

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02201

研究課題名（和文）極限性能半導体レーザーの研究開発

研究課題名（英文）Extreme characteristic semiconductor laser diode

研究代表者

浜本 貴一（Hamamoto, Kiichi）

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：70404027

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：PPR制御技術の検討、および周波数応答評価技術の検討、について検討した。まず20 GHz、および60 GHz付近と複数のPPRの確認に成功した。60 GHz付近のPPRピーク強度は低周波領域と同等の高いピーク強度を示し、PPRピーク強度を制御できる可能性があることも示唆する結果が得られた。またPPRピーク強度と信号品質との関係を検討し、ピーク強度が高くなるほど信号品質はむしろ改善される傾向にあることを明らかにした。加えて、新たにナノピクセル構造を検討し、素子長として3μm長が実現可能であることを明らかにした。また「位相同期光コムスペクトルプローブ法」の動作原理を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AIやIoT技術の進展などを背景に、将来は小型携帯機器等における超高速光伝送が必要になると予測される。その有力候補として、半導体レーザー単体による光通信技術の適用が期待されるが、現状では複数の半導体レーザーを用いた多波長並列（波長多重）伝送をせざるを得ず、それに伴う回路部品点数の増大のため、将来のボード内配線技術には適用困難である。本研究成果に基づき半導体レーザー単体の直接変調の極限的性能が実現されれば、自動車の完全自動運転やAIロボットの発展などへ大きく寄与することが考えられ、社会的意義が大木だけでなく、反動他レーザーの物理限界を明き薨にしようとする基礎検討は、学術的にみても極めて価値が高い。

研究成果の概要（英文）：The way to control photon photon resonance (PPR), and the evaluation way of high frequency response were investigated. First of all, double PPRs were successfully observed at 20 GHz and 60 GHz, with sufficiently high response intensity which implies the possibility of the height peak control. In addition, we clarified the affection of high-peak against modulated signal and we confirmed that the modulation quality was improved as the intensity went high. Moreover, we have newly tried to design very compact cavity by using nano-pixel configuration. The results revealed the potential of around 3 μm in the cavity length. We also verified the principle of phase-matched optical-com spectral probe method. The results indicated successful demonstration of the proposed evaluation technique.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー 直接変調 小信号周波数応答 フォトン・フォトン共振 アクティブMMI 光コム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

AI や IoT 技術の進展などを背景に、将来は小型携帯機器等における超高速伝送、特に 100 Tb/s を超える超高速伝送が必要になると予測される。ボード内配線の超高速伝送技術として、半導体レーザ光による光通信技術の適用が期待されるが、現状では半導体レーザ単体の直接変調性能の制約から、100 Tb/s クラスのボード内伝送であっても、複数の半導体レーザを用いた多波長並列(波長多重)伝送をせざるを得ず、それに伴う回路部品点数の増大のため、将来のボード内配線技術には適用困難である。半導体レーザ単体の直接変調極限性能実現に向けた基礎検討は、学術的にみても極めて価値が高い。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体レーザの極限性能を追求し、本質的な理論限界である数百 THz までの超高速応答特性を目指した基礎研究を進めることを目的として研究を行った。

半導体レーザの周波数応答特性は、前述のようにキャリア・フォトン共振周波数の制約を受け、最大でも 40-50GHz 程度であった。これに対して、半導体レーザ構造によってはキャリア・フォトン共振周波数よりも高い周波数領域においてフォトン・フォトン共振(PPR: Photon Photon Resonance)による共振ピークが存在することから、近年世界中でフォトン・フォトン共振現象に関する検討が活発化しており、分割キャビティ型や面発光レーザ型等が報告されている[1, 2]。PPR は、半導体レーザ内の複合共振により生じることが分かっているが、PPR 周波数の制約を超えた超高速通信信号を生成し伝送するためには、フォトン・フォトン共振ピークを発現させるだけでは不十分で、少なくともフォトン・キャリア(CPR: Carrier Photon Resonance)共振ピークから PPR ピーク近傍までの周波数領域において応答劣化が無い(すなわち、応答低下が 3dB 以下にならない)周波数応答特性を実現できるかどうかことが重要である。この応答劣化を避けるため、フォトン・フォトン共振周波数ピークをフォトン・キャリア共振ピークから高くても数 10GHz 程度内に設定せざるを得ず、結局フォトン・キャリア共振周波数の制約からは完全には逃れられない結果となっていた。

