

オールフォトニクスネットワークを支える シリコンフォトニクス光源による波長変換技術

丸山 遼 小林 直樹 倉橋 諒 高橋 森生

要旨

自動運転や遠隔医療などをはじめとする情報通信サービスの高度化を実現・加速するためには革新的な光ネットワークが必要であり、NECでは光技術を最大限に利用した、低遅延・省電力・大容量伝送が可能なオールフォトニクスネットワーク（APN）の実現に取り組んでいます。APNでは、小型サイズと経済性を兼ね備えた柔軟な波長変換技術が必要です。そこで、集積性と量産性に優れたシリコンフォトニクス（SiP）技術を活用して、APNで求められる波長変換のキーデバイスである超小型のデュアル波長可変光源を研究開発しています。本稿では、波長変換技術の概要とデュアル波長可変光源を実現するSiP技術及び波長可変光源技術について紹介します。



オールフォトニクスネットワーク／シリコンフォトニクス／波長変換／波長可変光源／デジタルコヒーレント／光電融合

1. まえがき

インターネットやスマートフォンの急速な発展と普及により、動画配信サービスやクラウドコンピューティングの通信を前提としたサービスは身近なものになり、情報通信は今日の私たちの生活を支える欠かせない技術の1つとなっています。最近では、IoT（Internet of Things）の更なる高度化、自動運転や遠隔医療などの需要が高まっており、瞬時によりたくさんの情報を通信するサービスが求められるようになってきました。

光通信は、前述した情報通信社会を支える基盤技術の1つです。現在、全国の大都市間を光通信で結ぶコアネットワークでは、テラビット級の大容量伝送システムが実用化されています。その大容量伝送を支えるキー技術の1つが高密度波長分割多重（Dense Wavelength Division Multiplexing）（以下、DWDM）で、数十以上の波長のそれぞれに異なる信号を載せて、それらを1本の光ファイバーで一括伝送する技術です。DWDMをはじめとする既存の光通信システムでは、伝送経路での複数回の光信号と電気信号の変換が行われており、遅延の支配的要因となっています。リアルタイム性が要求される自動運転などのサービスを実現するためには、この遅延が問題

となっています。一方、更なる伝送容量の拡大にはエネルギー消費量の増大が大きな問題ですが、電気処理を担う半導体は物理的限界に近いレベルにまで微細化が進んでおり、これ以上の消費電力削減は困難になってきているといわれています。

これらの問題に対して、NECでは光信号でEnd-to-End（以下、EtoE）に通信するオールフォトニクスネットワーク（All Photonics Network）（以下、APN）の実現に取り組んでいます。APNは短距離から長距離に至るまであらゆる情報伝送において、光信号と電気信号の変換を最小限に抑えたネットワークであり、従来の光通信システムに比べて圧倒的な低遅延を実現できます。また、大容量（高速）伝送においても省電力な光の特長を生かし

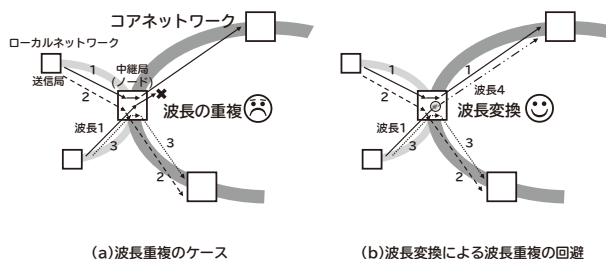


図1 APNにおける波長変換の必要性

て、ネットワークの大幅な低消費電力化を達成することもAPNの狙いです。そして、APNでは前述したDWDMの異なる波長ごとに情報を割り当てることにより、エンドユーザーへ大容量のサービスを提供します。

一方、波長は有限な資源であり、APNが目指す光ネットワークの実現には、波長（もしくは周波数帯域）を効率的に扱う技術が求められます。図1に光ネットワークの概略図を示します。コアネットワークでは各ローカルネットワークからの光信号が集中する一方で、1つの光リンク¹では同じ波長の信号を送送できないため、波長の重複を避ける必要があります。そのため、APNの目指す低遅延、省電力、大容量な光ネットワークには、柔軟な波長変換技術が必要不可欠です。また、EtoEの光パスでは複数の光中継装置を経由するため、光中継装置の前後で伝送距離や使用可能な波長、帯域が異なるケースが想定されます。したがって、波長の変換だけでなく距離に応じた最適な変調方式（変調フォーマット）、光信号帯域へ柔軟に変更することで、波長資源の更なる効率化を図ることが、APNの実現を加速させると考えられます。

