

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06432

研究課題名(和文)半導体光デバイスを用いた周波数変換の研究

研究課題名(英文)A study on frequency conversion by using optical semiconductor devices

研究代表者

福島 誠治 (Fukushima, Seiji)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：10610214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：一般の無線通信・放送機器において周波数変換は電子部品でなされるが、半導体レーザーなどの光部品でも実行可能であることをシミュレーションと実験によって示した。光ファイバ通信でも多用されている電界吸収型変調器集積半導体レーザー(EML)には、ポートが多いこと、出力レーザー光電力が入力信号の乗算が得られることや非線形応答を示すことから周波数変換のポテンシャルが高い。本研究ではEMLなどの半導体光部品を用いて、光副搬送波に対する周波数変換が可能であることを示した。通常と異なる使用方法で予測される雑音や周波数特性の課題に対する対応も検討し、必要な光部品をすべて搭載したモジュールを試作し、十分な性能を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体レーザーのような光部品でヘテロダイン周波数変換のような信号処理を実験的に証明したことには大きな学術的意義がある。光信号処理という学術分野は存在するが実験実証が少なく、展開に対する閉塞感があった。本研究は新しい信号処理形態を提示した。現在の課題の解決や特性の改善など、今後の研究分野の広がりが期待できる。

通信における信号処理においては、電子デバイスによる大きな電力消費、すなわち大きな温室効果ガスの排出が問題となっていることから、全光信号処理への期待が高まっている。本研究の社会的意義として、通信システムの一部を光デバイスに置き換えることによる地球温暖化対策が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：We show that frequency conversion is possible by using optical devices such as semiconductor lasers while the conversion is usually done by using electronic devices. Having several ports, an electro-absorption modulator integrated with a laser diode (EML) outputs multiplied signals or distorted signals, which may result in successful operation of heterodyne frequency conversion. This paper reports that the frequency conversion to sub-carrier multiplied light can be generated by using the EML. We developed and evaluated a EML module that exhibits excellent characteristics such as frequency response and noises even under our unique use.

研究分野：光通信システム

キーワード：周波数変換 半導体レーザー 光副搬送波 ヘテロダイン 逡倍 マイクロ波光学

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

例えば家庭用 BS、CS の受信システムや大学発の超小型キューブ人工衛星において、X 帯 (8-12GHz) や Ku 帯 (12-18GHz) の受信や伝送が必要な小規模な人工衛星受信システムでは、銅線媒体のリンクを用いたダウンコンバージョンした中間周波 (IF) での伝送が一般的である。実際にはパラボラアンテナ直下に低雑音増幅器、局部発振器 (LO)、周波数変換器が配置されるが、過酷な気象環境での使用は電子デバイスにとって好ましいものではなく、さらに LO の周波数安定度や位相雑音の点からも望ましいものではない。

(2) 技術的背景

伝送については、光副搬送波によって光ファイバを介する光リンクを構成すれば、顕著な損失低減が可能になる。移動体通信システムや放送の不感地対策として、光副搬送波によって高周波 (RF) 信号を伝送する技術は普及している。ただし、このような光リンクシステムであっても、周波数変換によりダウンコンバージョンを行う方がスマートである。X 帯や Ku 帯マイクロ波をそのまま光副搬送波へと変換してユーザ側へ伝送すると、伝送可能周波数や伝送距離は光ファイバの波長分散により制限されるからである。

2. 研究の目的

(1) 光ファイバによる RF 伝送の特徴

上記の通り、RF 信号の長距離伝送において、光副搬送波による伝送は損失低減、伝送媒体の軽量化、細線化、低コスト化などの観点から非常に合理的な手段である。また、光副搬送波を用いる場合であっても RF のままの伝送より IF 伝送を採用する方が多くの特性の点で有利である。しかしこのような構成では、1. (2) 記載の課題が完全に解決される訳ではない。

(2) 課題解決の手法

本研究では、IF 帯光副搬送波を用いた光ファイバ・リンクで必要となる周波数変換を電子デバイスによらず光デバイスで実現する。電界吸収型変調器集積半導体レーザ (EML) をキーデバイスとして採用する。EML の採用に当たっては、変換効率、光強度雑音 (RIN)、光モジュールの構成法 (アイソレータ・フリー化、RF 給電手段) など、課題が多い。本研究では、これらをひとつずつ解決し、シミュレーションと実験によりヘテロダイン周波数変換を実証していく。また、EML ではなくフォトダイオード (PD)、特にアバランシュ・フォトダイオード (APD) を用いたヘテロダイン周波数変換についても検討を行った。さらに、EML、APD の両方における周波数帯域の検討を行い、シミュレーションと実験によって提案を実証した。