研究代表者は、能動導波路(フォトンを発光する光導波路)における多モード干渉現象を世界で初めて提案・実証した実績を有しており[3]、アクティブ MMI レーザの研究開発を率先して進めてきている。キャビティ内に複数の共振経路を有するアクティブ MMI (能動多モード光干渉)レーザ構造により、複数の PPR 現象を発現させ、前記制約を超えた極限性能の実現を可能とすると考えられる。なお、通常の光分岐構造を半導体レーザに適用しただけでは分岐損失が大きく(光の相反性から N 分岐導波路では導波光は 1/N に減ってしまう)実際にはレーザ発振すら困難であるが、光干渉を分岐原理とするアクティブ MMI を用いることにより、初めて分岐損失なくレーザ発振が可能になる。加えて複数のフォトン・フォトン共振を得るためには、1) 同一素子内に複数(かつ多数)のキャビティを有する構造を可能とすること、2) 各キャビティの中心波長を設計・制御できること、3) 各キャビティの FSR(free spectral range)の設計・制御ができること、の 3 点が必要で、アクティブ MMI レーザを用いることで上記 3 条件を満たすことができ、他の PPR を発現する半導体レーザ構造に対して優位性がある。

周波数応答特性については、明瞭な複数 PPR の実験的確認、特に高い周波数領域にも複数の PPR ピークを発現させることが重要である。加えて、PPR を用いた平坦化に関する知見はまだ不十分で、フォトン・フォトン共振ピークの制御、特にそのピーク強度、ピーク幅の制御などによる平坦化手法の検討が課題となっていた。そこで本研究では、アクティブ MMI レーザの構造上の特徴を生かし、PPR ピークの制御技術に関する知見を得ることを目的として研究を進めた。また現実的には、提案している極めて高い周波数(100GHz 超)に対する評価技術そのものが十分に確立されているとは言えない。そこで本研究では、新たに光周波数コムを利用した新しい周波数応答特性評価技術を検討することを目的として研究を進めた。

### 3. 研究の方法

本研究では(1) PPR 制御技術の検討、(2) 周波数応答評価技術の検討、の 2 つについて、以下の方法により検討を進めている。

#### (1) PPR 制御技術の検討

“複数”のフォトン・フォトン共振を生じさせ、広帯域化させるメカニズムの検討を行う。この目的のため、特に PPR 制御技術について実験・理論両面から検討を進める。

実験手法としては、アクティブ MMI レーザを試作し、PPR 制御技術の検討を進める。素子構造として主励起領域である MMI 領域、変調領域、及び分岐導波路領域についてそれぞれ電極分離構造を導入し、それぞれ異なる電流注入量を設定できるようにする。特に各分岐導波路には、レーザ発振時の主発振波長、サブピーク波長を制御できる可能性があり、それぞれの電流量制御によって PPR ピークの制御に繋がると考えられる。後述する理論的検討とあわせ、PPR 制御に関する知見を得ていく。

実験と並行して理論的検討についても進める。これまでに PPR を導入して周波数応答広帯域化を報告する例は多くあった。一方でそのピーク強さが強すぎると、半導体レーザ直接変調にお

ける信号劣化を引き起こす可能性があり、広帯域化だけではなく、そのピーク強度と信号品質との関係を予め理論的にも検討する必要があった。そこで本検討ではピーク強度と大信号特性との関係の理論解析を進め、ピーク強度に対する知見を得ていく。そのうえで、具体的にどのようなすればそのピーク強度を調整できるのか、PPR ピーク強度調整手法についても検討を進める。

#### (2) 周波数応答評価技術の検討

周波数 100GHz 以上の高周波領域における電気信号技術そのものがまだ十分に確立されている状況ではない。このことも、光配線を後押しする要因の一つではあるが、半導体レーザを変調するためには何らかの電気信号により変調し、その特性を評価する必要がある。

