

# 低遅延・省電力な次世代光ネットワークのための光集積型全光信号処理デバイスの研究

## Study on photonic-integrated devices for all-optical signal processing to realize future low-latency and power-efficient photonic networks

大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻 准教授 三科 健  
Department of Information and Communication Technology, Osaka University Ken Mishina

### 要旨

将来、第五世代移動通信システム (5G) や 6G の特長を生かしたサービスを提供するためには、有線区間である光ネットワークのさらなる低遅延化・省電力化が求められる。本研究の目的は、光通信ネットワークの光ノードにおける遅延を低減するための要素技術の一つとして、光ノードの変調フォーマット変換処理を光のまま実現する技術の確立することである。また、全光変調フォーマット変換には、低コスト光集積化が可能なシリコン (Si) リッチ窒化シリコン (SiN) 導波路を用いることを提案する。本報告では、Si リッチ SiN 導波路の設計を行い、変調フォーマット変換動作に適した特性が得られたため、その結果について述べる。

### 1. はじめに

5G の登場により、その高速・大容量、かつ、低遅延なシステムの特長を生かした「遠隔医療」や「自動運転」などの新たなサービスの展開が期待されている。5G では 1 ミリ秒以下の遅延時間を目標としているが、これは無線区間のみでの遅延時間であり、有線の光通信ネットワークを介して遠隔サーバー通信を行う際には数十ミリ秒の遅延時間が生じる場合があり、有線区間の遅延がボトルネックとなる。そのため、データセンターなどの遠隔サーバー通信を利用した低遅延サービスの提供には、光通信ネットワークの低遅延化が必須である。

光通信ネットワークの遅延要因の一つに、異なるネットワーク間を結ぶエッジノードにおける電気信号処理が挙げられる。現在の光通信ネットワークでは、エッジノードにおいて、光信号を一旦電気信号に変換し、電気信号の領域で信号処理を行い、再び電気信号を光信号に変換 (O/E/O 変換) する方法が一般的である。ネットワーク間で異なる変調フォーマットが用いられる場合には、エッジノードにおいて電気信号領域で一旦復調を行い、ビット情報に戻した上で、異なる変調フォー

マットの光信号を再度生成する処理が必要となり、大規模な演算処理が必要となる。電気信号処理には並列演算回路が用いられるが、現在の 100-Gbps、次世代の 400-Gbps の高速変調信号の処理を行う際には遅延は避けられない。また、演算量が増えるにつれて消費電力が増大することも問題となっている。そこで、O/E/O 変換を省略し、光のまま信号処理を行う超低遅延・省電力な次世代光ネットワークの実現が期待されている。異なる変調フォーマットを持つネットワークを低遅延・省電力に接続するためには、全光変調フォーマット変換の技術が必要となる。

本研究では、全光変調フォーマット変換に用いるデバイスに、低コスト光集積化が可能な Si リッチ SiN 導波路を用いることを検討する。全光変調フォーマット変換に用いるデバイスには、高い非線形係数と広い波長範囲に亘る動作が求められるため、それらの要求を満たす Si リッチ SiN 導波路の設計を行う必要がある。第 2 節では、本研究で用いる Si リッチ SiN 導波路の特徴とその設計指針について述べる。第 3 節では、Si リッチ SiN 導波路のモード解析を行った結果について述べる。第