3. 研究の方法

(1) ヘテロダイン周波数変換 (シミュレーション)

最初に光学的なヘテロダイン周波数変換が可能な複数のモデルの提案を行った。それらの提案に対して、シミュレーションにより変換の可能性や効率を求めた。

EML には 2 つの電気ポート (LD 及び電界吸収型変調器 (EAM) の電気端子) と 1 つの光学ポート (EAM) が備えられている。入力すべき電気信号は RF と LO の 2 種であるから、3 通りの構成が考えられる。あるいは 2 つの周波数成分をいずれも光副搬送波として光学ポートに入力する手段もありうる。それらの提案のうち、例として RF を LD へ、LO を EAM に入力する構成を図 1 に示す。LD は定電流と RF 信号で駆動されるが、EAM は定電圧と LO で駆動される。EAM から RF、LO に加えて IF も重畳された光副搬送波が出力される。光ファイバ・リンクを用いた伝送の後に OE 変換すれば、周波数変換された IF 信号が電気信号として得られる。すなわち、ミキサなどの電子デバイスを用いることなく周波数変換が実現される。この構成以外にも、RF や LO の多様な入力手段も提案した。

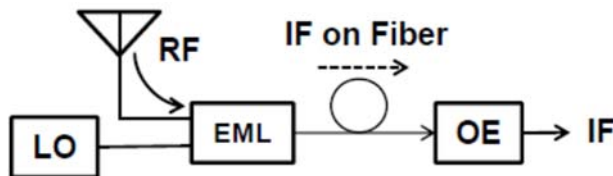


図 1 周波数変換の構成例 (RF は EML の LD へ、LO は EAM に入力される。DC は省略した。)

(2) ヘテロダイン周波数変換 (実験)

図 1 と同様の系を用いて、ヘテロダイン周波数変換の実験を行った。例えば、変換信号の電力に対する EML デバイスの使用条件に対する依存性を測定し、多数の実験パラメータの最適化を

行った。求めた実験条件によって、周波数変換を確認した。シミュレーションから周波数変換の効率は EAM への印加電圧依存性に強く依存し、最も変換出力が大きくなる条件は、EAM 透過率 T と印加電圧 V_{EAM} に対して、 $|\Delta T^2/\Delta V_{EAM}|$ が最大になる点、すなわち透過率曲線の変曲点であることが分かった。この条件下で、構成 2 による周波数変換の EAM バイアス電圧依存性を図 2 に示す。RF, LO, IF の周波数はそれぞれ 13, 12, 1GHz である。光デバイスのみで周波数変換できることが示された。所有する実験装置の制限のため 10GHz 程度の周波数で実証したが、シンセサイザやスペクトラムアナライザを更改すれば数十 GHz の信号が得られる。

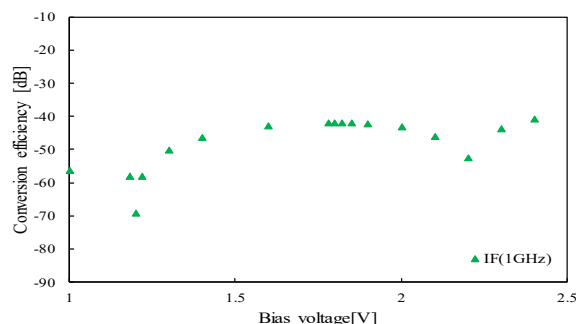


図 2 周波数変換効率の EAM バイアス電圧依存性 (横軸は逆バイアスを正とした。)

(3) 光モジュール

半導体レーザの性能のうち雑音に関するものは、強度雑音(RIN)と位相雑音が知られる。本研究では異なる実験条件のもとで RIN を評価し、特殊な使用方法 (EAM に外部からのレーザ光を入力する) における RIN の評価を行った。

この結果をもとにバタフライ・パッケージの中に EML を搭載し、LD と EAM に対する 2 つの V 型ジャックコネクタの高周波ポートと 1 つのシングルモード光ファイバのポートを有するモジュールを試作した。このモジュールには光アイソレータが実装されていないため、外部から EAM に向けて光副搬送波を入力することができる。戻り光の多くは EAM で吸収され、LD まで戻らないことが奏功したと想像される。前節の実験はこのモジュールを用いて実施したもので、その結果より本モジュールが期待通りの実験実証に役立ったことが示された。

