

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14982

研究課題名(和文) 遠隔制御型光信号処理の実現と全光ネットワークの設計方法に関する検討

研究課題名(英文) Remote Control Based All Optical Signal Processing and Design Method of Its All Optical Network

研究代表者

久野 大介 (Hisano, Daisuke)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40802088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ネットワーク全体のポンプ光源数の削減を目的とし、ポンプ光源を一部のノードに集約可能な遠隔制御型波長変換技術を提案する。コア・メトロネットワークについて計算機シミュレーションによりポンプ光が光ファイバ中を伝搬した際に発生する信号歪みが波長変換光に与える影響を解析する。AMCN について光ファイバ伝送実験によりポンプ光が光ファイバ中を伝搬した際に発生する信号歪みが波長変換光に与える影響を解析、そして、ポンプ光源数の削減率を最適化問題を解いて明らかにし、これらの結果から提案技術の実現可能性を示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コア・メトロネットワークでは、波長資源の高効率利用を目指して波長分割多重(WDM)方式が導入されているが、波長スロットのフラグメンテーションが課題となっている。効率的なデフラグメンテーションのために、全光波長変換器(AOWC)の導入が望まれているが、AOWC1台あたりに狭線幅な光源が必要となる。本研究は、このAOWCで使用するデバイス点数の削減を目的とし、まずは高価な狭線幅レーザの数を削減する手法の検討を行った。全光ネットワーク構築時のネットワーク全体の低コスト化に向けた先駆的な検討の一種であるといえる。

研究成果の概要(英文)：To reduce the number of pump light sources in all-optical networks, we propose a remotely controlled wavelength conversion technique in which the pump light sources can be concentrated in a few nodes. We analyzed the impact of signal distortion caused by pump light propagation in optical fibers on wavelength conversion by computer simulation for core-metro networks. To employ the proposed method on the access metro convergence networks (AMCNs), we conducted the fiber transmission experiments to analyze the impact of signal distortion caused by pump light propagation in optical fibers on wavelength conversion. In addition, we solved the optimization problem of the reduction ratio of the number of pump light sources.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光ファイバ通信 全光信号処理 波長変換 四光波混合

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンの普及や動画配信サービスの拡大により、インターネットトラフィックは増加の一途をたどっている。このような状況を鑑みると、トラフィックが集中する基幹系ネットワークでは、更なる大容量化が求められる。1本の光ファイバに複数の信号を独立して伝送する波長分割多重(Wavelength division multiplexing, WDM)方式は大容量化の代表的な手段である。アクセス系ネットワークでは、第五世代モバイル通信システム(5G)が2020年から順次、導入される予定であり、無線基地局とバックボーンを結び光アクセスネットワークにおいても、WDM方式の適用が検討されている。WDMネットワークでは、波長を事前に予約し、光パスを形成するため、波長資源を柔軟に使用する技術が重要である。

主要都市間を結ぶ基幹系ネットワークでは、中継ノードにおいて、光信号を電気信号に変換(光電変換と呼ぶ)し、次リンクに適した波長を選択して光信号に再変換する。中継ノードにて、光電変換を介するため、消費電力の増加が懸念されている。光電変換を介さない中継ノードの構成方法として、全光スイッチングの適用が検討されている。また、全光スイッチングネットワークにおいて、光信号のまま波長及び経路の切り替えを行うためには、全光波長変換器の適用が重要と言われている。図1(a)に波長割当の例を示す。Node#0~#3の4つのノードを結ぶWDMネットワークを考える。図中の"Reserved"は既に予約されている光パスを表す。次に、Node#0を送信元としてNode#3が宛先になる光パスの設定が要求されたとしても、一つの波長を占有しつつ、信号伝送を行う追加の光パスは存在しない。図1(b)に示すように、Node#2に波長変換器を設置した場合は、波長を切り替えることにより光パスを設定できる。しかし、全光波長変換器を用いて波長変換を行うためには、信号光に加えて、ポンプ光と呼ばれる波長変換のための制御光が必要となる。よって、全光中継ノードには、制御光用光源が必要となり、完全な受動素子のみでノードを構成する技術に関しては、今まで報告されていなかった。