そこで本研究では、高周波源として光そのものを使う手法を検討することとした。具体的には光コムを用い、離散的ではあるが高周波領域に渡る周波数成分を生成させる手法である。この手法は、同時に複数の周波数成分を生成させられる、というメリットがある。単一キャリア走行型のフォトディテクタに前記光信号を入射すれば高周波領域に渡る電気信号成分に変換することが可能で、将来的には 100GHz 超～THz 領域の高周波特性評価実現が期待できる。そこで本検討では、提案する評価手法の原理確認として、予めその周波数応答特性が明らかになっている電界吸収型変調器集積光源をターゲットとして光コムを使った周波数応答特性評価の検討を進めていく。併せて将来的に必要となる THz 領域の周波数信号発生技術についても検討を進めていく。

### 4. 研究成果

#### (1) PPR 制御技術の検討

まずは複数の PPR ピークが明確に現れるかどうか、更には CPR は 10GHz 程度であっても、複数 PPR のうち、50GHz 以上の高い周波数領域にも明瞭な PPR ピークが発現可能なかどうか、アクティブ MMI レーザを試作したうえで実験的検討を進めた[4]。図 1 に素子概要図を示す。1x3-MMI 構造を共振器内に配置することで、従来の CPR に加え、少なくとも 2 つ以上の PPR が期待できる構造とした。

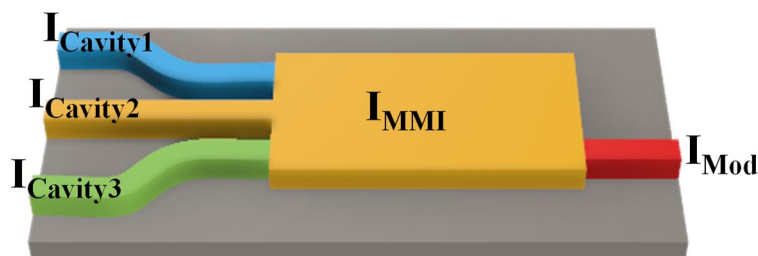


図 1. アクティブ MMI レーザ構造概要図

試作した素子の周波数応答特性評価結果を図 2 に示す。図 2 に示されるように、10GHz 付近にみられる CPR に加え、20 GHz、および 60 GHz 付近と、複数の PPR が確認された。特に 60

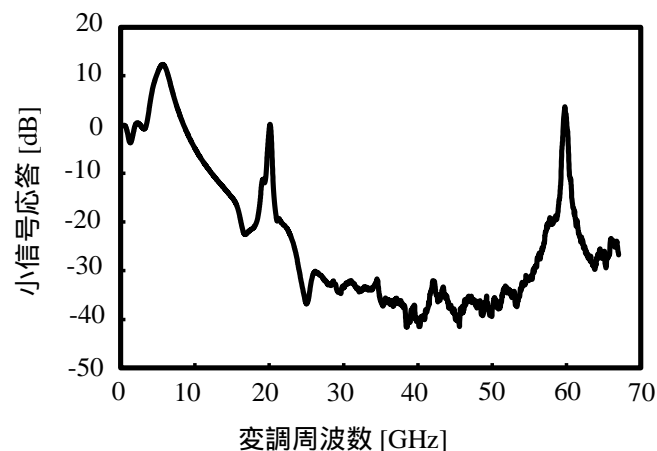


図 2. 周波数応答特性評価結果

GHz にみられる PPR ピーク強度は低周波領域と同等の高いピーク強度を実現しており、PPR

ピーク強度を何らかの制御方法で強くできる可能性があることも示唆する結果が得られた。

次に、PPR 制御について検討を行い、PPR ピーク強度と信号品質との関係を検討した。その結果、CPR より少し高い周波数位置にピークのある PPR については、そのピーク強度が高くなるほどその信号品質は改善される傾向にあることが明らかになった[5]。これは CPR の影響により信号品質が劣化する影響を改善する効果のためと考えられる。