試作光モジュールでは採用されていないが、EAM への配線に Q マッチやテーパード・マイクロストリップライン(tapered microstrip line)を採用すれば、EAM への印加電圧を一部の周波数で増強できることを示した。数値計算の結果を図 3 に示す。ピーキングにより、30GHz において 1GHz 以下と同じ電圧が印加できることが分かる。

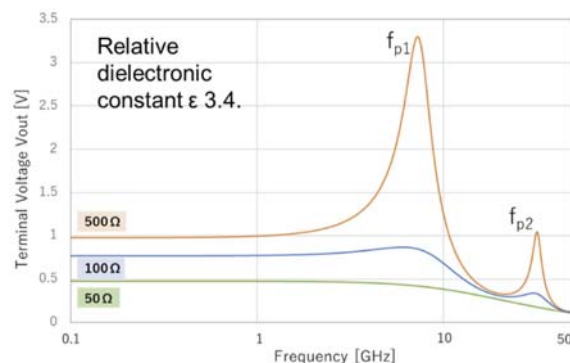


図 3 EAM 印加電圧の周波数依存性 (負荷インピーダンス 500Ωの場合、約 30GHz の印加電圧は 1GHz の印加電圧と同程度である。)

(4) その他

本研究の主な対象は EML をヘテロダイン周波数変換であったが、周波数通倍の構成も提案した。さらに電気-光変換ではなく、光-電気変換においても 2 種の周波数変換 (ヘテロダイン及び通倍) が可能であるという見込みを得た。今後実験実証を進める予定である。

4. 研究成果

(1) ヘテロダイン周波数変換 (シミュレーション)

これらの関係をもとにすべての提案構成に対して Matlab を用いてシミュレーションを行った。EML からのレーザ光の波長は 1.55μm 帯で、外部から光副搬送波として EAM に入力するレーザ光の波長は 1.3μm 帯を想定した。市販グレードの EML で問題なく、周波数変換が可能であることが確認された (図 4)。非常に多くのパラメータがあるが、変換効率向上に大きく寄与するものは EAM への印加電圧であることが分かった。

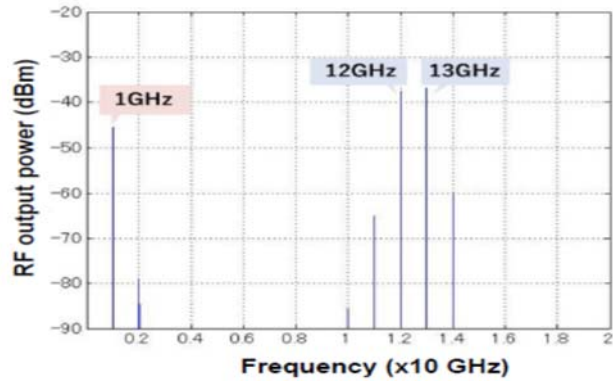


図4 ヘテロダイン周波数変換の例（シミュレーション）

(2) ヘテロダイン周波数変換（実験）

上述したように EML を用いたヘテロダイン周波数変換の実現に向けて、構成を提案し、その多くを実験実証した。周波数変換の実験結果（出力電力スペクトル）を図5に示す。RF と LO の周波数はそれぞれ 8, 5GHz であり、差周波 3GHz の IF も観測されている。また、図5では通倍波やハーモニック・ミキシングの発生も観測されており、応用拡大は有望だと考えられる。この他、周波数変換の効率が EAM への印加電圧に強く依存することや EAM の透過率の変曲点で最も効率が高くなることをシミュレーションと実験により確認した。なお、提案した構成では光アイソレータを搭載できないため、実験的な RIN の評価によって十分な RIN 特性が得られることを確認した。光アイソレータを具備せず、2つの高周波ポートと1つの光ファイバポートを備えたモジュールを試作し、周波数変換の実験実証を行い、提案モデルを証明した。

