

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21977

研究課題名（和文）伝搬位置制御型高セキュア無線要素技術の探索的研究

研究課題名（英文）Research on high-security wireless communication based on position-controlled beams

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、5Gの機能をさらに高度化したシステムへの適用を想定し、高周波電波の特長の利用によりセキュリティ性向上が可能となる無線通信技術の提案とその検証システム実現を目的とする。本研究のキー技術である、2つのテラヘルツ波による暗号化通信の原理検証実験を行った。実験では、二地点から送信した300GHzと310GHzの2つのテラヘルツ波を空間で20cm伝送した後、それらの電界の和のパワーを検出した。2つのTHz波の重なり部分がHigh levelとして検出されたことから、予想通りに暗号化通信が実現されていることが確認できた。本成果を論文、国際会議で発表し、論文賞など3件を受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、高周波電波が有する指向性を利用し、また電波の一般的な受信法であるヘテロダイン検波法の特長を利用して、二つの電波を用いるという新たなアプローチによりセキュア性の高い無線通信の提案と原理検証を行ったことである。さらにそれを実現するための要素デバイスの動作実証を行ったことである。現在普及が進んでいる5Gあるいはさらに将来のBeyond 5Gにおいては、個人情報保護やセキュアな通信が必須であり、この要件を満たす技術の可能性を示したことに社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research is aiming to realize a high-security wireless communication at beyond 5G era. As an encryption for wireless communication, a physically secured wireless communication configuration which deduces ANDed data decrypted from heterodyne detection between two wireless data streams was proposed. As a feasibility experiment, the demonstration of a heterodyne AND operation was conducted by devising an optical system to emulate our novel wireless system. Experimental results testified the principle of our proposed encryption function. The result has been presented at some journals and conferences and received three paper awards.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ波 無線通信 フォトミキシング 暗号化通信 ヘテロダイン検波

1. 研究開始当初の背景

近い将来に 5G の導入が目前にきていることなど、無線通信の重要性がますます増してきている。それに伴い個人情報保護やセキュアな通信の必要性が高まっている。一方、通信の安全性に関する技術はまだ道半ばであり、たとえ高度な暗号化を行っても 100% のセキュア性を実現することは原理的に困難である。有線通信の分野では量子暗号の研究が進められているが、この技術は光の特性を利用したもので、無線通信の場合は全く別の技術を創成する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、高周波電波の特長を利用することで、二つのビームステアリングされた電波を特定の位置で重ね合わせて、その場所だけに情報を伝達する物理レイヤで高セキュリティな無線通信路の検証と、それを実現するための要素デバイスの動作実証を目的とする。具体的には提案する通信方法の要素技術である(1) 高周波ビームの高精度高速制御と(2)無線通信のセキュア性の検証を行う。

3. 研究の方法

本研究は、高周波電波の特長を利用することで、セキュア性の高い通信原理の検証と、それを実現するための要素デバイスの動作実証を行うものである。本研究代表者が開発してきた、(a)高周波電磁波の発生・位相制御・ビームステアリング、(b)超 100GHz 領域におけるコヒーレント検波、の成果をもとに考案した、二つの送信機からの電波が重なる位置でのみ信号を受信する方式(図 1)について、この方式の要素技術である高周波ビーム制御による目標位置での電波の重畳と、二つの電波の空間ミキシングの検証に挑む。