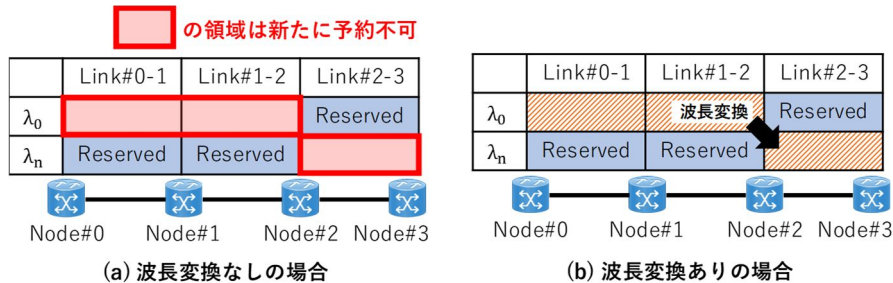


図1 光スイッチングネットワークにおける波長割当

2. 研究の目的

本研究では、遠隔制御光を用いた全光信号処理ノードの実現及び検討したノードの配置設計方法の確立を目的とする。図2に従来の中継ノードの構成例を示す。1.1.2節で論じたように、各中継ノードでは、全光波長変換用の制御光用光源(Laser Diode, LD)が必要となる。本研究では、図3(a)に示すように、一部のノードに制御光用光源を集約配置する。これにより、図3(b)のように制御光用光源が配置されたノードと配置されていないノードが混在する。波長変換を行う必要があると判断された場合には、図4(b)のように制御光を対象中継ノードまで伝送することで、全光波長変換を行う。これにより、ネットワーク内における光源数の削減に繋がり、中継ノードの低消費電力化及び簡素化を実現することが可能となる。

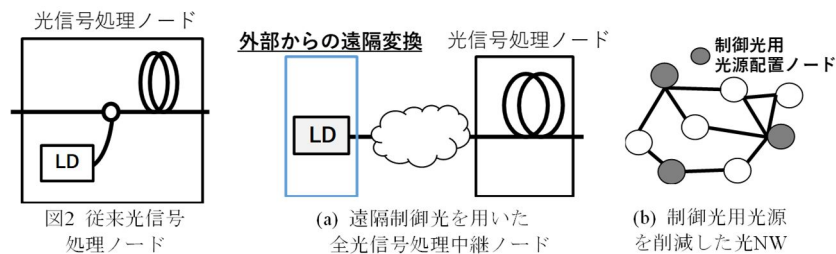


図3 本研究で検討する遠隔制御型光信号処理機構

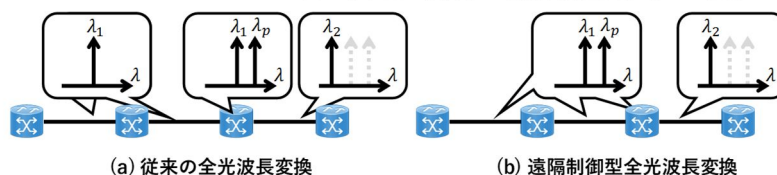


図4 遠隔制御型全光波長変換時の動作

3. 研究の方法

波長変換に用いるポンプ光には、20dBm 近くの入力電力(信号光の100倍以上)が必要となる。よって、全光波長変換を行う中継ノードと遠隔制御光を送信するノード間の光ファイバの特性によって、遠隔制御光は、波長分散や非線形光学効果の影響を受け、信号歪みが生じる。よって、計算機シミュレーション及び実験によって、遠隔制御光の信号歪みによる波長変換光への影響について解析を行う。具体的には、波長変換前の信号光の変調フォーマット、波長、及び遠隔制御光の信号歪みによって、制限される伝送距離・ビットエラーレート(BER)特性を明らかにする。更に信号光、遠隔制御光へ送信時及び受信時に信号処理を施すことによって、伝送距離の延伸、BER特性の改善を図る方法を検討する。