2. NECの考える波長変換技術

前述の通り、APN実現には、効率的な波長・変調フォーマット変換技術が重要です。加えて、光伝送装置の設置スペースには制限があるため、波長・変調フォーマット変換機能を有した小型な光伝送装置が求められます。

NECでは、情報通信研究機構の委託を受けて、高速かつ低消費電力の信号処理プロセッサ（Digital Signal Processor）（以下、DSP）とシリコンフォトニクス（Silicon Photonics）（以下、SiP）技術を用いた小型で低消費電力な光送受信デバイスで構成された、波長と変調フォーマットの両方を切り替え可能なエコで柔軟性に富む小型光伝送装置の研究開発を進めています¹⁾。光伝送装置の構成要素の1つである波長可変光源（Tunable Laser Source）（以下、TLS）は大容量通信を支える重要な光部品の1つです。図2（a）にDWDMの光通信システムに用いられているデジタルコヒーレント方式²⁾における従来のTLS技術を用いた波長・変調フォーマット方式

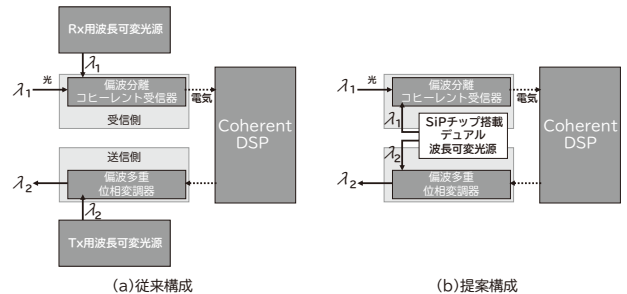


図2 デジタルコヒーレント送受信機における波長・変調フォーマット方式の従来構成と提案構成

の模式図を示します。送信側と受信側のそれぞれでTLSが必要であり、また、従来TLSでは、化合物半導体やディスプレイ光部品、制御回路部品など多数の部品を用いるため、小型化には限界がありました。一方、近年、優れた量産性と高精度な微細加工性を併せ持つシリコンCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）集積回路の製造インフラを利用して、電子・光集積回路を作るSiP技術が注目されています。SiP技術では超小型な光回路を形成できるため、従来と同サイズの1チップに送受信用のTLSを一体集積したデュアル波長可変光源を実現でき（図2（b））、波長・変調フォーマット変換可能な光伝送装置の小型化に大きく寄与します。

3. デュアル波長可変光源の実現に向けて

NECでは、これまでにSiP技術及びTLS技術に関して多くの研究実績を積んできました^{2) 3) 4)}。第3章では、これまでの知見を生かして開発中のデュアル波長可変光源の実現に向けた取り組みについて説明します。

3.1 波長可変原理と特長

SiPではシリコンが光導波路材料に使われ、さまざまな機能を持つ光部品を超小型な光回路で実現できます。これは、シリコンが非常に高い屈折率（約3.45）を有しており、光を非常に強く閉じ込めて数 μm の曲げ半径で光回路をレイアウトできるためです。作製したシリコン曲

¹⁾ 光伝送装置間を結ぶ光伝送路（光ファイバー）のこと。

²⁾ デジタル演算処理により光の振幅・位相・偏波を利用した大容量伝送を可能とする伝送方式。

がり導波路では、通信波長帯であるC band (1,525 ~ 1,565nm) 全域において10 μmの曲げ半径においても0.05dB/turn未満の十分に小さな光損失を確認しました。NECでは、この特長を生かしてレーザーの波長を自在に操ることのできる超小型のSiPチップを設計しています。図3に、開発中のSiPチップを用いたTLSの概略図を示します。このTLSでは、SiP技術を用いて作製した異なる円周を持つ2つのマイクロメートルオーダーサイズのリング共振器 (Micro Ring Resonator) (以下、MRR) で構成されるダブルリング共振器 (Double-Micro Ring Resonator) (以下、D-MRR) で波長可変動作を実現