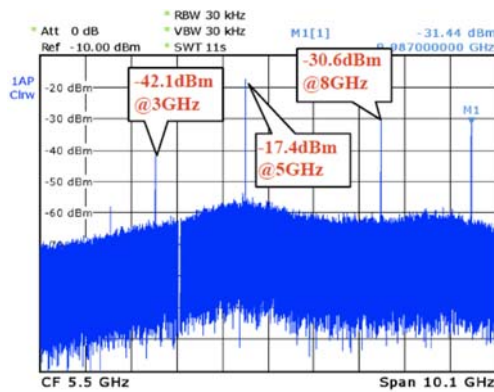


図5 ヘテロダイン周波数変換の実験結果の例（RFは8GHzで、LOは5GHzである。3GHzのIFが比較的高い変換効率で観測された。）

(3) 光モジュール

提案した構成では光アイソレータを搭載できないため、実験的な RIN の評価によって十分な RIN 特性が得られることを確認した。光アイソレータを具備せず、フレキシブルケーブルの2つの高周波ポートと SC レセプタクルの光ファイバポートを備えたモジュールを試作し、周波数変換の実験実証を行い、提案モデルを証明した。図6に RIN の PD 電流依存性を示す。1mA 程度の小さな PD 電流であっても、RIN は十分小さい値であった。試作した TOSA モジュールの写真を図7に示す。光アイソレータの有無に関わらない十分小さいモジュールが実現された。

さらに提案した構成を小型人工衛星の地球局内リンクに導入し、有効に動作することも確認した。今後、大学内だけではなく、多くの地球局内リンクや一般家庭の BS/CS 受信システムへの展開が期待される。

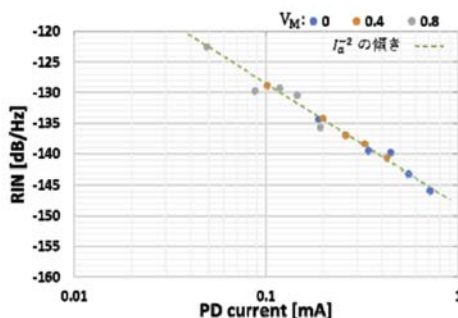


図6 RIN の PD 電流依存性



図7 試作モジュールの写真

(4) APD を用いた周波数変換への展開など

本研究の主な対象は EML をヘテロダイン周波数変換であったが、周波数通倍の構成も提案した。さらに電気-光変換ではなく、光-電気変換においても2種の周波数変換（ヘテロダイン及び通倍）が可能であるという見込みを得た。今後実験実証を進める予定である。

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 4件）

1. 著者名 Seiji Fukushima, Satoshi Yanagihara, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama	4. 巻 6
2. 論文標題 Light Modulation Enhancement by using an Impedance Matching Scheme for a Subcarrier Multiplexed	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.25046/aj060602	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 Seiji Fukushima, Kakeru Tokunaga, Takuya Morishita, Hiroki Higuchi, Yasushi Okumura, Hirotugu Kikuchi, Hidehisa Tazawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Polymer-Stabilized Blue Phase and its Application to a 1.5-um Band Wavelength Selective Filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 crystals	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst11091017	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 Kohei Tasaki, Mitsuru Tokumaru, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama, Seiji Fukushima	4. 巻 59
2. 論文標題 Nested Mach-Zehnder interferometer optical switch with phase generating couplers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	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） 10.35848/1347-4065/ab8f09	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 永山 務, 青柳 祥平, 福島 誠治, 渡邊 俊夫	4. 巻 J104-C
2. 論文標題 分布定数線路モデルと等価な単位セル構造による透明マントのための屈折率0媒質の設計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 33-42
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 Shuhei Shimada, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama, Seiji Fukushima	4. 巻 58
2. 論文標題 Design of arrayed-waveguide optical switch employing window function for crosstalk reduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	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) 10.7567/1347-4065/ab2b1	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 Zhaohong Wang, Seiji Fukushima	4. 巻 42
2. 論文標題 Control strategy for networked control systems with time delay and packet dropout using linear matrix inequalities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13638-019-1556-4	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 Masayuki Kawasako, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama, Seiji Fukushima	4. 巻 7
2. 論文標題 Scalability of multi-stage nested Mach-Zehnder interferometer optical switch with phase generating couplers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal	6. 最初と最後の頁 140-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25046/aj070418	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25件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 長友宏憲, 福島誠治, 渡邊俊夫, 永山務
2. 発表標題 電界吸収型光変調器を用いた光逓倍器の提案
3. 学会等名 第74回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上海李, 竹本春太, 福島誠治, 渡邊俊夫, 永山務
2. 発表標題 不均一な光アレイ部品で実装されたニューラルネットワークの課題
3. 学会等名 第74回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kawasaki, T. Watanabe, T. Nagayama, S. Fukushima
2. 発表標題 4-stage Mach-Zehnder interferometer optical switch with phase generating couplers
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nagayama, S. Fukushima, and T. Watanabe
2. 発表標題 Two-Dimensional Full-Tensor Anisotropic Metamaterials with the Impedance of Free Space for Transformation Electromagnetics
3. 学会等名 2020 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新海智士、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 電界吸収型光変調器集積レーザを用いた周波数変換の提案(2)
3. 学会等名 第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸高慎吾、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 アバランシェ・フォトダイオードを用いた周波数変換器の周波数特性
3. 学会等名 第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Nagayama, S. Fukushima, and T. Watanabe
2. 発表標題 Design Method for Negative Refractive Index Metamaterials by Using a Distributed Transmission-Line Model
3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Yanagihara, Seiji Fukushima, Tosiya Watanabe, Tsutomu Nagayama
2. 発表標題 Impedance-matched feedline for a semiconductor laser emitting subcarrier multiplexed light
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳原聖史、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 Qマッチを用いた光変調器内蔵レーザを用いたRoF伝送特性
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 2019年