上記で、伝送距離・BER特性が判明した後、全光ネットワークにおける遠隔制御光用光源を搭載した中継ノードの配置設計の検討を行う。光源が配置された中継ノード数を最小化しつつ、従来検討されてきた波長の柔軟な選択性を損なわないよう設計を施す必要がある。解析方法は計算機シミュレーションを予定している。

4. 研究成果

本研究は、大きく分けて2つのネットワークを対象として実施された。一つ目は、コア・メトロネットワークを対象とした計算機シミュレーション解析、二つ目は、アクセス・メトロ融合ネットワークへの本研究の適用である。

(1) コア・メトロネットワークへの遠隔制御型波長変換器の適用

リモートポンプ型全光波長変換器(RP-AOWC)において、ポンプ光の伝送による歪みが波長変換の性能を低下させる原因になる。よって、性能低下の主要因を解明し、その影響を調査した。リモートポンプ光が歪む主要因として挙げられるのは、SPMによる線幅広がり、光増幅器において発生するASE雑音、信号光-ポンプ光間の非線形光学効果および偏波間干渉である。変調信号を送受する通信システムの通信路として、非線形シュレディンガー方程式を計算機で解くことで得られる光ファイバ通信路モデルを仮定し、これらをシミュレーション解析した。なお、に関しては、単一ポンプ光伝送時にほとんど影響を与えなかったため、ここでは割愛する。

光増幅器において発生するASE雑音
光増幅器で加わるASE雑音はポンプ光劣化の要因である。本研究では、ASE雑音は加法性白色ガウス雑音として扱った。評価指標には光信号電力対雑音電力比(OSNR)を用いた。計算機シミュレーションでは、ポンプ光のOSNRが14.5 dB以上の場合に、BERが、7%オーバーヘッドの硬判定前方誤り訂正(Hard-Decision Forward Error Correction: HD-FEC)の閾値を下回るため、信号はエラーフリー動作可能であるとわかった。図5は、中継伝送系における光増幅器の台数に対するASE雑音量とポンプ光のOSNRの関係である。各光増幅器は、利得が21 dBとなるように設定した。これはSSMF伝送時に80 km間隔で光増幅を行い、そのたびに5 dBのマーゲンを取っている。入射時の電力が-5 dB程度で10回の増幅が可能であるため、コア・メトロネットワークの代表距離である300km程度のポンプ光伝送は、波長変換光の受信可能性には影響しないと言える。

