

# シリコンフォトニクス技術を用いた IoT ネットワーク向け 超小型光トランシーバーの開発

八重樫 浩樹

あらゆる“モノ”がインターネットにつながるInternet of Things(IoT)の時代を迎えて、膨大なデータの流れを收容するためのネットワークの構築が急務となっている。IoTを支えるアクセスネットワークとして期待されるのが、現在規格策定が進められている第5世代モバイルネットワーク(5Gモバイル)である。モバイルネットワークで基地局とコアネットワークを結ぶバックホールに使用される光回線は、要求される通信容量も今後ますます増大の一途をたどると予想される。また、5Gモバイル基地局と多数のsmallセルアンテナとを結ぶフロントホールには、既存の光アクセスファイバー網に收容する低コストなネットワーク構成が検討されている。そのためには光インターフェースを小さなアンテナ装置に組み込むことが求められ、光トランシーバーの小型化が必須となる。

シリコンフォトニクスは光回路を超小型に低コストで製造できる技術である。光アクセスネットワーク向けの光トランシーバーにこれを適用することで、送信光源、受光素子、波長合分波フィルタ等の光トランシーバーを構成する光学デバイスはシリコンのワンチップ上に集積され、桁違いの小型化とそれに伴う省電力化、組み立て工程の大幅な簡略化によるコスト低減が期待できる。

OKIは、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所(PETRA)の組合員企業として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より委託を受

けるプロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」(光エレクトロニクス実装Pj)に参画して、シリコンフォトニクス技術を用いたIoTネットワーク向け超小型光トランシーバーの開発を進めている。本稿でその概要について紹介する。

## 光エレクトロニクス実装Pjの概要

光エレクトロニクス実装Pjは、経済産業省の未来開拓研究プロジェクトの一つとして平成24年9月に開始して、平成25年度からはNEDO委託により実施されているプロジェクトである。情報通信機器の省電力化と高速化を目的とし、電子機器の電気配線を光化する光配線技術と電子回路技術を融合させた、光エレクトロニクス実装システム技術を実現する基盤技術を確認することを目指している。光電子集積技術を軸に、データセンター等におけるサーバシステム、光通信システム向けIT機器の省電力化技術の開発を推進している。

## IoTを支える5Gモバイルネットワーク

図1にIoTを支えるネットワーク構成の概要を示す。膨大な数のセンサや端末装置につながるIoTネットワークの末端を担うことを期待されるのが、5Gモバイルである。

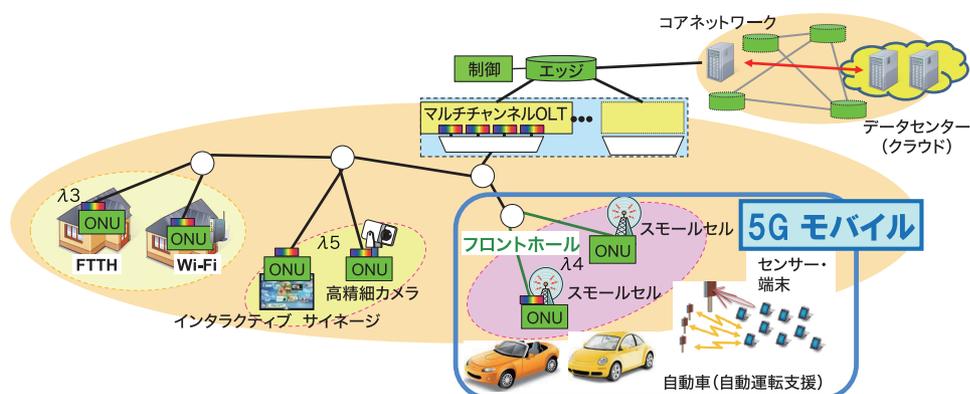


図1 IoTを支える5Gモバイルネットワーク

5Gモバイル規格では、端末通信速度は最大10Gbpsに高速化され、細分化したアンテナエリア（スモールセル）を従来の100倍程度に高密度に配置して1km<sup>2</sup>当たり約100万台の多数端末接続を想定している。

多数のスモールセルアンテナを結ぶフロントホールネットワークには様々な方式が検討されているが、中でもパッシブ光ネットワーク（PON）の構成を用いてスモールセルアンテナを既存の光アクセスファイバー網に収容する方式が設備コストの観点から有望である。

