

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14733

研究課題名（和文）次世代大容量光ネットワークのための多波長一括型全光波長変換器の研究

研究課題名（英文）Study on all-optical simultaneous wavelength converter for next generation photonic network

研究代表者

三科 健（Mishina, Ken）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90466368

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：従来のC帯の光送受信器を用いてS帯やL帯の光信号を生成する技術として、波長分割多重された光信号を光のまま一括して波長変換する技術の研究開発が行われている。全光波長変換技術は高非線形ファイバを用いた手法が提案・実証されているが、小型化・集積化が困難な点が課題である。近年、光集積化が可能で、従来の窒化シリコン導波路よりも高い非線形性を有するシリコンリッチ窒化シリコン（SRN）導波路の試作例が報告されている。本研究では、SRN導波路のモード解析および設計を行い、SRN導波路を用いた64チャンネル×64 Gb/s QPSK信号の全光波長変換の検討を、計算機シミュレーションにより行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第五世代移動通信システム（5G）よりも更に高度なアプリケーションの導入を目指したBeyond 5Gや6Gにおいて、光通信ネットワークのさらなる大容量化・低消費電力化・低遅延化が求められる。従来のエレクトロニクス（電子）ベースの技術をフォトニクス（光）ベースの技術に置き換えることにより、大幅な低消費電力化・低遅延化が期待される。さらに、多チャンネル一括光信号処理を実現できれば、少ないデバイス数で高効率な処理が可能となる。

研究成果の概要（英文）：The triple-band (S+C+L) transmission system using only C-band transceivers and all-optical wavelength conversions (AOWCs) without S- and L-bands optical transceivers has been reported. Although the AOWC employs highly nonlinear fibers, it is not applicable to photonic integrated circuits (PICs). For a device of successful wavelength conversion, a silicon-rich nitride (SRN) waveguide provides superior performance, as it is applicable to PIC and permits a high Kerr nonlinearity compared with conventional stoichiometric silicon nitride waveguide. In this study, we design the SRN-waveguide for AOWC and demonstrate the successful operation of AOWC of 64-channel × 64-Gb/s QPSK signals between the C+L bands and the S-band by numerical simulations.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：全光信号処理 波長変換 シリコンフォトニクス

## 1. 研究開始当初の背景

超高精細映像(8K)や第五世代無線通信(5G)等の普及に伴い、今後もインターネットトラヒックは増加し続けると予想され、トラヒックが集中する基幹系ネットワークには更なる大容量化が求められている。現在、主要都市間を結ぶ基幹系ネットワークでは、異なる波長の光信号を束ねて一つの光ファイバで伝送する波長分割多重(WDM)技術により、光ネットワーク内の多地点間を大容量かつ低遅延で接続している。

光ネットワーク内の多地点間を接続する場合、同じ波長を含む光信号を同じ光ファイバで伝送することができないため、衝突を回避して柔軟に光パスを割り当てるには、光中継ノードにおいて波長変換技術が必要となる。波長変換技術は、光信号を一旦電気信号に変換する方法や、1波長ずつ光信号を別の波長の光信号に変換する方法が以前から提案されていたが、従来技術では処理遅延や消費電力の増大という課題があった。それらの課題を解決する手段として多波長一括型全光波長変換器が有望な技術と期待されており、試作・導入が検討されている。