4 節では、モード解析に基づき求めたパラメータを用いて広帯域波長変換動作を確認した結果について述べ、第 5 節で本報告をまとめる。

## 2. Si リッチ SiN 導波路

光集積化可能な非線形媒質として、様々なデバイス材料の研究が行われているが、低消費電力の光信号処理を実現するためには、高効率な非線形光学効果を利用する必要がある。高効率なデバイスとして III-V 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ンクスが有望視されており、Si 導波路や SiN 導波路が光通信デバイス材料として注目を浴びている [1]。Si 導波路は高い非線形係数が得られることが期待できるが、通信波長帯では二光子吸収が発生するため、入力光パワーが制限される欠点がある。SiN 導波路は非線形係数 $\gamma$ が小さいため、非線形光学効果の効率が上がらず、共振構造等特殊な構造なしには実用的な光信号処理の実現が難しい。そこで、本研究ではシリコン濃度を高くした Si リッチ SiN 導波路に着目する。Si リッチ SiN を用いることで、従来の SiN よりも大きな非線形係数 $\gamma$ 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。Si リッチ SiN 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 [2] が、光通信システムへの応用検討例は少なく、全光変調フォーマット変換器に応用した研究例は未だ報告されていない。

また、波長分割多重 (WDM) を利用した光通信ネットワークに柔軟に適用するためには、広い範囲の波長帯域に亘って動作可能なことが求められる。変調フォーマット変換や波長変換等の光信号処理の波長依存性は、導波路の群速度分散 (GVD) パラメータ $\beta_2$ に大きく

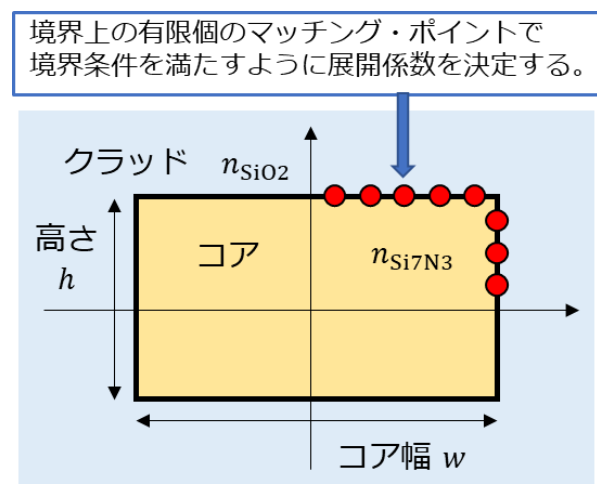


図1. ポイント・マッチング法

依存し、 $\beta_2$  が零に近いほど広帯域の光信号処理が可能となる。したがって、非線形係数 $\gamma$ が大きく、かつ、GVD パラメータ $\beta_2$ が零に近い Si リッチ SiN 導波路を設計する必要がある。

## 3. モード解析

最適な導波路サイズを設計するために、Si リッチ SiN 導波路のモード解析を行った。導波路は、コアが Si リッチ SiN、周囲のクラッドが二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) で構成される埋め込み型の方角導波路を想定した。SiN 導波路の組成比は Si<sub>7</sub>N<sub>3</sub> とし、Si と化学量論的 SiN (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) の複合材料として、セルマイヤの式より屈折率を計算した。具体的には、Si の屈折率を  $n_{Si}$ 、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の屈折率  $n_{Si_3N_4}$  をとして、Si リッチ SiN の屈折率  $n_{Si_7N_3}$  を、

$$n_{Si_7N_3} = 0.475 n_{Si} + 0.525 n_{Si_3N_4} \quad (1)$$

とした [3], [4]。波長 1530nm における Si リッチ SiN の屈折率は 2.70、クラッドの屈折率は 1.44 となった。非線形係数 $\gamma$ を求める際に用いる Si リッチ SiN の非線形屈折率は  $2.8 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{W}$  とした [2]。

導波路のモード解析には図 1 に示すポイント・マッチング法を用いた [5]。本解析法では、各領域における z 軸方向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代表点 (マッピング・ポ