PONは、局と加入者を結ぶ光ファイバーを分岐して、時間多重により局と加入者を1対多で結ぶネットワーク構成である。局側設備と光ファイバー線路を複数の加入者で共用するので、ネットワークの設備コストを低く抑えることができる。局側と加入者側の光終端装置をそれぞれ光加入者線終端装置（OLT）、光加入者線ネットワーク装置（ONU）と呼ぶ。PONを用いるフロントホール構成では各スモールセルアンテナにONUを組み込む。

5Gモバイルの通信容量を収容するためには、PONにさらに波長多重を組み合わせた、Time and Wavelength Division Multiplexing-PON（TWDM-PON）を用いる。TWDM-PONは、ITU-T G.989シリーズで規格が定められ、その構成概略は図2に示す通りである。上り（加入者→局）波長帯1524～1544nm、下り（局→加入者）波長帯1596～1603nmを用いたシングルモード光ファイバー上の一心双方向通信であり、上り下り各4波長を多重して、1波長あたり10 Gbps、トータル40 Gbpsで通信する。

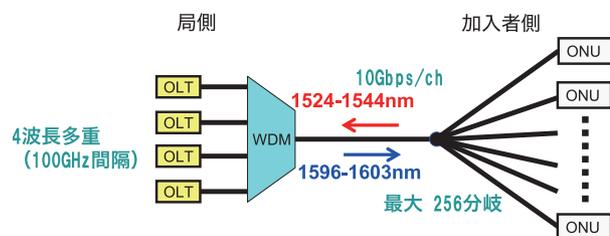


図2 TWDM-PONの構成

### シリコンフォトニクスを用いた超小型光トランシーバー

従来のONUは卓上サイズの装置であり、このままでは5Gモバイルのスモールセルアンテナ装置には収まらない。これを小型化してスモールセルアンテナに収めるためには光トランシーバーの小型化が必須の課題であり、SFP+<sup>1)</sup>サイズ(消費電力1.5W以下)のTWDM-PON ONU用超小型光トランシーバーの実現がこの開発の目標である。

ONU用光トランシーバーは一心双方向光送受信モジュールとその駆動回路とからなる。一心双方向光送受信モジュールは、従来は送信光源、受光器、波長合成分波フィルタ等の個別部品を組み立てて構成されていた。

我々はこれまでにシリコンフォトニクスを用いた超小型光トランシーバーを開発してきた<sup>2)</sup>。現在開発中のTWDM-PON ONU用一心双方向光送受信チップ（以下、光送受信チップと呼ぶ）の構成を図3に示す。

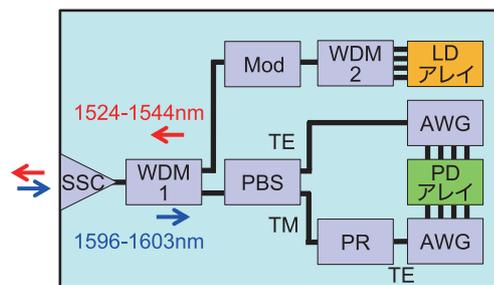


図3 TWDM-PON ONU用光送受信チップの構成

光送受信チップに必要な機能は、送信4波長の内の1波長を選んで送信する機能、及び4波長多重されたランダム偏波の入力光の内の1波長を選んで受信する機能である。

送信光は、送信光源（LD）アレイ、上り波長合成分波フィルタ（WDM2）、光変調器（Mod）、上り下り波長合成分波フィルタ（WDM1）、スポットサイズ変換器（SSC）を経て光ファイバーへ出力される。SSCはシリコン細線光導波路を伝播する光ビーム径を出射端で拡大して光ファイバー中の光ビーム径に近づけることにより、光結合損失を低減する。

一方、受信光の経路は、偏波依存性を解消するために偏波ダイバーシティ構成とした。光ファイバーからSSC、WDM1を経て、偏波スプリッター（PBS）で、TE、TM偏波成分に分離され、TE偏波成分はそのまま、TM偏波成分は偏波回転素子（PR）でTE偏波に変換されて、それぞれアレイ導波路型グレーティング（AWG）で波長分離された後、受光器（PD）アレイで受光される。