さらに PPR ピークが電流注入量によって変化する現象も実験的に確認しており、インジェクションロッキング理論を参考に、PPR 現象を解析するための理論についても検討を行った。その結果、特に周波数については相互相関の影響によりフォトン・フォトン共振ピークが変動し得ることを確認した。相関関係を制御する手法としては、第 2 共振ピークに関係するアームへの電流制御が有効で、現実的な電流制御方法で数～数十 GHz 程度の周波数でそのピーク位置をシフトさせる可能性を理論的に見出した。さらには PPR 共振ピーク強度が、具体的に何によって制御可能なのか、理論・実験両面からな検討を進めた。その結果現時点では、主モードとサブモード間の相互作用によって影響が出ることなどが分かってきた。

次に、100GHz 超～THz オーダーの PPR 発現を可能とする半導体レーザ構造について検討した。通常の端面発光型半導体レーザの共振器長は一般的に数百  $\mu\text{m}$  程度で、キャビティ内の往復時間から発振に必要とする時間から、PPR 共振の上限はおよそ 100GHz 程度と見積もられる。短キャビティの半導体レーザ構造としては面発光レーザ、フォトニック結晶レーザ等もあるが、複数の PPR 共振を発現させる構造としては困難が伴う。そこで、本研究で検討しているアクティブ MMI レーザと同等の分岐構造を内包した短キャビティ構造として、新たにナノピクセル構造を検討した。TensorFlow を用いた深層学習を用い、1x3 合分岐回路を検討したところ、図 3 に示すように素子長として  $3\mu\text{m}$  と、通常構造の 1/100 程度に短キャビティ長が実現可能であることが分かってきた[6]。

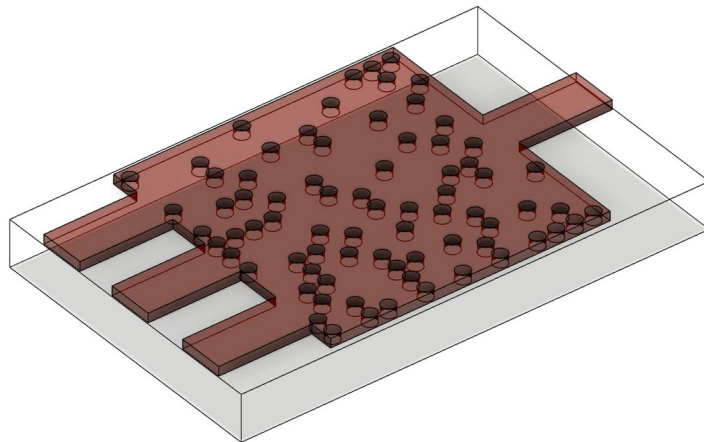


図 3. ナノピクセルによる合分岐構造

一方で、課題も明らかになってきている。現状では、多モード干渉現象の縦モードを利用して発振波長のピーク波長位置の制御、ひいては PPR 周波数制御を行っている。しかしながら電流注入条件などによって発振波長が移動することに起因し、PPR 周波数が不安定化することが分かってきた。従って周波数応答平坦化を進めるためには、波長安定化機構を設けた構造の導入も必要と考えられ、今後の検討課題としていく予定である。

## (2) 周波数応答評価に関する検討

本研究では 100GHz 超の周波数応答特性評価技術として、モードロックレーザ光を用いた評価方法「位相同期光コムスペクトルプローブ法」の導入検討を進めている。現在までに、光信号から超高周波電気信号の生成が可能と期待される UTC-PD を導入し、100GHz 超領域の周波数解析ができる評価系を構築しつつある。残念ながらコロナの状況から、電通大-九大間での実出張が実施できず、協力体制の基での実験的検証自身は未達成となったものの、ZOOM を活用した双方の連携により、評価系に関する課題の多くを改善することができた。そのうえで、電界吸収型変調器集積光源を用いた周波数応答特性評価を実施し、光コムを用いることで予想した通り周波数応答特性が評価できることを明らかにした(図 4) [7]。更には、高周波領域である THz 領域の周波数応答を確認する技術の検討を進め、ある程度の周波数範囲で応答評価できる見通しが得られた(図 5)。