多波長一括型全光波長変換は、非線形媒質中の四光波混合(Four Wave Mixing: FWM)を用いて実現することができる。現在は高非線形光ファイバ(Highly Nonlinear Fiber: HNLF)を非線形媒質として用いた手法の実用化が検討されているが、HNLFは数百mの長さを必要とするため集積化が困難であり、変換器のサイズは光ノードのラック一段程度となる。一方、更なる大容量化を狙う次世代光ネットワークには、マルチコアファイバ等の空間分割多重技術の導入が検討されている。将来、空間チャンネル数の増加に合わせて複数の波長変換器を搭載することが必要となるが、波長変換器が低コスト集積化できなければ、その設置数が制限され、波長パス設定の柔軟性が損なわれる状況となる。今後、空間分割多重を利用した次世代光ネットワークに対応するためには、低コスト光集積型全光波長変換器が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、シリコンリッチ窒化シリコン(SiN)導波路を用いた低コスト光集積可能な多波長一括型波長変換技術の確立を目的とする。集積化可能な非線形媒質としては、 $\pi$ -族化合物半導体や周期分極反転光学素子があるが、製造プロセスが複雑で高コストとなることが課題である。近年はCMOS半導体プラットフォームを用いて大面積・低コストの光集積回路を製作するシリコンフォトニクスが有望視されており、シリコン(Si)導波路やSiN導波路が光通信用デバイス材料として注目を浴びている。Si導波路を用いた波長変換は既に提案されているが、通信波長帯では二光子吸収が発生するため、励起光のパワー制限により波長変換効率が低下する。一方、SiN導波路は非線形係数が小さいため、高パワーの励起光を供給しても波長変換効率が上がらず、実用的な波長変換器の実現が難しい。そこで、本研究ではシリコン濃度を高くしたSiリッチSiN(Silicon-Rich Nitride: SRN)導波路を用いることを提案し、高い変換効率を有する波長変換器の実現を目指す。SRNを用いることで、従来のSiNよりも高い非線形係数を実現することができ、かつ、Siよりも広い一定のバンドギャップを維持することにより通信波長帯の二光子吸収を抑制することができる。SRN導波路は光通信デバイス向け新材料としての試作・特性評価の研究は盛んに行われているが、光通信システムへの応用検討例は少なく、多波長一括型波長変換器に応用した研究例は未だ報告されていない。

提案する多波長一括型波長変換器が実現できれば、ワイドバンド通信システムへの展開も期待できることが本研究テーマの興味深いところである。波長変換器の広帯域動作が確認できれば、Cバンド(1530~1565nm)の光信号からSバンド(1460~1530nm)やLバンド(1565~1625nm)の光信号を生成することができる。既存のCバンド送受信機と波長変換器を組合せることで、SバンドやLバンド向けの送受信機を開発することなくワイドバンドな通信システムを構成することができる。本研究では、これらのCバンドからSバンドへの波長変換の応用可能性についても検討する。

## 3. 研究の方法

SRN導波路を用いた多波長一括型波長変換器の実現に向けて、本研究では主に以下の(1)、(2)の研究項目を実施した。

#### (1) 多波長一括型波長変換器向け SiN 導波路の設計

SiN 導波路の非線形係数は、導波路の有効断面積や材料の屈折率、組成比、密度等によって決まる。一方、分散特性は導波路の形状、サイズ、屈折率分布によって決まる。ポイント・マッチング法を用いた導波路シミュレーションを構築し、SRN 導波路特性（群速度分散、および、非線形パラメータ）の調査を行った。そして、多波長一括型波長変換器に適した SiN 導波路の設計を行った。

#### (2) WDM 信号の波長変換シミュレーション

非線形シュレディンガー方程式を用いて SiN 導波路中の光伝搬を計算し、SiN 導波路の波長変換動作シミュレーションを行う。具体的には、基幹系ネットワークで用いられる QPSK 方式の光信号を用いて波長変換動作を確認し、波長変換後の信号の BER 特性を評価した。また、SiN 導波路パラメータ（非線形係数、分散特性等）と波長変換特性（変換可能な波長範囲、波長変換出力）の関係を明らかにした。

### 4. 研究成果

#### 【研究の主な成果】

#### (1) 多波長一括型波長変換器向け SiN 導波路の設計

##### (1)-1 波長変換動作

波長変換には SRN 導波路中の縮退 FWM を用いる。図 1 に波長変換の概要を示す。SRN 導波路に周波数  $\omega_s$  の信号光と周波数  $\omega_p$  のポンプ光を入射すると、SRN 導波路出力で周波数  $\omega_i (= 2\omega_p - \omega_s)$  のアイドラー光が得られる。アイドラー光は信号光の位相共役光となり、波長変換された信号とみなせる。高い波長変換出力電力（アイドラー光出力電力）を得るためには、非線形係数  $\gamma$  を大きくする必要がある。また、広帯域に亘ってアイドラー光出力電力を得るためには、位相整合条件を満たす必要があり、群速度分散（Group Velocity Dispersion: GVD） $\beta_2$  および三次分散（Third Order Dispersion: TOD） $\beta_3$  を零に近づける必要がある。