具体的な研究項目は以下の通りである。

- (1) 高周波ビームの高精度高速制御
- (2) 無線通信実験系の構築とセキュア性の可能性検証

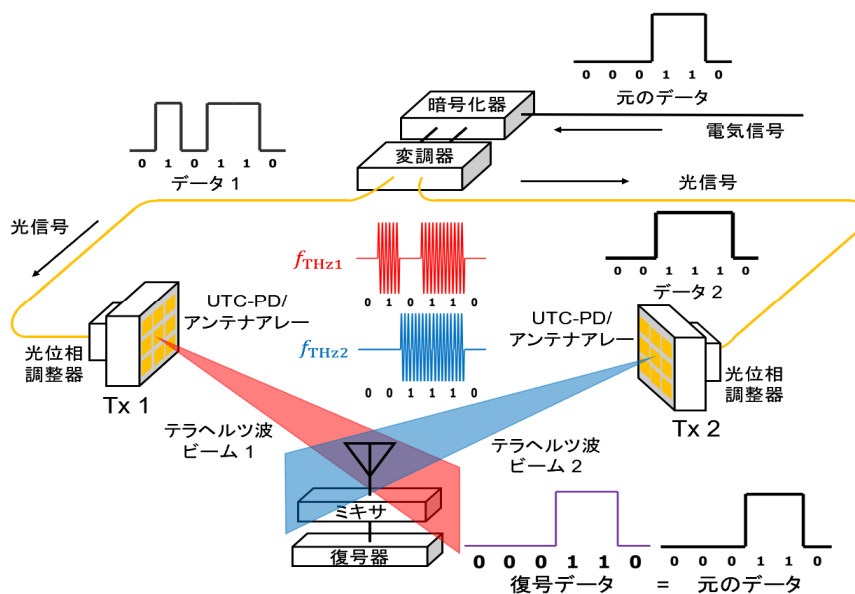


図 1 本研究で実現を目指す無線通信の構成図

4. 研究成果

(1) 高周波ビームの高精度高速制御

本研究の基盤をなす技術は、THz 波源をアレー化して合波し、放射強度を増大することである。そのために必要な、信号の分岐、増幅、位相調整が容易に実現できるという光技術のメリットを活かせるフォトミキシングを用いて THz 波発生を行うことである。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て、2019 年度までに 300GHz 帯 4 アレー素子において、単一素子の約 10 倍のピーク強度が得られていた。これは、THz 源の数が 4 倍になったことに加え、アレー配列による 4 倍の指向性利得が実現でき、理論上 16 倍のピーク強度が得られることで説明できる。300GHz 帯 UTC-PD は定格出力20μW程度であることから、4 アレー化により約200μWの出力が可能であることが確認されていた。

これに対し、本研究で適用を想定している通信領域は数十 m~数百 m 四方の屋内施設、屋外スタジアム、野外フィールドなどであり、十分な通信品質を得るには1mW以上が望ましい。現在3mm角のチップ面積を維持したままアレー数を増加するために、2020 年度は 1 つのアンテナに 2 つの UTC-PD を並列接続し、4 つのアンテナのピッチを変えずに UTC-PD を 8 アレーにすることを試みた。これにより各アンテナには 2 倍の電流が給電される。なお電流合流部分は 300GHz 帯においてインピーダンスマッチングを行っている。1ch あたりの THz パワー P は、アンテナの放射抵抗を R

とすると $P = I^2 R$ (ここで I は電流) の関係から 4 倍となるので 4 アレーでは全パワー 4 倍、ピークパワー 64 倍が期待できる。図 2 は 8 アレー UTC-PD チップの写真である。各チャンネルにおいて、2 つの UTC-PD (0.25mm ピッチ) からの電流信号を合流させた後、トーナメント型に接続した 1x4 スロットアンテナに給電している。1 チップ内に 4 チャンネル配置し、UTC-PD の総数は 8 である。アンテナ間隔は 0.5mm ピッチであり、これはちょうど 300GHz 電磁波の半波長に相当し、アレー配列によって得られる指向性利得が増大する設計になっている。

THz 波強度測定は図 3 に示す実験構成で行った。光源として 2 つのレーザダイオードからそれぞれ 193.4THz と 193.1THz の光 (光周波数差 300GHz) を発生させ、光合波器で合波した後、1x2 光分岐器を多段接続して 8 経路に分配する。それぞれの経路で光位相を調整してマイクロレンズアレーを介して各 UTC-PD に 2 光波を入射する。UTC-PD でフォトミキシングされピーク信号として生成された 300GHz 交流電流は各アンテナから同相で放射される。チップの上方 200mm に

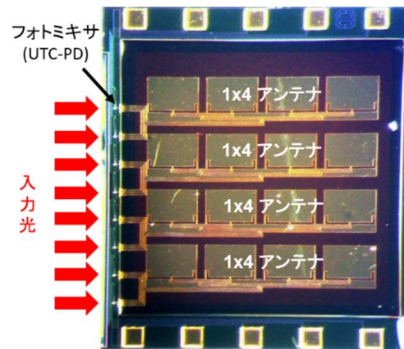


図 2 8 アレー UTC-PD (写真)