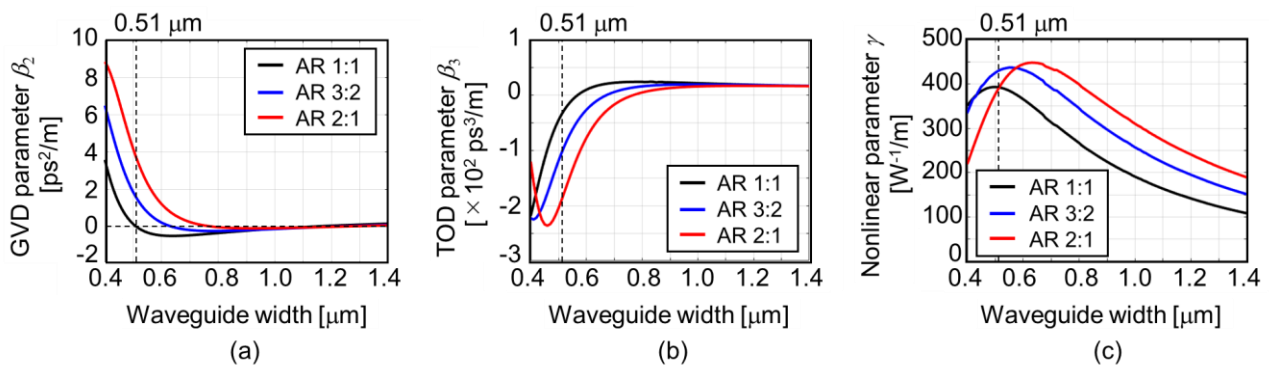


図 2. 計算により求めた導波路特性

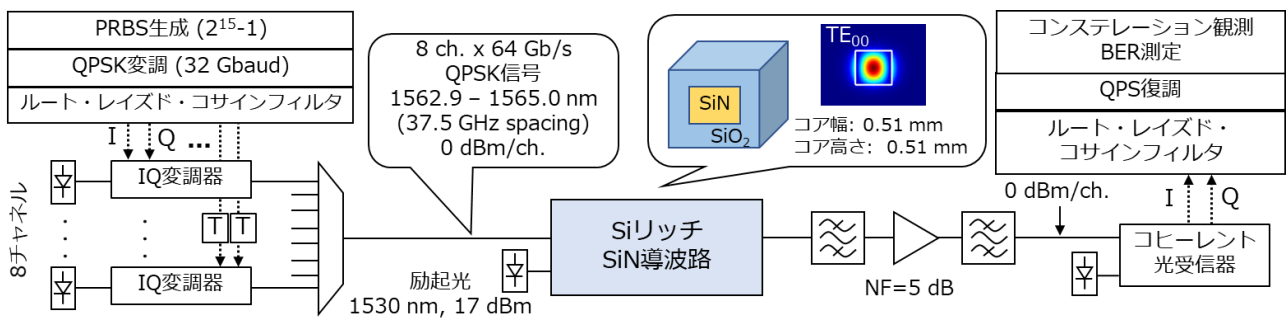


図 3. シミュレーションモデル

イント) を取り、少なくともこ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。

図 2 に Si リッチ SiN 導波路の  $E_{x11}$  モード ( $TE_{00}$  モード) における GVD パラメータ  $\beta_2$ 、三次分散 (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 を採用した。アスペクト比 1:1 において、コア幅  $w=0.51 \mu\text{m}$  において、 $\beta_2 = 0$ 、 $\gamma=393 \text{ W}^{-1}/\text{m}$  となり、零に近い  $\beta_2$  と大きな非線形係数  $\gamma$  を両立する結果が得られた。 $w=1.14 \mu\text{m}$  においても  $\beta_2 = 0$  となるが、 $\gamma=154 \text{ W}^{-1}/\text{m}$  と非線形係数が小さくなった。

#### 4. 広帯域波長変換動作

WDM を利用した光通信ネットワークに適用するためには、広い波長範囲に亘る全光変調フォーマット変換動作が求められる。本研究では、基本特性評価として、前節で計算したパラメータを用いて広帯域波長変換動作を