1. 発表者名 小堀壮彦, 木下紀正, 飯野直子, 真木雅之, 福島誠治
2. 発表標題 霧島新燃岳2011噴火の映像解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Yamauchi, T. Watanabe, T. Nagayama, S. Fukushima
2. 発表標題 Joint-switching architecture utilizing waveguide-based multicast switch in CDC-ROADM for multi-core fiber networks
3. 学会等名 24th Optoelectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics s in Switching and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiko Kobori, Masayuki Maki, Hidehiko Tokushima, Seiji Fukushima
2. 発表標題 Characteristics of particle size distribution of falling ash particles from Sakurajima obtained from laser-optical particle sizevelocity disdrometer observation data
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳原聖史、福島誠治、渡邊俊夫、永山務、大島颯太郎
2. 発表標題 光変調器内蔵レーザを用いたRF信号の周波数変換特性
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島颯太郎、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 アバランシェフォトダイオードを用いたRF信号の周波数変換特性
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Watanabe, K. Tasaki, T. Nagayama, S. Fukushima
2. 発表標題 Nested Mach-Zehnder interferometer optical switch with low crosstalk
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲永みづほ、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 EMLを用いた光副搬送波周波数の変換
3. 学会等名 令和元年度電気学会九州支部沖縄支所講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Fukushima, T. Uezono, S. Ohshima, T. Watanabe, T. Nagayama
2. 発表標題 Optoelectronic Frequency Conversion Employing an Electro-absorption Modulated Laser for a Cube Satellite Earth Station
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大島颯太郎、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 半導体光デバイスを用いた高周波信号の周波数変換
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 今岡航、福島誠治、渡邊俊夫、永山務
2. 発表標題 電界吸収型光変調器集積レーザを用いた周波数変換の提案
3. 学会等名 平成30年度電気学会九州支部沖縄支所講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fukushim, Y. Kora, M. Nishio
2. 発表標題 Atmospheric Vapor Distribution Observation by Using a Ku-Band Beacon from a LEO Satellite
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomonori Uezono, Seiji Fukushima, Toshio Watanabe, Tsutomu Nagayama
2. 発表標題 Link Length Analysis of a Radio-on-Fiber System for a Cube Satellite Earth Station
3. 学会等名 Annual Conference on Engineering and Applied Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Fukushima, K. Tokunaga, Y. Okumura, and H. Kikuchi
2. 発表標題 Performance improvement of a 1.5-um variable wavelength filter employing polymer-stabilized blue phase
3. 学会等名 Optics and Liqyud Crystal 2021 Satellite Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平川大凱, 福島誠治, 渡邊俊夫, 永山務
2. 発表標題 アバランシェ・フォトダイオードを用いた周波数通信
3. 学会等名 令和4年度電気学会九州支部沖縄支所講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Teshima, S. Fukushima, T. Nagayama, and T. Watanabe, H. Kikuchi
2. 発表標題 Light Beam Steering Demonstration by Using Liquid Crystal Loaded Metasurface
3. 学会等名 Photonics and Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Seiji Fukushima
2. 発表標題 Radio frequency conversion techniques by using opto-electronic devices
3. 学会等名 6th BIT Annual World Congress of Smart Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

鹿児島大学・福島研究室
https://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~fuku-lab/
鹿児島大学理工学研究科(電気電子)工学専攻福島研究室
https://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~fuku-lab/index.html

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	永山 務 (Nagayama Tsutomu) (80781997)	鹿児島大学・理工学域工学系・助教 (17701)	
研究分担者	渡邊 俊夫 (Watanabe Toshio) (90524124)	鹿児島大学・理工学域工学系・准教授 (17701)	

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