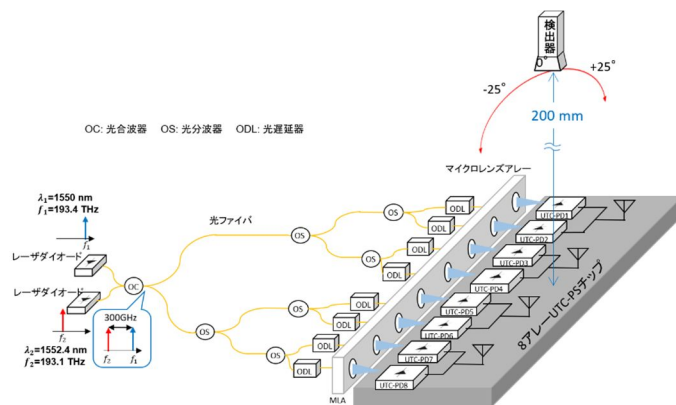


図 3 THz 波強度測定の実験構成

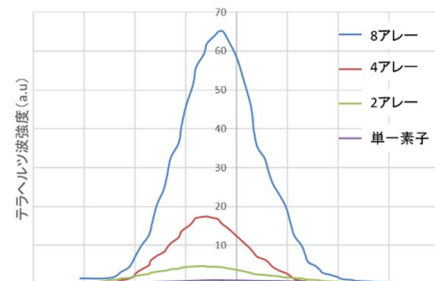


図 4 THz 波強度角度分布

配置されチップを中心に回転する THz 波検出器でパワーを検出し、チップ全体からの放射パワーの角度分布を測定する。THz 波検出器の角度分解能は約1°である。

図 4 は単一 UTC-PD のピーク強度を 1 として規格化した測定結果である。比較のために単一 UTC-PD、2 アレー UTC-PD、4 アレー UTC-PD からの測定値も示している。期待通りアレー数の 2 乗に比例してピーク強度が増加している。4 アレー UTC-PD からの強度は前回の測定結果（単一素子の約 10 倍）よりも大きく、単一素子のほぼ 16 倍となっている。これは前回までの測定系の角度分解能約7°から今回約1°に改善したことにより測定精度が向上し理論通りの値が検出できたためである。今回の 8 アレーではさらに 4 倍、単体素子からは 64 倍のピーク強度となっている。300GHz 帯 UTC-PD の定格出力20 μ W程度を考慮すると、8 アレー化により1mW出力の送信器相当のピーク強度（積分した全パワーとしては300 μ W程度）が可能であることが確認できた。

次に、既開発の位相調整集積回路を用いたビームステアリングの角度精度測定を行った。この位相調整集積回路は Si 基板上に形成した光導波路から成るヒーター型 8 アレー光位相調整器（図 5）に電圧を印加し光導波路の温度上昇による屈折率変化により位相変化させるものである。まず初めに印加電圧に対する 300GHz 帯 THz 波の位相変化量が電圧値の約 2 乗で増加することからヒーターの消費電力（=電圧の 2 乗）に比例して位相変化が起これることを確認した。また位相変化 π （角度 $\pm 45^\circ$ に対相当）を実現するためには 0 ~ 17V の電圧変化が必要であること、電圧変化に対する角度変化（グラフの傾き）が最大で12°/Vであり 10 ビットのデジタル制御で $\pm 1^\circ$ の角度精度が可能であることを確認した。

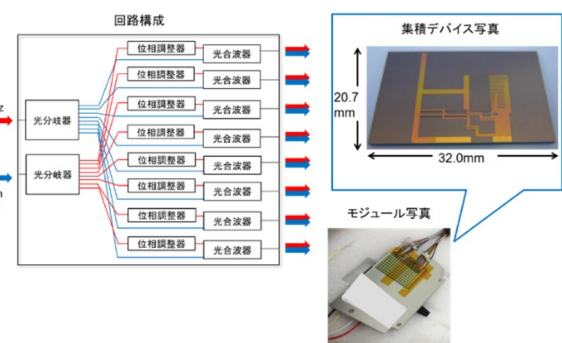


図 5 位相調整集積回路

このデータを参考にして、位相調整集積回路を用いたビームステアリングを行った。位相調整集積回路の 8 チャンネルのうち 2 チャンネルを用い、一方のチャンネルの位相を変化させ、8 アレーのうち隣り合ったチャンネルの 2 つの UTC-PD それぞれにこの位相調整集積回路からの出力光（位相調整された 2 光波）を入力し、それぞれの UTC-PD から位相調整された 300GHz のビーム信号を発生させた。図 6 は印加電圧を 0 ~ 15V の範囲で変化させた時のそれぞれの電圧における THz 波強度の角度依存性である。2 アレーでのビーム形成であるため指向性は低くビームの広がりはあるが、 $\pm 30^\circ$ の範囲でステアリングができています。電圧を 0 ~ 18V の範囲で変化させることができれば $\pm 45^\circ$ のステアリングが可能である見通しを得た。 $\pm 45^\circ$ のステアリング角は、この後に述べる、もともと受信用に開発した角度拡大準光学アンテナの拡大率 1.5 倍と組み合わせると120°(= $\pm 60^\circ$)のステアリング角の可能性を示すものである。

