無線用途のポテンシャルまで確認するため 400GHz 繰り返しパルスに同期して信号を乗せるための変調技術の初期検討を行う。変調技術に関しても、時間多重した 400Gbit/s のデータを直接乗せるエレクトロニクスのアプローチではなく、パルス波生成前の各光波を個別に変調するという光技術的アプローチでテラビット級変調の可能性を検証する。

## 4. 研究成果

### (1) テラビット級超高繰り返しパルス波生成

本研究では、3 つ以上の光波において精密な光波長と光位相差の安定化が可能となれば、フォトミキサとして用いる UTC-PD の二乗検波特性を利用してテラヘルツパルス波の生成が可能であることをシミュレーションにより見出した。図 2 (a), (b) はそれぞれ二乗検波特性により光周波数 400GHz 間隔の 3 光波および 5 光波から得られるテラヘルツパルス波のシミュレーション結果である。3 光波では波形周期 2.5ps (400GHz の逆数) に対してパルス幅はその 1/3 の 0.8ps となりデータを乗せるためには十分に狭い幅が実現できている。さらに 5 光波では 1/5 の 0.5ps というように用いる光波の数に反比例してパルス幅が確実に細くなる。ここでパルス波が一定間隔で生成されているのは各光波間の光周波数と位相差が精密に安定化されていると仮定しているためである。ただしこれらパルス波には 400GHz の高調波である 800GHz の成分が含まれており UTC-PD が高調波の周波数に対しても応答することが必要である。このシミュレーション結果をもとに本研究では約 2THz までの応答が確認されている UTC-PD を使用し、3 つ以上の光波からテラヘルツパルス波の生成を行った。

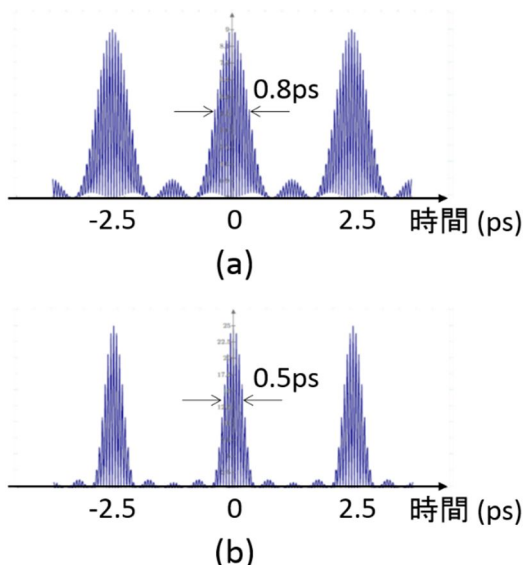


図 2 パルス波形 (シミュレーション)

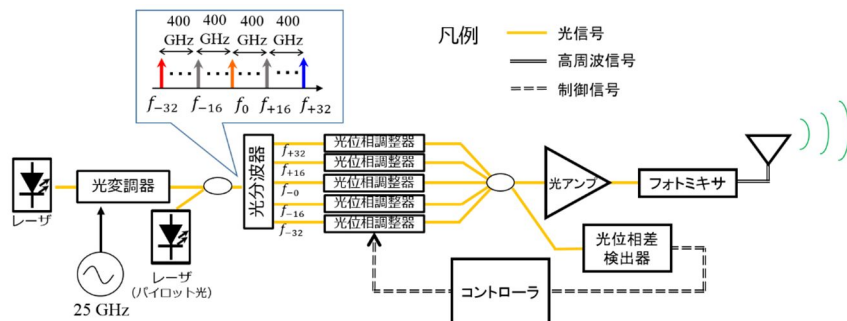


図 3 高繰り返しパルス波生成系の構成

図3は高繰り返しパルス波を生成するための具体的な構成である。例として5光波を位相調整して合波する構成を示している。図の左から順を追って説明する。光通信用として実績のある半導体レーザからの光波を光変調器で25GHzの変調をかけ、25GHz間隔の光コムを生成する。これらのうち光分波器で使用する5光波をそれぞれ別々の光路に取り出す。ここで用いる光分波器は光通信用として開発したものを先行研究(光通信実験)において本研究代表者が改良したものを使用した。各5光波は最終的に光アンプで増幅されたのちにフォトミキサであるUTC-PDで二乗検波され、400GHzパルスとなってアンテナから放射される。一方、光分波器の手前から導入したパイロット光は5光路に分岐され、再び合波された後に取り出されて光位相差検出器により5光路のお互いの位相差が検出される。これら位相差が一定となるようにコントローラが各光位相調整器を動作させることで各5光波の互いの位相差を安定化した。

