

# テラヘルツ波無線通信用信号生成デバイスの開発

代表研究者 久保木 猛 九州大学 大学院システム情報科学研究所 助教  
共同研究者 加藤 和利 九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授

## 1 研究調査の概要

本研究は、研究代表者らが開発してきたテラヘルツ波発生デバイス技術をベースに、新たに信号生成機能（変調機能）を付加することで将来の 6G（ポスト 5G）での利用が期待されるテラヘルツ波無線通信用デバイス技術を確立するものである。大型な大容量無線通信装置を著しく小型化することにより、テラヘルツ波無線通信のモバイル用途への応用が期待でき、大容量高速無線通信技術の普及を目的とする。本研究成果として二回のレーザ光源チップを試作した。第一回目の試作では、信号生成機能を付加しない光回路により、初めて欧州ファンドリで製造するデバイスの基本性能評価を行った。その結果、レーザ光源の均一性、安定性を確認した。第二回目の試作では、第一回目の試作結果をもとに変調器集積レーザ光源の設計、シミュレーション、レイアウトを行った。

## 2 研究調査の目的と経緯

テラヘルツ波は未開拓周波数として、マイクロ波/ミリ波よりも 10 倍以上の無線通信の高速化・大容量化を実現する技術として大きく期待されている [1]。テラヘルツ波発生には数々のすぐれた取り組みがなされてきている。その一つとしてレーザで生成した二光波をフォトミキサに入力し、二光波間のビート信号としてテラヘルツ波を生成する方法がある [2]。この方式では波長(周波数)差のある 2 つのコヒーレントなレーザ光を合波し、超高速光電変換デバイス(UTC-PD: Uni-Traveling Carrier Photo Diode)に入射してアンテナからテラヘルツ波を得るものである。高いコヒーレンス性が得られること、周波数掃引ができることから将来幅広い分野への展開が期待できる。研究代表者らの研究グループはこの技術の通信用途への展開に着目し、フォトミキサのアレー化によるテラヘルツ波生成の研究に取り組んできた[3-6]。使用距離など適用先はまだ限定的だが、高出力化、集積化を進めれば近い将来一般的な産業用途として大きく発展していく可能性がある。

研究代表者らはテラヘルツ波発生装置の小型化を図るため、フォトミキサアレーにレーザ光を入射するための光源アレーの開発も行ってきた[7-8]。そしてレーザ光源、光カップラ、光増幅器を半導体基板上に集積したテラヘルツ波生成光源チップを考案・試作・評価した。実測では 12ch の均一な光出力が得られている。一方、通信に用いるためには生成した搬送波に外部の変調器を用いて信号を重畳する必要があり、結果的に装置が大きくなっていった。しかしこの開発してきた CW テラヘルツ波生成チップに変調機能を集積すれば確実に通信に適用できる。そこで本研究調査においては、光集積回路に光変調器を搭載したテラヘルツ波無線信号生成チップの検討、試作、ならびに評価を行うことで、搬送波の生成と電気信号の重畳を同時に実現し、超小型の 1 チップのテラヘルツ波無線信号生成装置の実現を目的とした。これを実現するために、これまでに設計してきた光集積回路を基礎とし、光変調器を搭載した信号を重畳可能なテラヘルツ波生成用光源チップの作製を行う。本研究では大容量無線通信モジュールを従来技術では実現しえなかった小型化により、モバイル用途にも十分に資する通信技術を確立し、情報通信技術の普及を目指す。

## 3 研究調査の進め方

### 3-1 レーザ光源アレーの試作

光源チップの試作については、研究代表者が保有している光集積回路のシミュレーション、CAD ツール (Synopsys 社 OptSim, OptoDesigner) を活用して光源チップの検討および設計を行った。実際のチップ試作は、将来安価に開発できて普及を加速するため、海外の商用の光集積回路チップ製造シャトルサービス (オランダ・Smartphotonics 社) を利用した。研究代表者らはこれまでに同社を利用した光集積回路の試作を国内の大学研究機関としては先駆けて行っており、これまでの設計資産を活用して、本研究調査のテラヘルツは信号生成に向けた光集積回路の試作を進めた。