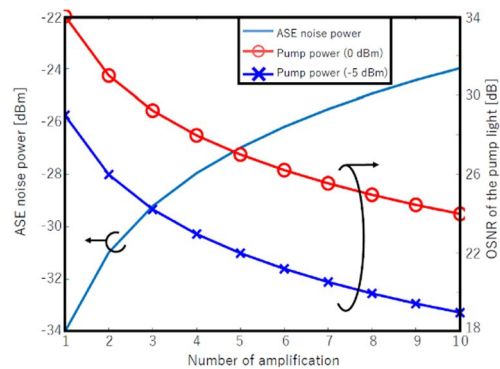


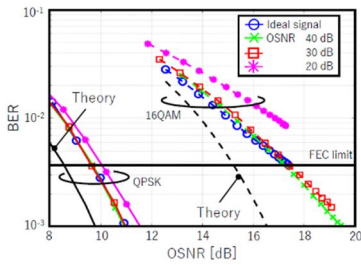
図5 光増幅器の台数に対する

(左)ASE雑音量、(右)ポンプ光のOSNR。

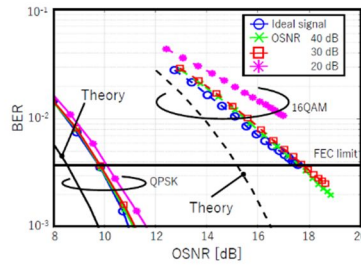
©電子情報通信学会

信号光-ポンプ光間の非線形光学効果および偏波間干渉

偏波多重伝送時の非線形光学効果および偏波間干渉について考える。ポンプ光について、偏波状態によって信号に与える影響が変わるかを調べるために、偏波多重された信号に対して、片偏波と偏波多重のポンプ光を波長多重した場合の伝送についてそれぞれシミュレーションを実施した。図6に波長変換光のBERを示す。図6(a)が片偏波ポンプ光について、図6(b)が偏波多重ポンプ光についての結果である。理論値を基準とすると、QPSKについては約1 dB程度の、16QAMについては初期OSNRが30 dB以上のときに2.3 dB程度のOSNRペナルティが確認された。ポンプ光の片偏波伝送、偏波多重伝送については、ほぼ変わらない結果が得られた。図7に信号のBERを示す。ポンプ光の有無および偏波状態によって結果が変わらないため、QPSK、16QAMどちらを用いても、ポンプ光は信号に影響を与えないと言える。



(a) 片偏波ポンプ光.



(b) 偏波多重ポンプ光.

図 6 偏波多重信号における波長変換光の BER .
©電子情報通信学会

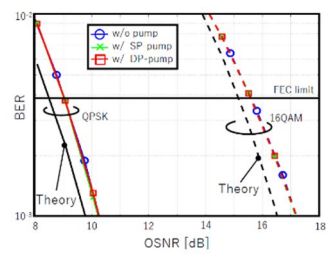


図 7 偏波多重信号の BER .

(2) アクセス・メトロ融合ネットワークへの遠隔制御型波長変換器の適用

アクセス・メトロ融合ネットワーク (AMCN) では異なる波長を持つ送受信器が大量に必要であるため、コスト増加が懸念される。本稿では、RP-AOWC の適用を提案し、受動光ネットワーク (PON) システムで利用する通信帯域の共通化による異なる波長を持つ送受信器数の削減を目指す。提案手法により構成された AMCN を図 7 に示す。本提案では、ポンプ光源は OLT のあるノードに集約して配備される。AOWC の配備によって、各アクセスネットワークで同一波長を用いても、中継ノードで波長変換が可能なので、信号衝突を回避できる。よって、ONU に必要な送受信器の種類を減らし、少ない種類の送受信器の量産化が期待できるため、コストメリットが増加する。また、RP-AOWC を用いると、AOWC の導入コストも削減される。本提案における課題は、ポンプ光の光ファイバ伝送による波長変換の品質低下と光源削減効果の程度である。本研究では、まず、光源削減効果を見積もった。そして、原理確認実験によって、光ファイバ伝送が波長変換に与える影響を明らかにした。