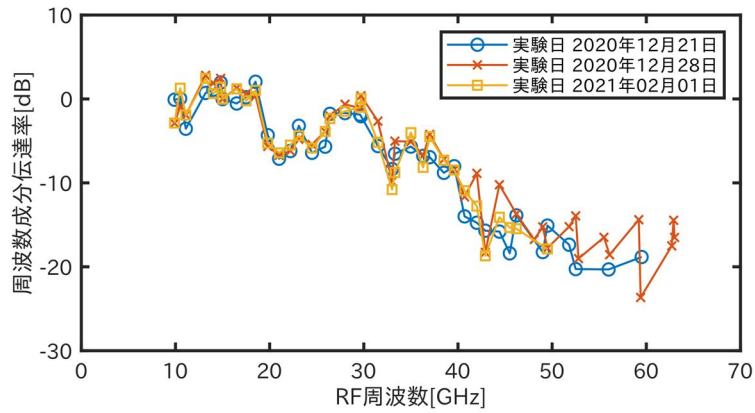
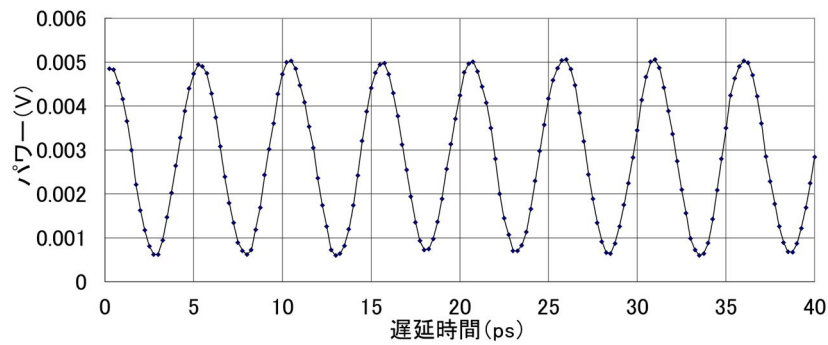
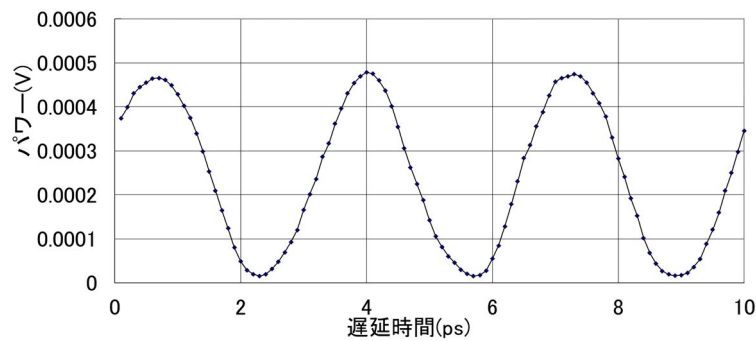


図 4. 位相同期光コムスペクトルプローブ法の原理検証結果



(a)



(b)

図 5. THz 帯自己相関波形。(a) 200GHz, (b) 300 GHz。

一方で今回の検討により、位相同期光コムスペクトルプローブ法においても課題が明らかになってきた。特に 1) 測定強度ばらつき、2) 周波数間隔、の 2 点について、今後更に改良検討を進めていきたい。