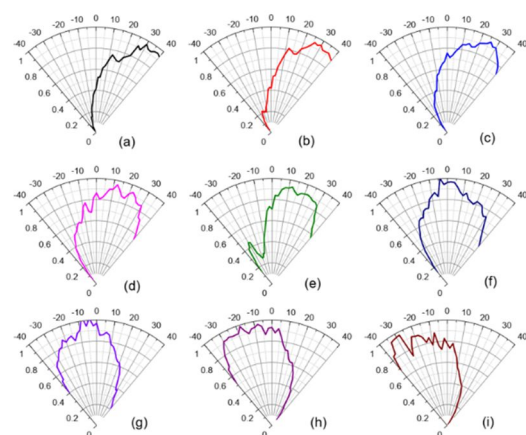


図 6 位相調整集積回路を用いたビームステアリング

- (a) 0 V, (b) 5 V, (c) 7.5 V,
- (d) 9.3 V, (e) 10.8 V, (f) 12.1 V,
- (g) 13.2 V, (h) 14.2 V, (i) 15 V

(2) 無線通信実験系の構築とセキュア性の可能性検証

本研究の最大の新規性である「2つのTHz波どうしのヘテロダイン検波によるAND動作」の実験系の構成は図7に示すように、まず2つのレーザ光源から光周波数差が300GHzの2つの光波を生成し、合波した後に500Mbit/sで0と1の繰り返しパターンの強度変調をかけて二光路に分岐し、光路間の位相を光遅延器(ODL)で揃えてそれぞれをUTC-PDに入力する。各UTC-PDからは位相の揃った300GHzのTHz波が空間へビーム状に放射される。また別の2つのレーザ光源から光周波数差が310GHzの2つの光波を生成し同様に別の2つのUTC-PDから位相の揃った310GHzのTHz波がビーム状に放射される。今回の実験では同一のチップ上に形成した4アレーUTC-PDを用いた。300GHzと310GHzの2つのTHz波(それぞれ $E_1 \exp(2\pi f_{300\text{GHz}}t)$ 、 $E_2 \exp(2\pi f_{310\text{GHz}}t)$ とする)は空間を20cm伝送した後、THz検出器でそれらの電界の和のパワー

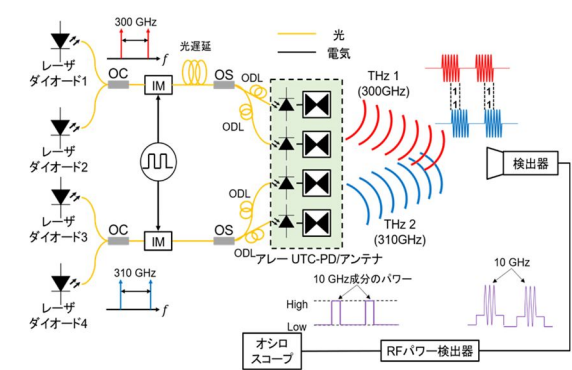


図7 2つのTHz波どうしのヘテロダイン検波によるAND動作の原理実験のブロック図

として検出され、 $f_{310\text{GHz}} - f_{300\text{GHz}} = 10\text{GHz}$ のビート信号が生成される。そしてビート信号の強度(振幅)が $E_1 E_2$ すなわち2つのTHz強度のANDとなる。そこでTHz検出器の後に10GHzの周波数成分の強度を検出するためのRFパワー検出器を置き、波形をオシロスコープで観測した。

$$|E_1 \exp(2\pi f_{300\text{GHz}}t) + E_2 \exp(2\pi f_{310\text{GHz}}t)|^2 \propto 1 + E_1 E_2 \cos\{2\pi(f_{310\text{GHz}} - f_{300\text{GHz}})t\}$$

図8は、AND波形の観測結果である。3段に並べた波形のうち、上段、中段がそれぞれ300GHz、310GHzのTHz波をTHz波検出器で検出した波形(RFパワー検出器は用いていない)、下段が300GHzと310GHzのTHz波を同時にTHz波検出器で検出した後、RFパワー検出器で検出した波形である。左側が300GHz信号を0.75ns(約0.25bit)、右側が3.0ns(1.5bit)遅延した場合である。2つのTHz波が重なり部分がHigh levelとして検出され、その幅が遅延量の違いにより変換していることから、予想通りにAND動作されていることが確認できた。