### 3-2 レーザ光源アレー性能評価

試作した光源チップ、ならびに無線信号伝送の評価については、所属する研究機関（九州大学）が保有する測定装置により実施した。研究代表者のグループではこれまで世界に先駆けてフォトミキシング方式によるテラヘルツ搬送波生成手法の評価を行い、多数の発表を行ってきた。本研究調査においてはこれらで利用した測定装置を活用して試作した光源の評価を行った。評価項目としては、1 つ目は光源の波長を光スペクトラムアナライザで測定し設計通りの波長が生成されているかを確認した。2 つ目は各 SOA から出力される光強度を光パワーメータで測定し、アレー内の強度ばらつきを評価した。

### 3-3 レーザ光源アレーとフォトミキサアレーの結合によるテラヘルツ波発生

レーザ光源アレーとフォトミキサアレーを光学定盤上で光結合し、フォトミキサに集積した平面アンテナから空間へテラヘルツ波を放射して、集積チップを中心にしてテラヘルツ波検出器を回転させ、テラヘルツ波強度の放射角度分布を測定した。

### 3-4 変調機能付きレーザ光源アレーの試作

レーザ光源アレーの測定結果をもとに、レーザ光源の直後に光変調器をモノリシックに配置したチップを設計した。

## 4 デバイス試作と評価結果

### 4-1 レーザ光源アレーの試作

研究代表者らのグループは従来より日本国内のファウンドリで分布帰還型（DFB）レーザをアレー化した集積チップを試作してきた。この集積チップは、2つの DFB レーザ、2×1 光合波器、1×12 光分岐器、アレー状の 12 個の半導体光増幅器（SOA）から構成される。2つの DFB レーザからの波長の異なる 2 つの光は合波された後、12 個の SOA へ分配され SOA で増幅される。したがって各 SOA からは波長の異なる 2 つの光波が出射される。従来チップでは 1×12 光分岐器で分配される光強度が数%のばらつきを持っていた。また日本国内のファウンドリでは変調器の集積には対応していなかった。

そこで本研究では、1×2 光分岐器を 3 段カスケード接続した 1×8 光分岐器を設計し、また試作は欧州のファウンドリ Smart photonics 社を利用した。図 1 は 1×2 光分岐器のシミュレーション結果である（左は光強度、右は光強度分布）。最適長さに設計することで光損失を 2%程度に抑えられ、かつ等しく強度を分配できることが確認された。これを 3 段接続すれば等分配された 8 つの出力が得られる見込みが付いた。図 2 は設計した集積チップのレイアウト図である。設計した光集積チップは、1×8 光分岐器と光変調器を組み合わせた 8 アレー光源と、分布反射型(DBR)レーザと光変調器を組み合わせた 4 アレー光源を搭載した。光変調器は電流の局所的な集中による温度変化による特性ばらつきの影響を最小化するとともに、将来の試作に向けて光変調器の特性比較を行うため、1 つの光変調器を集中して配置するのではなく、数種類の長さを持つ複数の変調器を分散して配置した。8 アレー光源では光増幅器・光変調器と光分岐器から構成されており、外部からレーザ光を入力する必要がある。一方、同時に試作した 4 アレー光源では 300～900GHz 帯のテラヘルツ搬送波生成を可能とする DBR レーザーアレイを搭載した。従来方式と異なる方式を同時に試作することで、将来に外部光源を必要としない、集積度を向上した光集積チップの試作に向けた実測データの取得を図った。