各構成要素はシリコン細線光導波路で接続されている。LDアレイは4波長のマルチストライプ半導体レーザチップで、1波長を選んで連続発振させる。LDアレイはフリップチップ実装されるが、それ以外の構成要素はすべてシリコンチップ上にモノリシック集積されているので、組立てコストが大幅に低減される。チップサイズはSFP+サイズの超小型光トランシーバーへ搭載可能な5mm×3.5mmである。これにより、スモールセルアンテナに組み込める小型ONUが低コストで実現できる。

次節では、光送受信チップを構成するシリコンフォトニクス要素デバイスの内、波長合分波フィルタとゲルマニウム受光器について紹介する。

## シリコンフォトニクス要素デバイス技術

### (1) 波長合分波フィルタ

図4(a)は、上り下り波長合分波フィルタ(図3の“WDM1”)の構成要素である偏波無依存バンドパスフィルタの構造概略である<sup>3)</sup>。偏波回転グレーティングと偏波無依存3dBカプラを組み合わせることで、偏波無依存動作を実現している。偏波回転グレーティングは光導波路のシリコンコアの側面に左右反対称の凹凸(反対称グレーティング)を形成することにより、特定の波長の光を選択的に反射し、なおかつ入射光のTE偏波成分を反射光のTM偏波成分に、入射光のTM偏波成分を反射光のTE偏波成分に変換する機能を持つ。

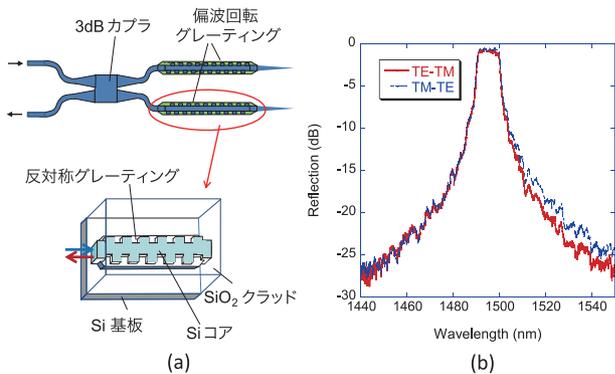


図4 偏波無依存バンドパスフィルタ

図4(b)は、試作したバンドパスフィルタの反射スペクトルである。TE、TMどちらの偏波の入射光に対しても反射波長帯が完全に一致しており、両偏波に対する反射率の差が0.2dB以下の優れた偏波無依存バンドパスフィルタ特性を得た。

次に、波長多重された受信光を波長分離するAWG(図3の“AWG”)について紹介する。図5(a)は、試作したAWGの光学顕微鏡写真である<sup>4)</sup>。約1.4mm角の素子サイズで、光周波数間隔100GHz、8波長までの分離を行う。AWG自体は偏波依存性が顕著であり、TE偏波のみを想定した設計なので、光送受信チップでは、図3で示したように偏波ダイバーシティー構成と組み合わせて用いる。図5(b)に試作したAWGのフィルタスペクトル特性を示す。独自の素子形状設計により、1.2dBの低損失と、-16dBの低い波長間クロストークを実現して、TWDM-PONへ適用できるめどをつけた。

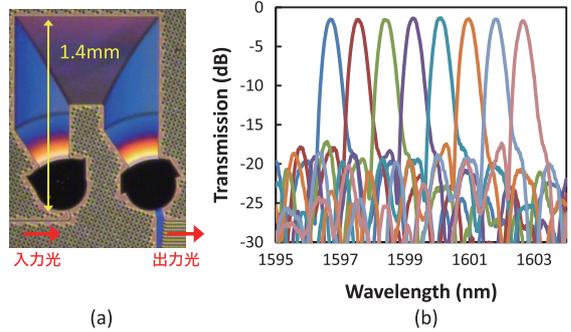


図5 アレイ導波路型グレーティング(AWG)

### (2) ゲルマニウム受光器

ゲルマニウム(Ge)受光器が光導波路にモノリシックに集積できることは、シリコンフォトニクス技術を用いる大きな利点の一つである。

図6は、光送受信チップに用いている導波路型のGe受光器(図3の“PDアレイ”)を構成)の断面構造模式図である<sup>5)</sup>。シリコン(Si)光導波層上にGe光吸収層を結晶成長により形成した。Si層をp型、Ge層上部をn型とするPINフォトダイオードである。