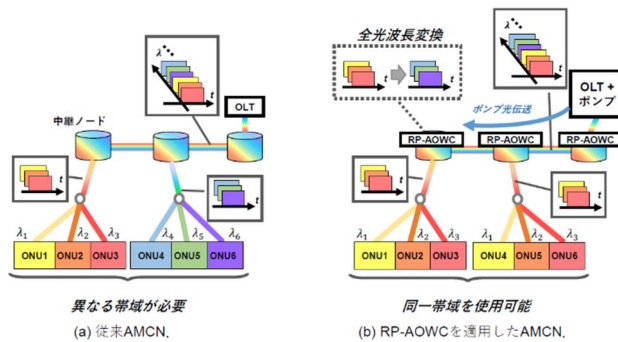


図 7 AMCN の構成 ©電子情報通信学会

光源削減効果

ONU に必要な異なる波長をもつ送受信器 (以下、異波長送受信器と呼ぶ) の数を、従来の AMCN と AOWC を適用した AMCN についてそれぞれ計算した。ここで、異波長送受信器数は AOWC, RP-AOWC を適用した場合で差がないため、AOWC についてのみ考える。まず、従来の AMCN について、異波長送受信器数は $N_a \times N_d$ である。ここで、 N_a は各 PON システムにおける ONU の最大収容数、 N_d はメトロネットワークの中継ノード数である。OLT に接続する各 ONU はそれぞれ別の波長を必要とするため、メトロネットワークが拡張し、中継ノード数が増えたとその分だけ異波長送受信器数も増加する。AOWC を適用した AMCN では、中継ノードで信号への波長の再割り当てが可能なので、各中継ノード下の PON システムでは共通の波長を利用できる。このため、必要な異波長送受信器数は N_a となる。これらの結果から、AOWC は、異波長送受信器数の削減に効果があるとわかった。

次に、ポンプ光源数の削減効果を計算する。AMCN 内の中継ノード数が与えられた時のポンプ光源数を最小化するような最適化問題を設定する。本稿では結果のみ示す。内容は、掲載された雑誌論文を参照されたい。結果として、削減率は 75% であることがわかった。この結果より、RP-AOWC による光源削減効果は AMCN に対して有効であると言える。

原理確認実験

図 8 に実験の構成を示す。(a)は Back-to-back 伝送、(b)は 1 段波長変換、(c)が 2 段波長変換である。波長変換については、ポンプ光の SSMF 伝送の有無で 2 パターンの実験を行った。また、1 段変換は 2 パターンの波長配置で実施し、この配置は 2 段変換の際に行われる波長変換と同じ配置である。

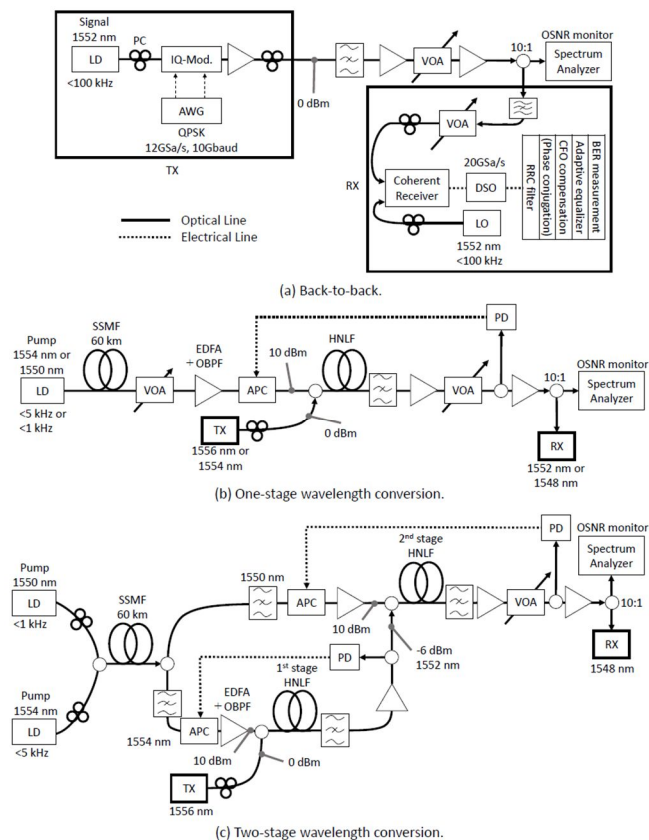


図 8 波長変換実験の構成 © IEEE .