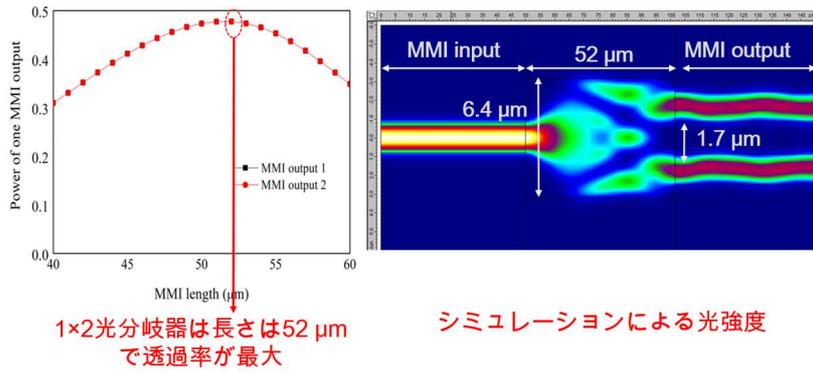


図1 1×2 光分岐器のシミュレーション結果

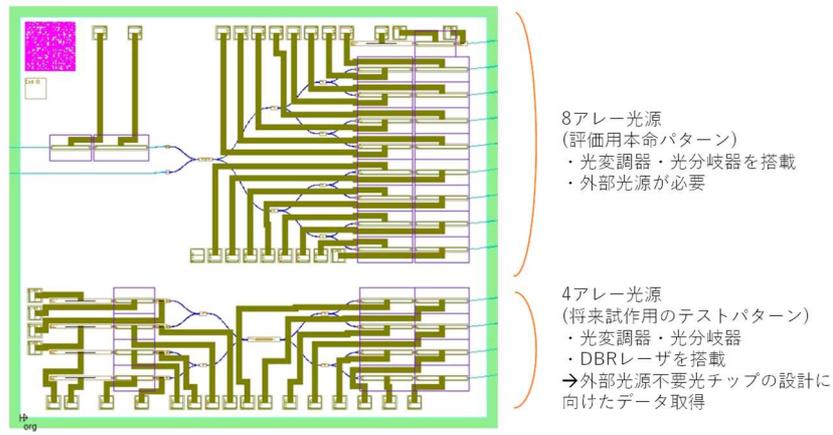


図2 チップレイアウト

#### 4-2 レーザ光源アレー性能評価

試作した光源チップ、ならびに無線信号伝送の評価については、所属する研究機関（九州大学）が保有する測定装置により実施した。研究代表者のグループではこれまで世界に先駆けてフォトミキシング方式によるテラヘルツ搬送波生成手法の評価を行い、多数の発表を行ってきた。本研究調査においてはこれらで利用した測定装置を活用して試作した光源の評価を行った。図3はその評価装置である。レーザ光源アレーチップは専用の配線基板に実装し、配線基板を光学調心ステージ上に固定した。レーザ光源アレーチップからの出力光を、先端にマイクロレンズアレーが付いたファイバアレーにさせて測定器へ導いた。

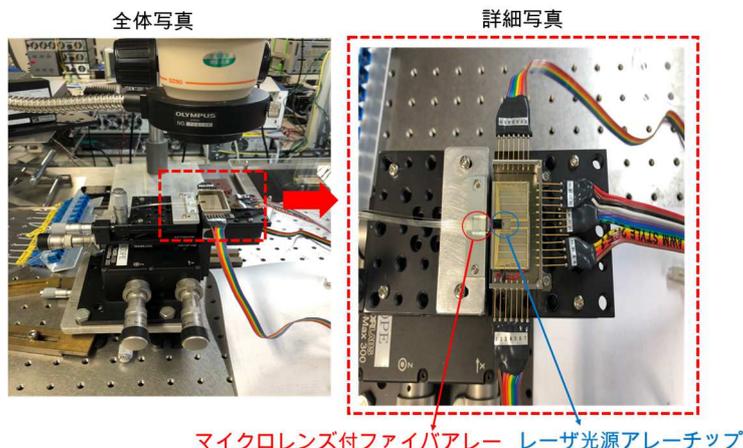


図3 レーザ光源アレーチップ評価装置

評価項目としては、1つ目は光源の波長を光スペクトラムアナライザで測定し、設計通り約 600GHz 離れた2つの波長が生成されていることを確認した(図4)。

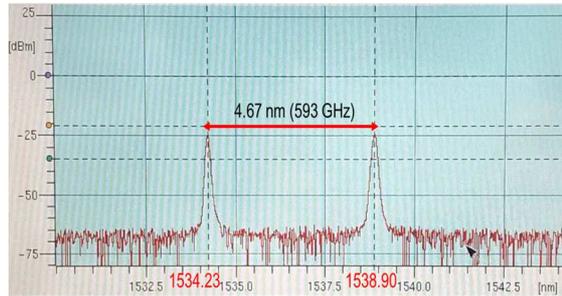


図4 レーザ光源アレーチップからの出力光の光スペクトル

評価項目の2つ目として各 SOA から出力される光強度を光パワーメータで測定し、アレー内の強度ばらつきを評価した。図5はSOAの電流値に対する出力光強度を8つの出力において測定した値である。SOA電流値に対する特性が一致していることから、1×2光分岐器を3段カスケード接続して1×8光分岐器を構成する方法では極めて高い出力の均一性が実現できることが判明した。