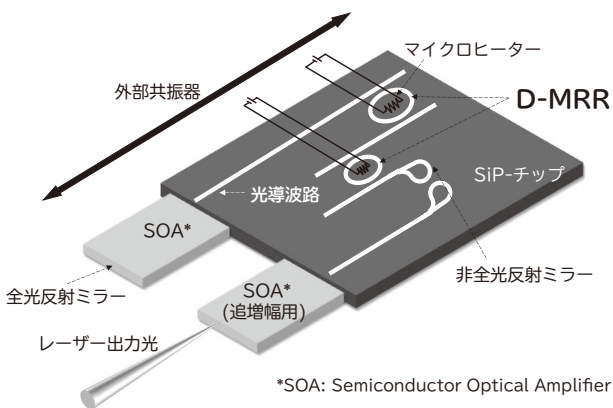


図3 NECが開発中のTLSの概略図

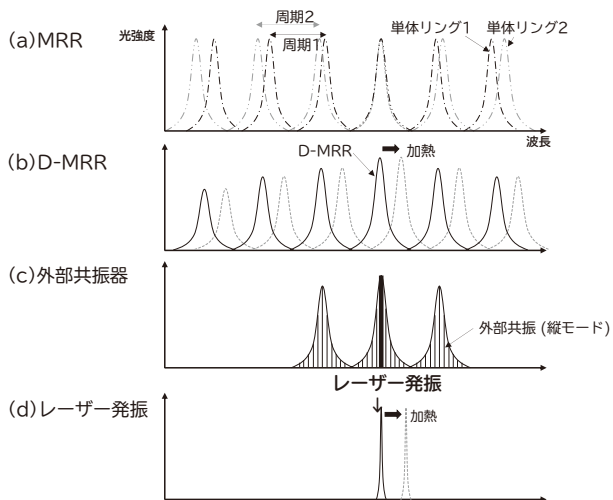


図4 透過スペクトルと波長可変レーザー発振の原理

します。図4に、透過スペクトルのイメージ図を示します。MRR単体ではローレンツ型関数の周期的透過スペクトルとなり、その周期は円周によって決まります(図4(a))。MRR単体を直列に並べたD-MRRでは、その透過スペクトルは各MRRスペクトルの積で表されます。したがって、2つのMRRの透過ピークが一致する波長で最大の透過率を得られ、D-MRRは光波長フィルタとして機能します(図4(b))。更に、各MRR近傍に配置したマイクロヒーターを用いてMRRの温度を調整して透過ピークが一致する波長を変えることで、波長可変フィルタを実現できます。SiPチップには、D-MRRに加えて、損失特性に優れた導波路型非全光反射ミラーを一体集積し、そのSiPチップを半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier) チップと結合させて外部共振器を構成します(図3)。D-MRRの透過波長と外部共振器のレーザー発振条件を満足するように共振器長を調整することで(図4(c))、単一波長のレーザー発振を実現します(図4(d))。

このSiP技術を用いた外部共振器型TLS (SiP-TLS) の特長の1つ目は、非常に低い消費電力でレーザー発振波長を調整できることです。これはシリコンが非常に大きな熱光学係数³ dn/dT を有するためで、ガラスなどの従来材料と比べて約20倍の大きな値を示します。マイクロヒーターの配置などを最適化してシリコンの高い dn/dT を生かしたNEC独自設計のD-MRRでは、 $150 \times 100 \mu\text{m}^2$ 以内の超小型サイズと12mWの低電力でC band全域の波長可変動作を達成しました。また、構造を改良したより小型・低消費電力のMRRも開発中です。

SiP-TLSの特長の2つ目は、デジタルコヒーレント伝送の伝送容量拡大に求められるkHzオーダーの狭線幅を小型サイズで実現できる点です⁴。レーザーの狭線幅化には数mm以上の長尺な共振器長が必要ですが、SiP技術では10 μmの曲げ半径でレイアウトできるため、D-MRRの波長可変機構と併せて小型チップで長尺な共振器長を実現できます。

3.2 SiP-TLSの試作結果

基本動作の検証を目的に、まずは単一光源機能のSiP-TLSを試作しました。写真に試作した光送信モジュールを示します⁵。SiP技術により非常に小さなサイズのパケッ

³ 温度変化1℃当たりの屈折率変化量。

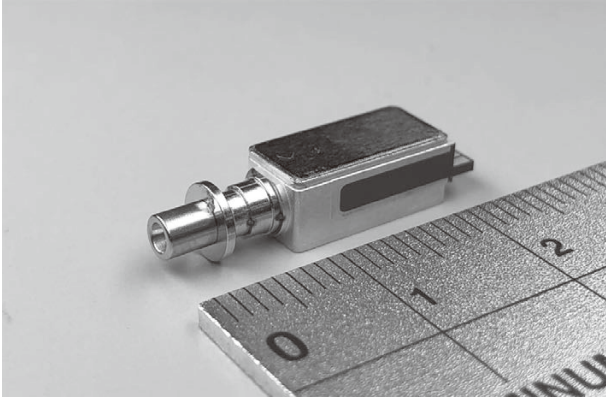


写真 試作したSiP-TLS搭載の光送信モジュール (TOSA⁴)