試作したGe受光器は、逆バイアス1V時の暗電流が11nAと非常に低い、良好な電圧-電流特性を示した。図7(a)に、逆バイアス1V時の受光効率スペクトルを示す。100nmの波長範囲にわたって0.8A/Wのほぼフラットな特性を得た。さらに高い受光効率を得るために、アバランシェフォトダイオード構造の導入を検討している。図7(b)には周波数応答特性を示す。逆バイアス1V時の遮断周波数は7.9GHzであり、TWDM-PONに適用できる十分な応答速度を得た。

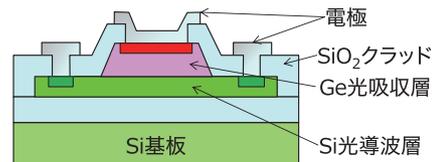


図6 ゲルマニウム受光器の断面構造

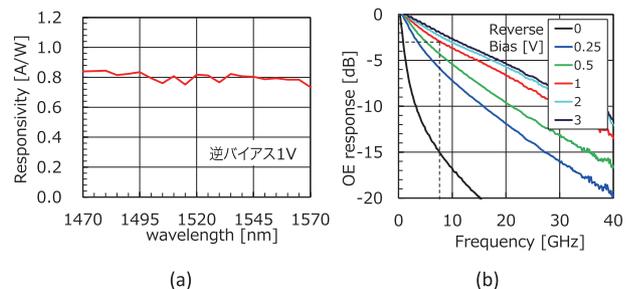


図7 試作ゲルマニウム受光器の特性

## まとめ

IoTを支える5Gモバイルネットワーク向けの超小型光トランシーバー開発について紹介した。シリコンフォトニクス技術をベースとした波長合分波フィルタの低損失化、ゲルマニウム受光器の効率改善が進み、超小型に集積した光送受信チップは、光トランシーバーに低消費電力と低コストのブレークスルーをもたらすことが期待できる。

## 謝辞

本研究の一部はNEDOの「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」により委託を受けたものである。◆◆

## 参考文献

- 1) SFF-8431 Specifications for Enhanced Small Form Factor Pluggable Module SFP+  
<http://www.sfplustransceiver.com/pdf/MSA-SFF-8431.pdf>
- 2) 太縄、他:シリコン細線光導波路機能素子の偏波無依存化、OKIテクニカルレビュー第219号、pp. 32 – 37、2012年4月
- 3) H. Okayama, et al.: Polarisation rotation Bragg grating with high diffraction efficiency using Si waveguide top surface groove grating, Electronics Letters, Vol. 51, p. 1909 – 1911(2015).
- 4) H. Okayama, et al.: Low loss 100 GHz spacing Si arrayed-waveguide grating using minimal terrace at slab-array interface, Electronics Letters, Vol. 52, p. 1545 – 1546 (2016).
- 5) 小野、他:GE-PON向け導波路型Ge-PIN-PD、電子情報通信学会2015年総合大会、C-3-56

## 筆者紹介

八重樫浩樹: Hiroki Yaegashi. 情報・技術本部 研究開発センター ネットワーク・端末技術研究開発部

## TiPO 【基本用語解説】

### シリコンフォトニクス

シリコンを材料とする光素子技術の総称。従来の光素子は、ヒ化ガリウム、リン化インジウムなどの化合物半導体、あるいは石英などの誘電体を材料とすることが一般的であった。シリコンを材料とすることにより、光素子の小型化、光素子とシリコンLSIの集積化、生産性の向上などが期待される。

### シリコン細線光導波路

光導波路とは所望の経路に光を伝搬させるための光の通り道である。シリコン細線光導波路はコアがシリコン、クラッドが石英からなり、従来から用いられる石英光導波路と比べて、光を強く閉じ込めることができ、光の経路を鋭く曲げても光が漏れにくいので、光回路のレイアウト面積を小さくすることができる。

### 偏波

光は電磁界であり、電磁界の振動方向が互いに直交する2つの偏波成分に分けて考えることができる。本稿では、素子基板面に対して電界の振動方向が平行な成分をTE偏波、垂直な成分をTM偏波と呼ぶ。

### 偏波ダイバーシティ

一般に、偏波状態により光が媒体から感じる屈折率が異なるので、光素子の特性は偏波状態に依存する。光受信では、光を互いに直交する偏波成分に分離して、それぞれに最適化した受光器で受けた信号を足し合わせることで、全体として偏波依存性を解消することができる。これを偏波ダイバーシティという。