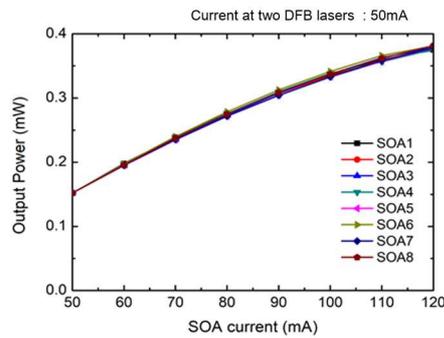


図5 レーザ光源アレーチップからの出力光の光スペクトル

#### 4-3 レーザ光源アレーとフォトミキサアレーの結合によるテラヘルツ波発生

レーザ光源アレーとフォトミキサアレーを光学定盤上で光結合し、フォトミキサに集積した平面アンテナから空間へテラヘルツ波を放射して、集積チップを中心にしてテラヘルツ波検出器を回転させ、テラヘルツ波強度の放射角度分布を測定した。

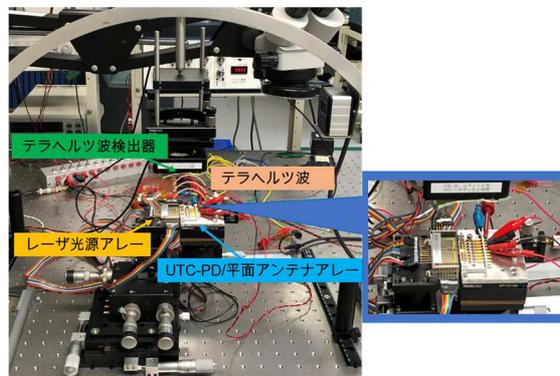


図6 レーザ光源アレーチップからの出力光の光スペクトル

図6はテラヘルツ波強度測定装置の写真である。チップから約20cmの位置にテラヘルツ波検出器を配置している。レーザ光源アレーチップ内の二つのレーザのうち一方のみの電流を振幅100mA、周波数1MHzで

変調し他方は 100mA の一定電流を注入した。また出力部分の各 SOA には 100mA の電流を注入した。これにより各 SOA からの出力光強度は 1MHz で強度変調されている。さらにこの光をフォトミキサアレーで光電変換していることから、発生するテラヘルツ波も 1MHz で強度変調されることになる。そのためテラヘルツ波検出器から取り出される信号はロックインアンプにより 1MHz 成分を抽出することで、高感度なテラヘルツ波強度測定ができることになる。図 7 はテラヘルツ波検出器をチップの周りに回転して測定したテラヘルツ波強度の角度依存性である。この測定では電流を注入する SOA の数を変化させて強度分布の違いを観測した。一つの SOA に電流を流し一つのフォトミキサからしかテラヘルツ波を発生させない場合には黒色の線で示すようにノイズと区別がつかないほどの小さな強度となった。一方、テラヘルツ波を発生させるフォトミキサの数を二つ（赤の線）、三つ（青の線）と増やすことによって強度が増大するとともに、明確な指向性が現れている。これはまさに複数のテラヘルツ波の合波による全パワーの増大およびアレー配置による指向性の増大を表している。

強度の増加を定量的に調べるために、図 6 の強度分布からピーク強度を読み取りフォトミキサの数との関係をグラフにしたものが図 8 である。ピーク強度は一次関数よりも大きな変化をしていることから、確かにアレーの効果による指向性が得られていることが確認された。