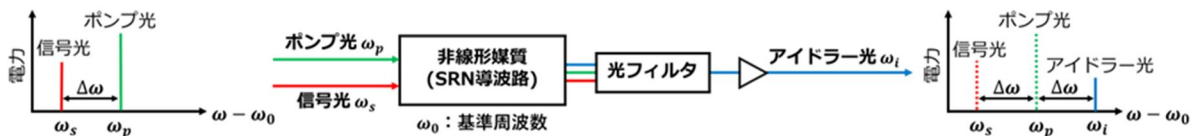


図 1：全光波長変換の概要

##### (1)-2 導波路構成とモード解析

本研究では、SRN のコアと二酸化シリコン（SiO<sub>2</sub>）のクラッドからなる埋め込み型の方形光導波路を考える。SRN の組成比は Si<sub>7</sub>N<sub>3</sub> とし、アモルファスシリコンと化学量論的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の比率が 19 : 21 の非晶質化合物と仮定して Sellmeier 方程式により屈折率を算出した。このとき、波長 1530 nm における SRN の屈折率は 2.70 となった。また、クラッドの屈折率は 1.44 とした。

全光波長変換に適した導波路サイズを設計するために、SRN 導波路のモード解析を行った。導波路のモード分布は、ポイント・マッチング法を用いて解析した。本解析法では、伝搬方向を  $z$  軸方向、導波路断面を  $r-\theta$  平面として、各領域の点  $(r, \theta)$  における  $z$  軸方向の電磁界成分を、ベッセル関数または第 2 種変形ベッセル関数の線形結合で表す。そして、コアとクラッドの境界上に有限個の整合点（マッチング・ポイント）を取り、少なくともこれらの点において境界条件を満たすように電磁界の展開係数を決定することで、近似的に電磁界問題を解く。SRN の Kerr 線形屈折率  $n_2$  は  $2.8 \times 10^{-13}$  cm<sup>2</sup>/W として、実効断面積  $A_{eff}$  および非線形係数を計算した。

図 2 に波長 1530 nm における TE<sub>00</sub> モードにおける GVD パラメータ  $\beta_2$ 、THD パラメータ  $\beta_3$ 、および非線形係数  $\gamma$  の計算結果を示す。本研究では、偏波無依存特性を得るために、アスペクト比 1 : 1 を考える。コア幅  $w = 0.51$  mm のとき  $\beta_2$  が 0 に近く、 $\gamma = 435$  W<sup>-1</sup>/m という大きな非線形係数が得られた。 $w = 1.14$  mm においても  $\beta_2 = 0$  となるが、 $\gamma = 154$  W<sup>-1</sup>/m となり、波長変換効率が悪化する。そのため、本研究では、全光波長変換のシミュレーションにコアサイズ 0.51 mm × 0.51 mm の SRN 導波路を用いた。また、伝搬損失を 4.5 dB/cm とし、これらの条件に対して最大出力が得られるように導波路長を 1.1 cm とした。また、端面当たりの結合損失を 7 dB とした。

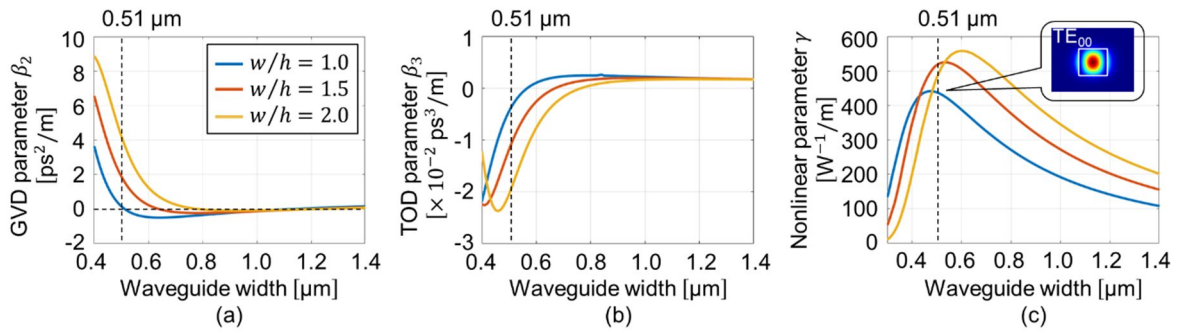


図 2: TE<sub>00</sub> モードにおける(a) GVD パラメータ  $\beta_2$ 、(b) TOD パラメータ  $\beta_3$ 、(c) 非線形係数  $\gamma$