【参考文献】

- [1] L. Bach, et. al., Electron. Lett., Vol. 39, No. 22, pp. 1592-1593, 2003
- [2] X. Gu, et. al., Appl. Phys. Exp., Vol. 8, No. 8, pp. 82702-1-4, 2015
- [3] B. Hong, et. al., Tech. Dig. OFC, Th3B.4, 18th Mar 2018
- [4] S. Murakami, et. al., Tech. Dig. MOC, G4, 20th Nov. 2019
- [5] H. Xiao, et. al., Tech. Dig. MOC, PO-65, 28th Sep. 2021
- [6] K. Shoda, et. al., Tech. Dig. MOC, PO-41, 28th Sep. 2021
- [7] 王超一他、電子情報通信学会総合大会予稿集, C-3/4-13, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hong Bingzhou, Mori Tomotaka, Murakami Shingo, Jiang Haisong, Hamamoto Kiichi	4. 巻 58
2. 論文標題 A space mode selective light source with over 40 GHz direct modulation bandwidth	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJJA05 ~ SJJA05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1fd7	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 HAMAMOTO Kiichi, JIANG Haisong	4. 巻 E102.C
2. 論文標題 Mode Selective Active Multimode Interferometer Laser Diode -Mode Selection Principle, and High Speed Modulation-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 364 ~ 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.20180DI0003	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 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Keiichiro Shoda, Xiao He, Keiichiro Kozu, Haisong Jiang and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Demonstration of equal input (intensity and phase) MMI like power coupler by using nano-pixel structure
3. 学会等名 Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 He Xiao, Keiichiro Shoda, Keiichiro Kozu, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Affection analysis of frequency response with photon-photon-resonance (PPR) to directly modulated 40 Gbps signal
3. 学会等名 Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄田 啓一郎, 王 韵杰, 肖何, 高津 溪一郎, 姜 海松, 浜本 貴一
2. 発表標題 機械学習を用いたナノピクセル導波路設計の基礎検討 ( )
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 2021年

1. 発表者名 He Xiao, Keiichiro Shoda, Takaya Nagano, Jiang Haisong, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of photon-photon resonance control scheme on active-MMI laser diode
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王超一, 高橋直生, 長坂恭輔, 鈴木悠司, 姜海松, 浜本貴一, 上野芳康
2. 発表標題 毎秒100ギガビットを超える光信号変調器の周波数特性計測 を目指す広帯域光コム応用準連続計測方式の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Active-MMI laser diodes and optical mode switches - Toward high speed interconnection and flexible mode-division multiplexing network -
3. 学会等名 9th International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies (ISUPT) and the Special Symposium on Silicon Photonics of the Future (SSPhF) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Murakami, Tomotaka Mori, Bingzhou Hong, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Mode Crosstalk Improvement of Active-MMI Mode Selective Laser Diode using Slit Structure
3. 学会等名 Optoelectronics Communication Conference / Photonics in Switching and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Murakami, Bingzhou Hong, Haisong Jiang and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Observation of 60 GHz and 20 GHz Multiple Photon-Photon Resonances Using Active Multimode Interferometer Laser Diodes
3. 学会等名 Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上 槿梧, 洪 秉宙, 姜 海松, 浜本 貴一
2. 発表標題 Active MMI LDを用いた60GHzおよび20GHzのフォトン・フォトン共鳴の観測
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 2019年

1. 発表者名 長坂恭輔, 石井幸弘, 岡野謙悟, 竹下諒, 洪秉宙, 森智隆, 浜本貴一, 鈴木悠司, 上野芳康
2. 発表標題 100 ギガヘルツを超える光変調器の小信号周波数成分伝達特性を 疑似連続計測する光コム応用計測方式の開発
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 2019年



1. 発表者名 鈴木 悠司, 岡野 謙悟, 長坂 恭輔, 竹下 諒, 王 超一, 上野 芳康
2. 発表標題 市販されているシリカファイバーソリトンレーザの出力コムスペクトルの コヒーレント度(線幅)を画期的に向上する方法の提案・実証
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 2019年

1. 発表者名 鈴木 悠司, 長坂 恭輔, 王 超一, 岡野 謙悟, 上野 芳康
2. 発表標題 圧縮比2 倍程度に断熱ソリトンパルス圧縮された10 ギガヘルツパルス列の光コム スペクトルのコヒーレント度(線幅)向上方法の提案・実証
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王超一, 長坂恭輔, 鈴木悠司, 高橋直生, 竹下諒, 浜本貴一, 姜海松, 上野芳康
2. 発表標題 100 ギガヘルツを超える光変調器の小信号変調周波数成分伝達特性を 擬似連続計測する光コム応用計測方式の開発(その2)
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
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
研究 分担 者	上野 芳康	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授	
	(Ueno Yoshiyasu)		
	(00345422)	(12612)	

6. 研究組織（つづき）

	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	加藤 和利  (Kato Kazutoshi)  (10563827)	九州大学・システム情報科学研究院・教授    (17102)	

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