フォトミキシング前の光の段階でパルス波形を観測した結果を図4に示す。波形観測は光遅延器を用いた光自己遅延干渉計で行った。なおこの実験は300GHz間隔の5光波で行った。シミュレーションで予想された波形とほぼ同じ波形が光相関波形として観測された。このことから、三つ以上の位相の揃った光波により高繰り返し光パルスが生成されることが原理確認された

## (2) テラビット級超高繰り返しパルス波形測定法の開発

空間に放射されたテラヘルツ波は電波であるため、波形測定するためには一度アンテナで受信して電気信号に変換し、この電気信号が伝送線上で発生する電界を検出するのが従来の方である。この方法では高感度な電界検出のために非線形光学結晶と組み合わせた高出力短パルスレーザなどの大規模な設備が必要であり、また伝送線上では電気信号の高周波成分が減衰し正確な波形測定ができないという問題がある。本研究ではこの問題点を根本的に解決するために、テラビット級パルス波形を空間に存在した状態で測定する方法を提案した。具体的にはパルス波を二分岐し、一方を光の段階で遅延させておいて自己遅延干渉により波形を測定するという準光学的手法を開発した。図5は二つのUTC-PDから空間に300GHzの電磁波を放射しこれらを空間合波するテラヘルツ波準光学系の構成である。

図6は600GHz, 800GHz, 950GHzのテラヘルツ波正弦波形を本自己相関計で観測したものである。800GHzまで干渉性が損なわれずにもとの波形が自己相関されている。950GHzでは干渉性が低下しているが、これは主にモジュールからの放射パターンが二つのテラヘルツ波で一致しなくなったためであると考えている。