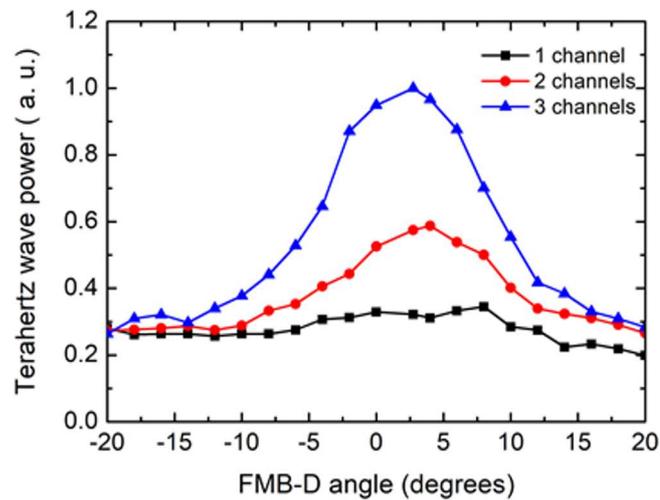


図 7 テラヘルツ波強度の角度分布

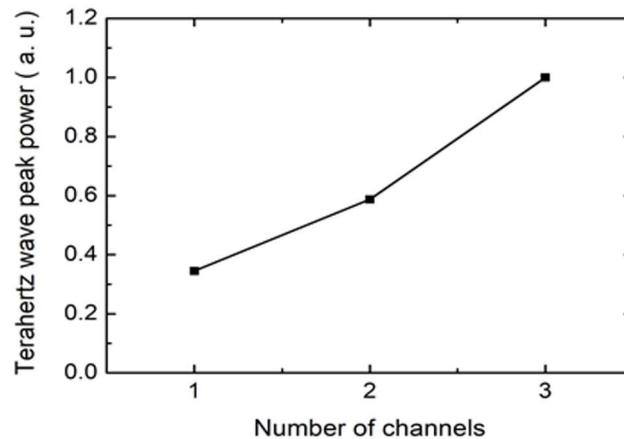


図 8 テラヘルツ波ピーク強度と素子数の関係

#### 4.4 変調機能付きレーザ光源アレーの試作

上記の実験結果をもとに、研究目標であるレーザ光源アレーへの光変調器集積チップの設計を行った。図9は完成したレイアウト図である。チップ内の構成は次の通りである。まず複数のレーザで波長の異なる2つの光波を発生する。次にそのうちの1光波の強度を光変調器で変調し信号を乗せる。それぞれの光波を増幅した後に4つの光路に分岐し、波長の異なる光波どうしを合波して、4つの二光波ペアを生成する。最後に各二光波ペアを光増幅器で強度増幅して、出力端から出射する。設計上のポイントは、各光導波路における光損失を均一化するために、光導波路どうしの交差数を均等にすること、また光導波路の長さを各チャンネル間で等しくしていることである。これにより出力強度および位相のチャンネル間ばらつきを最小限に抑えることが可能となっている。本デバイスは現在欧州のファンドリで製造過程にあり、完成すれば本研究で目標としているテラヘルツ波発生とデータ変調がワンチップで可能となるデバイスが実現される。