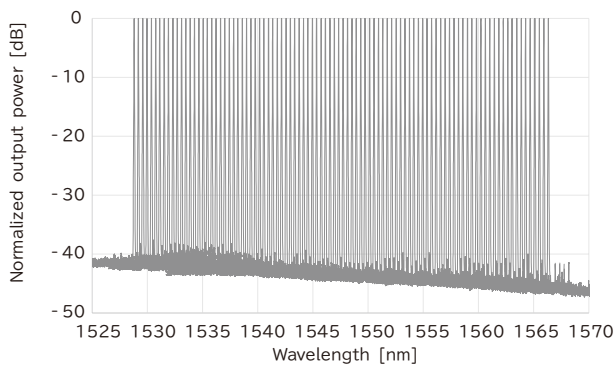


図5 SiP-TLSの全96波長の各発振スペクトル

ジを実現しました。構造の最適化で更なる小型化も可能な見込みです。

図5にDWDMで使用される全96波長のSiP-TLSの各レーザー発振スペクトルを重ねたグラフを示します。レーザーの単色性を表すサイドモード抑圧比 (Side Mode Suppression Ratio) (以下、SMSR) は、すべてのレーザー発振において37~43dBであり、全波長にて良好なレーザー発振特性を確認しました。

現在、2つのSiP-TLS機能を1チップに集積したデュアル波長可変光源の研究開発を進めています。更なる低消費電力化、高SMSR化、そして、狭線幅化も併せて進めており、小型低消費電力なデュアル波長可変光源により、低遅延・省電力・大容量のAPNの実現に貢献していきます。

4. むすび

本稿では、今後ますます発展する情報通信社会を支えるAPNに必要な波長変換技術と、それを実現するSiP技術を用いたデュアル波長可変光源に向けた取り組みを説明しました。APNの描くネットワークでは、長距離伝送や短距離伝送のみならず端末付近にまで光技術の適用が広がり、TLSの重要性・必要性がますます高まると考えられます。例えば、スイッチASIC (Application Specific Integrated Circuit) などの電子デバイスのパッケージを光デバイスと共有するコ・パッケージド・オプティクス (Co-Packaged Optics) (以下、CPO) と呼ばれる技術が、近年、注目されており、CPOでは省電力で小型な複数のレーザー光源が必要になります。SiP技術を用いたデュアル波長可変光源や更に集積度を上げた1チップのマルチ波長可変光源は、CPOへの適用可能性が期待できます。一方、SiP技術の適用はレーザー光源だけにとどまらず、光変調器やフォトダイオードなどの複数の光機能の小型集積化や、光機能と電子回路を一体集積化した光電融合デバイスの創出も期待されています。NECでは、これまで培ってきた光技術を基盤として多くの可能性を持つレーザー技術やSiP技術を発展させ、エコでより快適な情報通信社会の実現に挑戦し続けていきます。

5. 謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究「Beyond 5G 超高速・大容量ネットワークを実現する小型低電力波長変換・フォーマット変換技術の研究開発 (04601)」により得られたものです。

⁴ レーザー素子、光学/電気インタフェースなどを組み込んだパッケージ。

参考文献

- 1) 情報通信研究機構 : Beyond 5G 研究開発促進事業 委託研究
https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G_04601.html
- 2) Morio Takahashi et al. : A Stable Widely Tunable Laser Using a Silica-Waveguide Triple-Ring Resonator, Optical Fiber Communication Conference 2005, PDP19, 2005.3
<https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ofc-2005-PDP19&ibsearch=false>
- 3) Takashi Matsumoto et al. : Narrow Spectral Linewidth Full Band Tunable Laser Based on Waveguide Ring Resonators with Low Power Consumption, Optical Fiber Communication Conference 2010, OThQ5, 2010.3
<https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2010-OThQ5&ibsearch=false>
- 4) Naoki Kobayashi, et al. : Silicon Photonic Hybrid Ring-Filter External Cavity Wavelength Tunable Lasers, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 33 Issue: 6, pp. 1241-1246, 2015.3
<https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-33-6-1241>
- 5) NEC : Optical Transceivers for Mobile Radio Access Network
https://www.nec.com/en/global/prod/fod/products/sfp_family/index.html