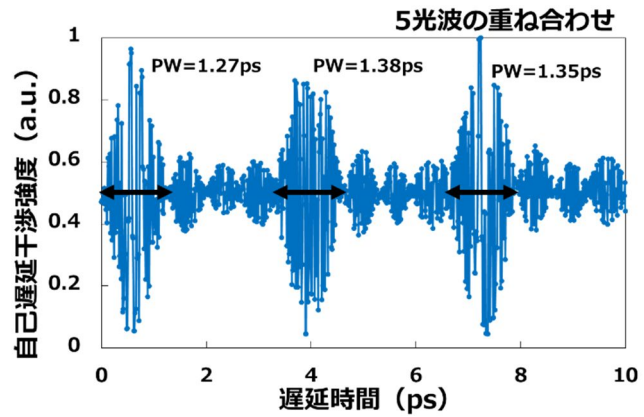


図4 光パルスの自己遅延干渉波形

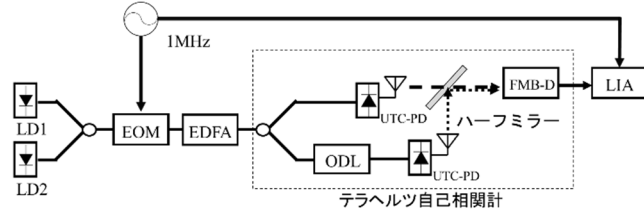


図5 光・テラヘルツ波自己相関計の構成

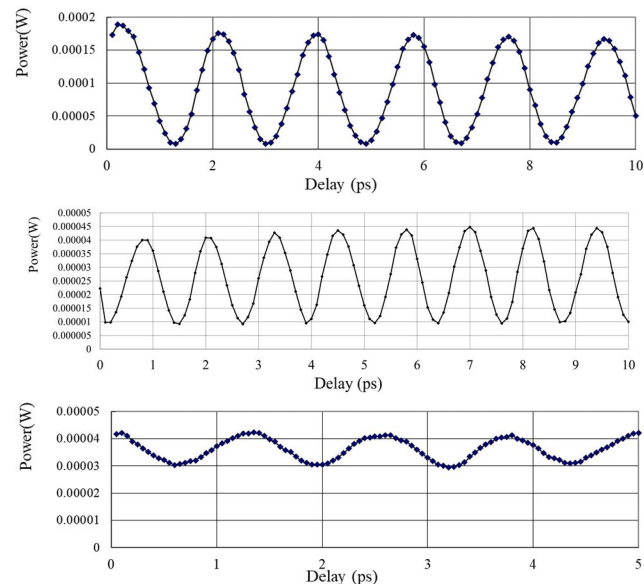


図6 テラヘルツ波自己相関波形 (600GHz, 800GHz, 950GHz)

この自己相関計を用いてテラヘルツ波パルスの波形観測を行った。図7は繰り返し周波数200GHzのパルス相関波形である。正弦波にちかきものの、ピーク部分は明らかに谷部分の幅よりも細くなっており、パルス形状が形成されていることが確認された。パルス幅が予想よりも広がった原因は、UTC-PDの高周波応答特性が平坦でないために、高周波成分の強度が低下したためであると考えている。

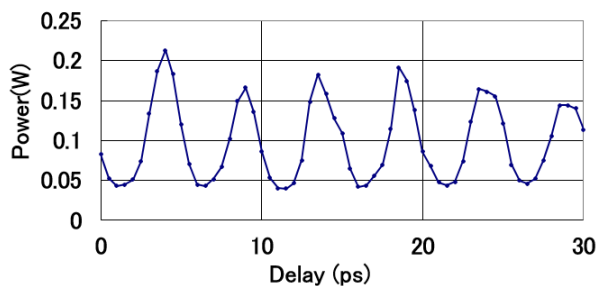


図7 テラヘルツ波自己パルス相関波形

### (3) 時間多重テラビット級パルス

100GHz 繰り返しパルスを時間多重して400GHz 繰り返しパルスを生成する実験を行った。図8はその実験系である。光コムから抜き出した100GHz 間隔の7光波を4つの光路へ分岐し、それぞれ2.5psの時間差をつけて再び合波している。自己相関(自己遅延干渉)を行うために、もとの100GHz 繰り返しパルスを分岐して参照光として用いている。

図9は光パワーメータで測定した自己相関波形である。テラヘルツ波への変換前の光パルスの状態での波形観測結果であるため光干渉による振動が見えているが、包絡線であるパルス波形の形状は等間隔の400GHz 繰り返しが確認された。この結果から、将来400GHzのパルス通信を行う場合、時間多重前の100GHz 繰り返し光パルスに変調をかけることで400Gbit/sの通信量を実現できる見通しが得られた。