確認した。

図 3 に本研究に用いた計算機シミュレーションモデルを示す。15 段の疑似ランダムビットシーケンス (PRBS) を用いて 8 チャンネル、32Gbaud の 4 値位相シフトキーイング (QPSK) 信号を生成した。WDM 波長間隔を 37.5 GHz、信号光波長を 1562.9~1565.0 nm、各波長チャンネルの信号光パワーを 0 dBm とし、Si リッチ SiN 導波路に入射した。励起光の波長を 1530 nm、パワーを 17dBm とし、信号光と一緒に励起光を Si リッチ SiN 導波路に入射した。Si リッチ SiN 導波路中の光の振る舞い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 [6]。Si リッチ SiN 導波路の長さは 1.1 cm、損失は 4.5 dB/cm とした [2]。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、雑音指数 (NF) 5 dB の光増幅器で増幅した。そして、光コヒーレント受信器で波長変換された信号光を受信し、復調処理

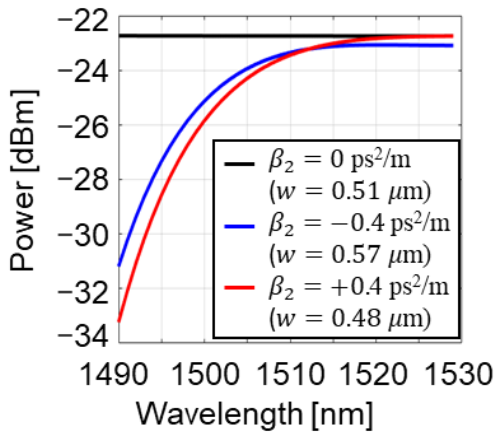


図 4. 出力パワーの波長依存性

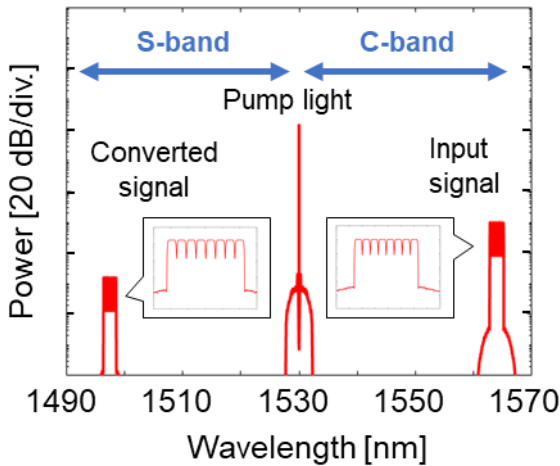


図 5. 出力光スペクトル

を行った。送信端および受信端にロールオフ率 0.25 のルート・レイズド・コサインフィルタを用いてナイキスト整形を行った。

図 4 に波長変換信号光出力パワーの波長依存性を示す。 $\beta_2 = \pm 0.4 \text{ ps}^2/\text{m}$  の場合、波長差が大きくなるにつれて出力パワーが減少する結果となった。一方、 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{m}$  ( $w=0.51 \text{ }\mu\text{m}$ ) の場合、波長差に依らず一定の出力パワーが得られた。以降、 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{m}$  ( $w=0.51 \text{ }\mu\text{m}$ ) の条件を用いた。

図 5 に Si リッチ SiN 導波路出力端におけるスペクトルを示す。C 帯の端である 1565 nm から S 帯の 1495 nm に亘る 70 nm の広帯域波長変換信号が出力していることが確認できる。図 6 に波長変換後（光増幅後）の QPSK 信号