## (2) WDM 信号の波長変換シミュレーション

計算機シミュレーションにより SRN 導波路を用いた全光波長変換器の広帯域伝送システムへの適用可能性を調査した。32768 シンボルのランダムビット列を用いて 1~128 チャンネル×32 GBaud QPSK 信号を生成した。QPSK 信号は、C 帯および L 帯に亘る波長範囲、波長間隔 37.5 GHz で 1~128 チャンネルの波長多重を行った。ポンプ光は波長 1530 nm、入力光電力 17 dBm に設定し、光源は全光波長変換器内に組み込んで SRN 導波路に入射することを想定した。SRN 導波路中の電界の複素包絡線振幅は非線形シュレディンガー方程式に従うと仮定し、スプリット・ステップ・フーリエ法を用いて出力光電界を計算した。WDM 信号は全光波長変換器で C+L 帯から S 帯に変換し、導波路出力において光バンドパスフィルタを用いて波長変換された信号光を取り出した後、雑音指数 (Noise Figure: NF) 8 dB の光増幅器を用いて増幅した。そして、波長変換された信号光を受信し、光コヒーレント受信器で復調処理を行い、変換性能の評価を行った。

まず、単一チャンネル QPSK 信号に対して波長変換光出力電力の波長依存性を計算した。次に 1 段目の全光波長変換において波長変換可能な WDM チャンネル数を調査した。次に、実システムへの適用を模擬し、シングルモードファイバ (Single Mode Fiber: SMF) を 100 km 伝送、および、2 段目の全光波長変換 (S 帯から C+L 帯への逆変換) を挿入し、2 段波長変換後の QPSK 信号の BER を測定した。

図 3 に、単一チャンネル QPSK 信号の 1 段全光波長変換後におけるアイドラー光出力電力の波長依存性を示す。QPSK 信号光の入力光電力を 0 dBm とし、波長を 1530~1565 nm の範囲で変化させた。 $\beta_2 = \pm 0.4 \text{ ps}^2/\text{m}$  のとき、ポンプ光と信号光の波長差が大きくなるにつれてアイドラー光の出力電力が大きく減少する結果となった。一方、 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{m}$  のとき、アイドラー光出力電力の波長依存性が非常に小さくなり、平坦な特性が得られた。 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{m}$  となるコアサイズの条件は 2 つあるが、非線形係数の違いから出力光電力に差が生じている。 $w = 0.51 \text{ }\mu\text{m}$  のとき -35.9 dBm の平坦な出力光電力特性が得られ、バンド間の広帯域波長変換動作が可能であると考えられる。

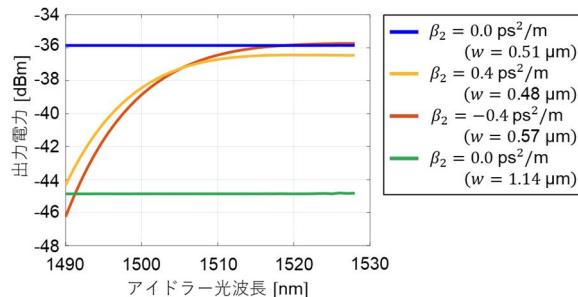


図 3: アイドラー光出力電力の波長依存性

図 4 に WDM チャンネル数および入力信号光電力を変化させながら、波長変換後 (光増幅後) の WDM 信号のエラーベクトル振幅 (Error Vector Magnitude: EVM) を計算した結果を示す。入力信号光電力が 9 dBm/ch のとき、WDM チャンネル間の FWM により、WDM チャンネル数の増加に伴い EVM が増大した。入力信号光電力が -3 dBm/ch のとき、光増幅器において増幅された自然放光の影響により、単一チャンネル動作でも EVM が増大した。64 チャンネル動作のとき、

最適な入力信号光電力は 3 dBm/ch となり、平均 EVM は 16.7 % となった。128 チャンネル動作では、上述の干渉により信号品質が著しく低下した。以上の結果より、導波路サイズおよび入力信号光電力を適切に設定することで、SRN 導波路を用いた 64 チャンネル一括波長変換が可能であるとと言える。