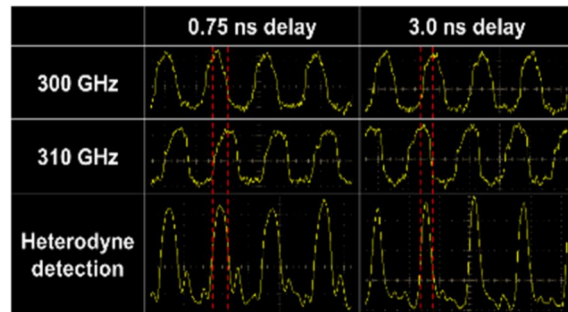


図8 2つのTHz波(上段、中段)どうしのヘテロダイン検波によるAND波形(下段)

以上、本研究で提案している方式の原理検証を300GHz帯において行うことに成功した。

以上の成果を論文、国際会議で発表し、論文賞など3件を受賞した。

5. 主な発表論文等

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

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Yamamoto R., Ichiyama K., Che M., Kuboki T., Ito H., Ishibashi T., Kato K. | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 300 GHz optical waveform measurement by novel THz-wave autocorrelator | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Electronics Letters | 6. 最初と最後の頁 562-563 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/el.2019.4131 | 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 Kenta Yamauchi, Kazutoshi Kato | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Optical heterodyne AND operation as emulation of physical layer security at wireless communication | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Electronics Express | 6. 最初と最後の頁 1-4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.18.20210008 | 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 山内 健太, 河合 優佑, 車 明, 伊藤 弘, 石橋 忠夫, 加藤 和利 | 4. 巻 J104-C |
| 2. 論文標題 テラヘルツ波を用いた高セキュリティ無線システムの原理実証 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌C | 6. 最初と最後の頁 118-119 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transelej.2021JCL0002 | 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 - |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 7件/うち国際学会 4件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kenta Yamauchi 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 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 Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Generation and Control of Terahertz-Wave Beam by Photonics Technology |
| 3 . 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/The Science and Applications (MTSA2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Nanami Nishiyama, Zhou Yang and Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Impact of AR coating on THz Wave Radiation from Arrayed Photomixers/Antennas |
| 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 Kenta Yamauchi and Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Demonstration of AND Operation between Two Carriers for Encryptionat Secured TerahertzWave Communication |
| 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 Ming Che, Nanami Nishiyama, Kenta Yamauchi, Takeshi Kuboki, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, and Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 450-GHz-Wave Beam-Steering with 1 kHz Repetition by Optical Phase Control |
| 3 . 学会等名 The 45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazutoshi Kato |
| 2. 発表標題 Terahertz-wave beam control by photonics technology |
| 3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山内健太, 山本留央, 車明, 伊藤弘, 石橋忠夫, 加藤和利 |
| 2. 発表標題 2キャリア間のアンド演算を用いた無線通信信号の暗号化の検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 一山昂平, 山本留央, 加藤和利 |
| 2. 発表標題 THz自己相関系を用いたテラヘルツパルス列観測 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Matsuo, Ming Che, Haruichi Kanaya, Kazutoshi Kato |
| 2. 発表標題 THz-Wave Power Multiplication by Parallel-Connection UTC-PDs |
| 3. 学会等名 25th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Ruo Yamamoto, Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Sub-THz-Repetition Optical Waveform Measurement by Novel THz-wave Autocorrelator |
| 3 . 学会等名 25th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (招待講演) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Kenta Yamauchi, Ruo Yamamoto, Ming Che, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Physical encryption method using AND operation between two carriers for high-security wireless communication |
| 3 . 学会等名 25th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) (招待講演) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Kenta Yamauchi, Yusuke Kawai, Ming Che, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 Terahertz Heterodyne AND Operation for Physically Encrypted Wireless Communication |
| 3 . 学会等名 The 46th European Conference on Optical Communication (ECOC2020) (招待講演) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Younjin Kim, Kazutoshi Kato |
| 2 . 発表標題 600-GHz Wave Generator Consisting of Arrayed Light Sources in Combination with Arrayed Photomixers |
| 3 . 学会等名 The 46th European Conference on Optical Communication (ECOC2020) (招待講演) |
| 4 . 発表年 2020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 |
|---------|---------|
|---------|---------|