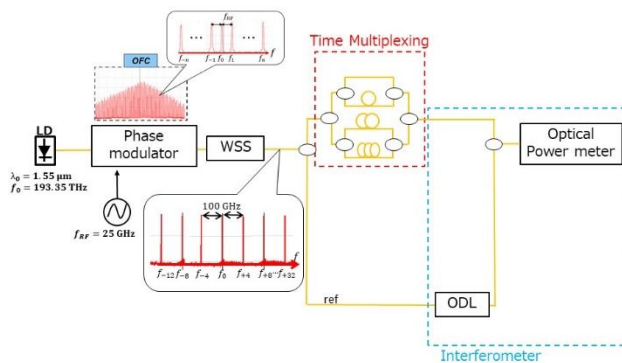


図8 100GHz 繰り返しパルスから400GHz 繰り返しパルスを生成する実験系

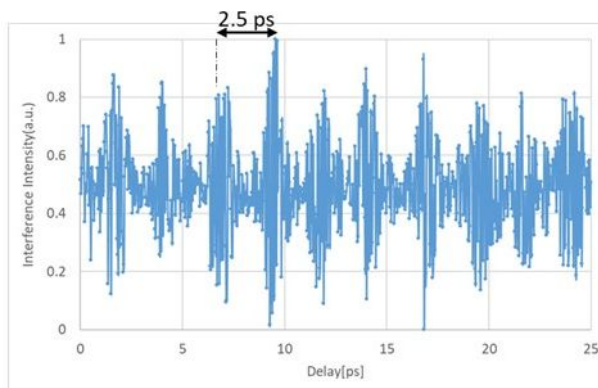


図9 100GHz 繰り返しパルスから時間多重して生成した400GHz 繰り返しパルスの自己相関波形

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 Y. Yamanaka, G. Sakano, J. Haruki and K. Kato	4. 巻 53
2. 論文標題 THz-wave phase shift measurement by THz-wave interferometer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Electronics Letters	6. 最初と最後の頁 868,869
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/el.2017.0530	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19件（うち招待講演 2件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 河野隼太, 福田浩規, 久保木猛, 加藤和利
2. 発表標題 DFBレーザの高速かつ高信頼な波長安定化を目指した注入電流及び温度連携制御
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nanami Nishiyama, Zhou Yang, Gouki Sakano, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 600 GHz Wave Combiner Using Arrayed Photomixer
3. 学会等名 PIERS2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Naito, Yusuke Yamanaka, Nanami Nishiyama, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 THz-wave Beam Steering by Utilizing Photomixing and Chromatic Dispersion of Two Lightwaves
3. 学会等名 PIERS2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Photonics Integrated Circuit for High-power Coherent THz Generation
3. 学会等名 PIERS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和利
2. 発表標題 光通信デバイス技術によるテラヘルツ波発生
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 光枝 健, ムハマッド イムラン, 加藤和利
2. 発表標題 テラヘルツ波パルス生成システムの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Mitsueda, Muhammad Imran, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 300-GHz-Repetition Optical Pulse Generation and Measurement for Terahertz Pulse Wave Communication
3. 学会等名 Microoptics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Kuboki, Ryo Takigawa, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Analysis of Adhesive Layer for Lithium Niobate-on-insulator Waveguides on Silicon Wafer with Room-temperature Bonding Method
3. 学会等名 Microoptics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 光枝 健, 一山昂平, 加藤和利
2. 発表標題 光電変換によるテラヘルツ波パルス生成法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会エレクトロニクス研究会12月研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河野隼太, 福田浩規, 久保木 猛, 加藤和利
2. 発表標題 高速かつ高信頼な光スイッチを目指したDFBレーザの波長切替手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会エレクトロニクス研究会12月研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunta Kono, Hiroki Fukuda, Takeshi Kuboki Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Proposal of Wavelength Control Method at DFB Laser for Fast and Reliable Wavelength Switching
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部第71回連合大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Y. Zhou, G. Sakano, Y. Yamanaka, H. Ito, T. Ishibashi, and K. Kato
2. 発表標題 600-GHz-Wave Beam Steering by Terahertz-Wave Combiner
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yamanaka, Y. Kim, T. Kuboki and K. Kato
2. 発表標題 Optical-to-wireless media conversion by utilizing cross gain modulation at semiconductor optical amplifier
3. 学会等名 22nd Microoptics Conference (MOC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken Mitsueda, Yusuke Yamanaka, and Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Novel measurement method for optical pulse width at high-repetition frequency
3. 学会等名 22nd Microoptics Conference (MOC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohei Ichiyama, Ken Mitsueda, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 400-GHz Repetition Optical Pulse Train by Time-domain-multiplexing technology
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会エレクトロニクス研究会12月研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunta Kono, Yuri Niiya, Takeshi Kuboki and Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Novel Encryption Method by AND Operation between Two Carriers for High-Security Terahertz Wave Communication
3. 学会等名 24nd Microoptics Conference (MOC)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Ichiyama, Ken Mitsueda, Kazutoshi Kato
2. 発表標題 Multiplication of Repetition Frequency at Optical Pulse Train Generated from Optical Frequency Comb
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/The Science and Applications (MTSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野隼太, 新谷友里, 久保木猛, 加藤和利
2. 発表標題 注入電流 / 温度連携制御によるDFBレーザの高速波長切替
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一山昂平, 光枝健, 加藤和利
2. 発表標題 $\Delta$ から生成した光パルス列の時間多重による繰り返し周波数倍増の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会4月研究会
4. 発表年 2019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	久保木 猛  (Kuboki Takeshi)  (50756236)	九州大学・システム情報科学研究院・助教    (17102)	