図 5 に 100 km の SMF 伝送と 2 段 AOWC を挿入したときの BER 特性を示す。SRN 導波路への入力信号光電力は 3 dBm/ch、SMF への入力信号光電力は -9 dBm/ch、WDM チャンネル数は 64 とした。1 段変換後の WDM 信号は、SMF を 50 km 伝送後に -9 dBm/ch、100 km 伝送後に 3 dBm/ch に光増幅した。伝送後の WDM 信号には理想的な分散補償を施した。図 5 より、SMF 伝送により BER 特性が悪化することがわかる。この伝送前後の BER 特性の差は、伝送による劣化が主要因ではなく、2 段全光波長変換と組み合わせることが影響していると考えられる。伝送がない場合、1 段全光波長変換後の WDM 信号は位相共役光となり、位相共役光をそのまま 2 段目の全光波長変換に通すことにより、SRN 導波路中で生じる線形歪みおよび非線形歪みが補償される。一方、2 つの全光波長変換の間に SMF 伝送が入ることにより波形が変化し、SRN 導波路中の歪みを補償する効果が薄れ、BER 特性の差に繋がると考える。オーバーヘッド 7% の硬判定前方誤り訂正 (Forward Error Correction: FEC) 符号の使用を想定したとき、2 段全光波長変換による光信号対雑音比 (Optical Signal-to-Noise Ratio: OSNR) ペナルティは 1.4 dB 以下、SMF 伝送も含めると 3.8 dB 以下となった。

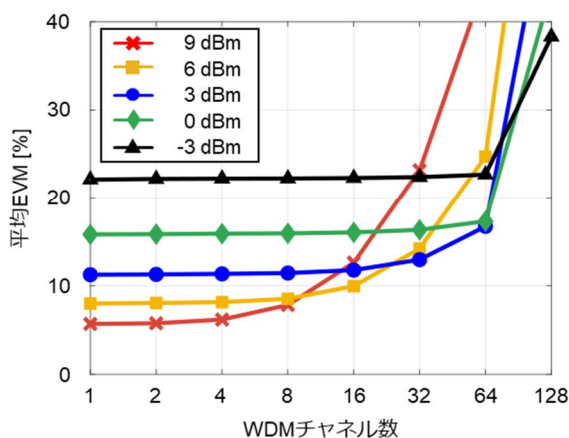


図 4 : 1 段 全光波長変換 後の EVM 特性

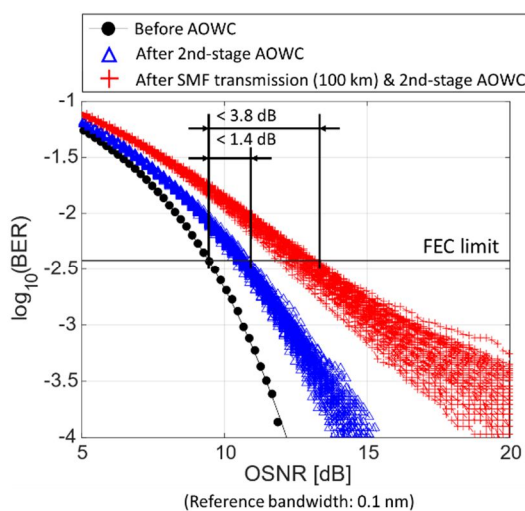


図 5 : 2 段 全光波長変換 後の BER 特性

### (3) まとめ

SRN 導波路を用いた多波長一括型波長変換器の特性を計算機シミュレーションにより調査し、マルチバンド伝送システムへの適用可能性を示した。まず、コアサイズが  $0.51 \mu\text{m} \times 0.51 \mu\text{m}$  の SRN 導波路に、入力光電力 0 dBm の単一チャンネル QPSK 信号を入射して 1 段波長変換を行い、 $-35.9 \text{ dBm}$  の平坦な出力光電力特性が得られることを示した。そして、入力信号光電力を適切に設定することにより、64 チャンネル  $\times$  64 Gb/s QPSK 信号の波長変換が可能であることを示した。最後に BER 特性を評価し、2 段波長変換による OSNR ペナルティが 1.4 dB 以下、100 km の SMF 伝送を含めた OSNR ペナルティが 3.8 dB 以下となることを示した。