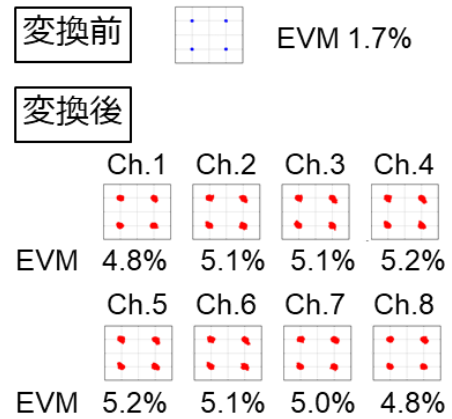


図 6. コンステレーションおよび EVM

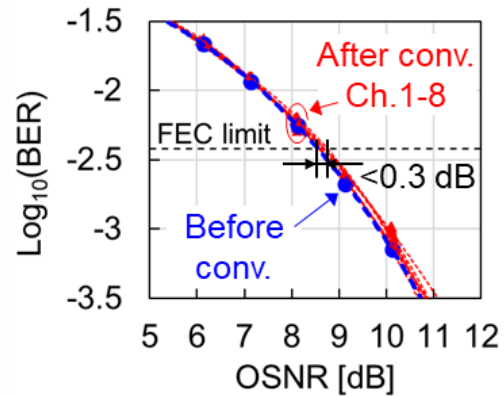


図 7. BER 特性

のコンステレーションダイアグラムおよびエラーベクトル振幅 (EVM) を示す。8 チャンネルの全ての信号において、5%前後の EVM を達成する結果が得られた。図 7 に波長変換信号のビット誤り率 (BER) 特性を示す。波長変換後の信号の BER 特性は、変換前の信号と同等の結果となった。前方誤り訂正符号 (FEC) の使用を想定した時、波長変換による光信号対雑音比 (OSNR) ペナルティは 0.3 dB 以下となり、変換動作による信号の劣化は非常に小さいと言える。

## 5. まとめ

本研究では、Si リッチ SiN 導波路を用いた全光変調フォーマット変換を実現するための基礎研究として、導波路設計および基本的な波長変換動作の調査を行った。コアが Si リッ

チ SiN、周囲のクラッドが SiO<sub>2</sub> で形成される埋め込み型導波路を用い、導波路幅および高さを  $w=0.51\ \mu\text{m}$  において、 $\beta_2=0$ 、 $\gamma=393\ \text{W}^{-1}/\text{m}$  となり、零に近い GVD パラメータ  $\beta_2$  と大きな非線形係数  $\gamma$  を両立可能なことを示した。設計した Si リッチ SiN 導波路を用いた波長変換動作を計算機シミュレーションにより確認し、1565 nm から 1495 nm に亘る 70 nm の広帯域波長変換動作が可能であることを示した。

今後、設計した Si リッチ SiN 導波路を用い、計算機シミュレーションによる全光変調フォーマット変換動作の実証を行う。さらに、Si リッチ SiN 導波路を試作し、実証実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究をご支援いただいた公益財団法人京都技術科学センターに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] J. Leuthold, C. Koos, and W. Freude, "Nonlinear silicon photonics," *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 535-544, Aug. 2010.
- [2] K. J. A. Ooi, D. K. T. Ng, T. Wang, A. K. L. Chee, S. K. Ng, Q. Wang, L. K. Ang, A. M. Agarwal, L. C. Kimerling, D. T. H. Tan, "Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN: Si<sub>7</sub>N<sub>3</sub> above the two-photon absorption edge," *Nature Communications*, vol. 8, no. 13878, pp.1-10, Jan.2017.
- [3] B. Tattian, "Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula," *Applied Optics*, vol. 23, no. 24, pp. 4477-4485, Dec. 1984.
- [4] K. Luke, Y. Okawachi, M. R. E. Lamont, A. L. Gaeta, and M. Lipson, "Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microresonator," *Optics Letters*, vol. 40, no. 21, pp. 4823-4826, Nov. 2015.
- [5] J. E. Goell, "A Circular-Harmonic Computer Analysis of Rectangular Dielectric Waveguides," *Bell System Technical J.*, vol. 48,

no. 7, pp. 2133-2160, Sep.1969.

[6] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Fifth Edition. Cambridge, MA: Academic Press,2012.

## 研究成果発表

- [1] M. Roy, K. Mishina, and A. Maruta, "Simultaneous Wavelength Conversion of Multiple WDM channels Using Silicon-rich Nitride Waveguide," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2021)*, paper JTh3A.81, Virtual, May 2021.