1556nm から 1552nm への変換光の BER を図 9(a) , 1552nm から 1548nm への変換光の BER を図 9(b) , 2 段階変換による変換光の BER を図 9(c) に示す . 全結果について最小二乗法による直線近似を行っている . 黒破線が Back-to-back , 赤点線が通常 AOWC , 青線が RP-AOWC の結果であり , 丸が実測値となる . 黒線を基準とすると , HD-FEC での閾値 BER= 3.8×10^{-3} において , OSNR ペナルティが 0.5 dB 以下であるとわかった . 提案手法の適用によって , 生じている OSNR ペナルティは , 光ファイバ伝搬中に生じる偏波の揺らぎに起因している . 今回のポンプ光伝送では , ポンプ光として CW 光のみを伝送したため , 波長分散や非線形光学効果に起因する伝送歪みはほとんど存在しない . 偏波変動の抑圧には APC が有効だが , 波長変換光の信号電力をフィードバックして偏波調整を行うため , 調整の時間遅れが発生し , 結果が揺らぐ . しかし , APC の導入により 0.5 dB の僅かな OSNR ペナルティの許容により , 提案手法が導入できることが判明した .

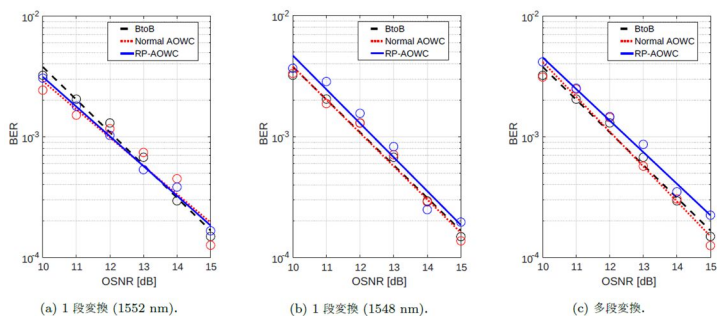


図 9 波長変換光の BER © IEEE .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

1. 著者名 TSUJI Ryota, HISANO Daisuke, MISHINA Ken, MARUTA Akihiro	4. 巻 E103.B
2. 論文標題 Remote Pumped All Optical Wavelength Converter for Metro-Core Photonic Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1282 ~ 1290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.20190BP0016	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 Tsuji Ryota, Hisano Daisuke, Takano Hiroki, Nakayama Yu, Mishina Ken, Maruta Akihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Remotely Pumped All-Optical Wavelength Conversion for WDM-PON-Based Access-Metro Convergence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOT.2021.3071881	査読の有無 無
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 Shibita Sho, Hisano Daisuke, Maruta Kazuki, Nakayama Yu, Mishina Ken, Maruta Akihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Optical Reflection Interference Equalization for Single-Wavelength Bidirectional WDM-PON Transmission System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOT.2020.3045049	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takano Hiroki, Hisano Daisuke, Mishina Ken, Maruta Akihiro
2. 発表標題 AMCC Superimposed All-Optical Wavelength Converter for Access-Metro Convergence Network
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Tsuji, Daisuke Hisano, Yu Nakayama, Ken Mishina, Akihiro Maruta
2. 発表標題 Remote-Pumped All-Optical Wavelength Conversion for WDM-PON-based Access-Metro Convergence
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻涼太, 久野大介, 三科健, 丸田章博
2. 発表標題 メトロアクセス融合型ネットワークにおける遠隔制御型全光波長変換器の実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信方式研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Hisano, Kazuki Maruta, Yu Nakayama
2. 発表標題 Low Cost C-RAN and Fronthaul Design with WDM-PON and Multi-hopping Wireless Link
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Tsuji, Daisuke Hisano, Ken Mishina, Akihiro Maruta
2. 発表標題 Analysis of Wavelength Converted Signal 's Degradation Induced by Remote Pump Light
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2019 (OECC/PSC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久野大介, 紫尾田将, 三科健, 丸田一輝, 中山悠, 丸田章博
2. 発表標題 波長スワップ方式を適用した一波長双方向WDM-PONにおける冗長化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会通信方式研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高野宏紀, 久野大介, 三科健, 丸田章博
2. 発表標題 光メトロ・アクセス統合型ネットワーク実現へ向けた低周波制御信号重畳型全光波長変換器の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
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

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