### 【国内外での成果の位置づけ・インパクト】

近年、光集積可能な波長変換器として Si 導波路や周期的分極反転二オプ酸リチウムを用いた研究が報告されている。それらの技術と比較して、本研究で提案した SRN 導波路を用いた変換器は、2 光子吸収を回避して柔軟な設計や運用が可能となり、また、低コストで生産できる点で優位となる。将来の大容量、低遅延、かつ、柔軟な光通信ネットワークを実現するための要素技術として貢献することが期待される。また、SRN 導波路の有用性を示すことにより、様々なアプリケーションへの応用研究を誘起することが期待される。

### 【今後の展望】

光通信の分野ではシミュレーションだけでなく実験により実現可能性を示すことが重要となる。今後、後継の研究プロジェクトにて、多波長一括型波長変換デバイス試作し、高速変調信号を用いた実証実験を行う予定である。

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 2件）

1. 著者名 Asahi Sueyoshi, Ken Mishina, Daisuke Hisano, and Akihiro Maruta	4. 巻 11
2. 論文標題 Multi-stage adaptive equalization for all-optical-aggregated 16QAM signal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 183-188
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0013	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 Ishihara Yuki, Roy Mrinmoy, Pineda Carlos Alfredo Ruiz, Maruta Akihiro, Mishina Ken	4. 巻 14
2. 論文標題 Wideband Simultaneous Wavelength Conversion of Multiple WDM Channels Using Silicon-Rich Nitride Waveguide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2022.3225084	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Mrinmoy Roy, Ken Mishina, and Akihiro Maruta
2. 発表標題 Simultaneous Wavelength Conversion of Multiple WDM channels Using Silicon-rich Nitride Waveguide
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原勇輝, 三科健, 丸田章博,
2. 発表標題 SiリッチSiN導波路を用いた多波長一括波長変換の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告（光通信システム研究会）, vol. 121, no. 375, OCS2021-44, pp. 15-20
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石原勇輝, 末吉旭, 三科健, 丸田章博
2. 発表標題 SiリッチSiN導波路を用いた広帯域波長変換器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-22
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原侑斗, 末吉旭, 三科健, 丸田章博
2. 発表標題 Si リッチSiN導波路を用いた全光変調フォーマット変換の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, B-10-38
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mrinmoy Roy, Ken Mishina, and Akihiro Maruta
2. 発表標題 Simultaneous Wavelength Conversion of Multiple WDM channels Using Silicon-rich Nitride Waveguide
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLE02021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Fujihara, K. Mishina, A. Sueyoshi, A. R. Paula, and A. Maruta
2. 発表標題 All-optical PAM4 to QPSK and 16QAM Conversions Using Si-rich SiN Waveguides
3. 学会等名 The 27th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2022 (OECC/PSC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Sueyoshi, K. Mishina, D. Hisano, and A. Maruta
2. 発表標題 Flexible Data Center Interconnect Based on Optical Aggregation and Electrical Disaggregation
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原侑斗, 三科健, 末吉旭, 丸田章博
2. 発表標題 シリコンリッチ窒化シリコン導波路を用いた全光PAM4/QPSK変換およびPAM4/16QAM変換
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 (光通信システム研究会), vol. 122, no. 245, OCS2022-48, pp. 46-51
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石原勇輝, 丸田章博, 三科健
2. 発表標題 SiリッチSiN導波路の広帯域多波長一括波長変換器への適用可能性の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 (フォトニックネットワーク研究会), vol. 122, no. 398, PN2022-53, pp. 56-61
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪大学 研究者総覧  <a href="https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/d27126dd1c5f9888.html?k=%E4%B8%89%E7%A7%91">https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/d27126dd1c5f9888.html?k=%E4%B8%89%E7%A7%91</a>          大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻 フォトニックネットワーク工学領域ホームページ  <a href="http://wwwpn.comm.eng.osaka-u.ac.jp/home/index.php/list/">http://wwwpn.comm.eng.osaka-u.ac.jp/home/index.php/list/</a>          三科健ホームページ  <a href="https://sites.google.com/view/kenmishina/publication">https://sites.google.com/view/kenmishina/publication</a></p>
--



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