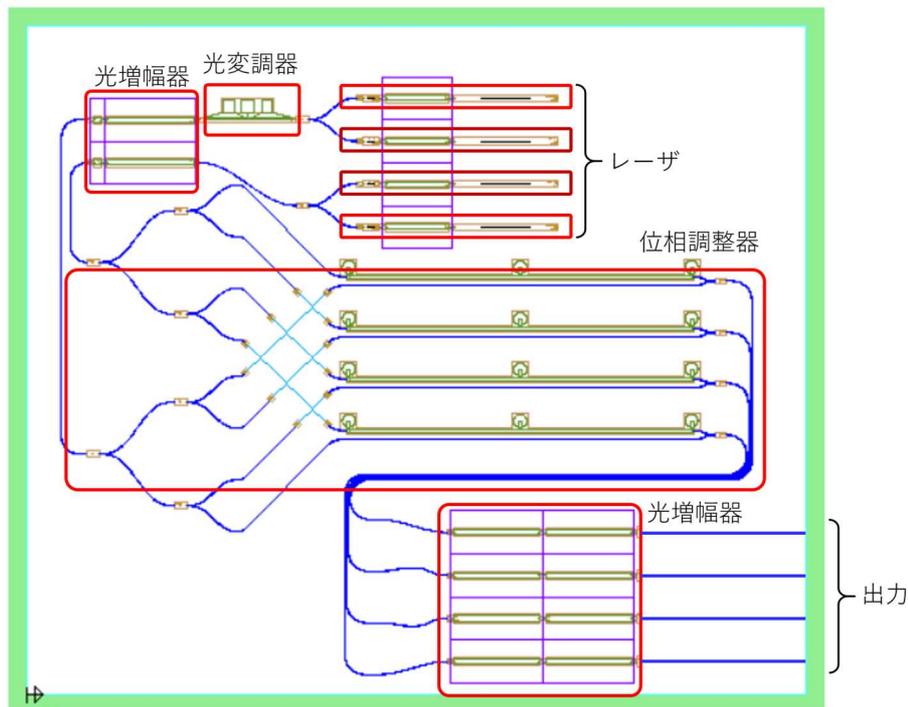


図9 テラヘルツ波ピーク強度と素子数の関係

## 5 まとめ

本研究は、将来の6G（ポスト5G）での利用が期待されるテラヘルツ波無線通信デバイス技術を確立するものである。テラヘルツ波とデータ変調の両機能を小型化半導体デバイスで実現することにより、テラヘルツ波無線通信のモバイル用途への応用が期待でき、大容量高速無線通信技術の普及が可能となる。本研究成果として二回のレーザ光源チップを試作した。第一回目の試作では、信号生成機能を付加しない光回路により、初めて欧州ファンドリで製造するデバイスの基本性能評価を行った。その結果、レーザ光源の均一性、安定性を確認した。第二回目の試作では、第一回目の試作結果をもとに変調器集積レーザ光源の設計、シミュレーション、レイアウトを行った。各チャンネル間の出力強度および位相のばらつきを最小限に抑えることが可能となる設計を実現した。本デバイスは欧州のファンドリで製造過程にあり、完成すれば本研究で目標としているテラヘルツ波発生とデータ変調がワンチップで可能となるデバイスが実現される。

## 【参考文献】

- [1] T. Nagatsuma, S. Hsatake, M. Fujita, H. H. N. Pham, K. Tsuruda, S. Kuwano, and J Terada, "Millimeter-Wave and Terahertz-Wave Applications Enabled by Photonics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 1, p. 0600912, Jan. 2016.
- [2] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, "Uni-traveling-carrier photodiodes," in *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, Optical Society of America, 1997, pp. 83–87.
- [3] G. Sakano, J. Haruki, K. Tsugami, H. Kanaya and K. Kazutoshi, "4×4 arrayed THz-wave combiner composed of UTC-PDs and slot antennas," *CLEO-PR/OECC/PGC2017*, Singapore, P3-120, 2017.
- [4] Y. Zhou, G. Sakano, Y. Yamanaka, H. Ito, T. Ishibashi, and K. Kato, "600-GHz-Wave Beam Steering by Terahertz-Wave Combiner," in *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, 2018, pp. 1–3.
- [5] M. Che, N. Nishiyama, K. Yamauchi, T. Kuboki, H. Ito, T. Ishibashi, and K. Kato, "450-GHz-wave beam-steering with 1 kHz repetition by optical phase control," *The 45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019)*, Dublin, Th.2.C-2, 2019.
- [6] M. Che, Y. Matsuo, H. Kanaya, H. Ito, T. Ishibashi, and K. Kato, "Optoelectronic thz-wave beam steering by arrayed photomixers with integrated antennas," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 16, pp. 979–982, 2020.
- [7] Y. Kim, T. Kuboki and K. Kato, "Arrayed light sources for photonic terahertz wave generation," *The 5th International Symposium on Microwave/The Science and Applications (MTSA2019)*, Busan, We-P3-v-6, 2019.
- [8] Y. Kim and K. Kato, "600-GHz Wave Generator Consisting of Arrayed Light Sources in Combination with Arrayed Photomixers," *2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)*, Brussels, Belgium, 2020, pp. 1-3.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Demonstration of Bi-directional 400-GHz-wide High-speed High-reliability Wavelength Switching at DFB Laser with Current/Temperature Cooperative Control	Photonics and Electromagnetics Research Symposium	投稿済
Demonstration of 600-GHz wave beam forming by arrayed light sources with arrayed photomixers	IEEE Photonics Technology Letters	投稿済
High-speed and high-reliability wavelength switching at tunable distributed feedback laser array (TLA) with current/temperature cooperative control	IEEE Photonics Technology Letters	投稿済
光通信用 DFB レーザの注入電流及び温度協調制御による双方向高速高信頼波長切替	第 82 回応用物理学会秋季学術講演会	2021 年 9 月
DFB レーザの注入電流／温度協調制御によるサブ秒波長切替	2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	2021 年 9 月