執筆者プロフィール

丸山 遼

光デバイス統括部
主任

小林 直樹

光デバイス統括部
主任

倉橋 諒

光デバイス統括部

高橋 森生

光デバイス統括部
シニアプロフェッショナル

NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧いただきありがとうございます。
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報 (日本語)

NEC Technical Journal (英語)

Vol.75 No.1 オープンネットワーク技術特集

～オープンかつグリーンな社会を支えるネットワーク技術と先進ソリューション～

オープンネットワーク技術特集よせて
NECのオープンネットワークに向けた技術開発と提供ソリューション

◆ 特集論文

Open RANとそれを支える仮想化技術

Open RANがもたらすイノベーション
モバイルネットワークにおける消費エネルギー削減
自己構成型スマートサーフェス
Nuberu: 共有プラットフォームによる高信頼性のRAN仮想化
vrAln: vRANにおけるコンピューティングリソースと無線リソースのためのディープラーニングベースのオーケストレーション

5G/Beyond 5Gに向けた無線技術

グリーン社会の実現に向けたNECにおける5G/Beyond 5G基地局のエネルギー効率化技術開発
双方向トランシーバアーキテクチャを備えたミリ波ビームフォーミングICとアンテナモジュール技術
5G/6G屋内ワイヤレス通信向け1ビットアウトフェーシング変調による光ファイバ無線システム
空間分割多重を用いた28GHz帯マルチユーザー分散Massive MIMO
28GHz帯マルチユーザー分散MIMOシステムを用いたOTFS変調信号のOTA測定
Sub6GHz帯アクティブアンテナシステムにおける空間多重性能の改善
トランジスタ非線形モデルを使用しないブラックボックスドハティ増幅器の設計手法
最大8マルチユーザー多重化を実現する39GHz帯256素子ハイブリッドビームフォーミングMassive MIMO

オープンAPN (オープン光・オール光)の実現への取り組み

APN実現に向けたNECの取り組み～Openな光ネットワーク実現に向けて～
APN実現に向けたNECの取り組み～APN製品(WXシリーズ)の特長～
APN実現に向けたNECの取り組み～フィールドトライアル～
オールフォトニクスネットワークを支えるシリコンフォトニクス光源による波長変換技術
NEC Open Networksを支える光デバイス技術～800G超の光伝送技術～

コア&パリアーネットワークへの取り組み

カーボンニュートラルな社会の実現に向けたデータプレーン制御を支える技術
5G時代の人々の暮らしを支えるNECのネットワークスライシング技術
Beyond 5G、IoT、AIを活用したDX推進を支えるアプリケーションアウェアICT制御技術
通信事業者向け5Gコアネットワークにおけるパブリッククラウド活用

高度なネットワークサービスを提供する自動化・セキュア化への取り組み

OSSにおける運用完全自動化へのNECの取り組み
利用者の要件に基づくネットワークの自律運用技術とセキュリティ対応の取り組み
情報通信ネットワークの安全性を向上するセキュリティトランスペアレンシー確保技術
ネットワーク機器のサプライチェーン管理強化に向けた取り組み

ネットワーク活用ソリューションとそれを支える技術

通信事業者向け測位ソリューション
5Gのポテンシャルを最大限に引き出すトラフィック制御ソリューション(TMS)
ローカル5G向け小型一体型基地局「UNIVERGE RV1200」及びマネージドサービス
産業DXを支えるローカル5G活用によるパーティカルサービス
ローカル5G、LAN/RAN融合ソリューション

グローバル5G xHaulトランスポートソリューション

トランスポートネットワークの高度化を実現するxHaulソリューション・スイート
xHaulトランスフォーメーションサービス
xHaulトランスポート自動化ソリューション
5G/Beyond 5Gにおける固定無線トランスポート技術
Beyond 5Gに向けたSDN/自動化
高効率・大容量無線伝送を実現するOAMモード多重伝送方式

Beyond 5G/6Gに向けて

Beyond 5G時代に向けた取り組み

◆ NEC Information

2022年度C&C賞表彰式典開催



Vol.75 No.1
(2023年6月)

特集TOP