

GE-PON FTTHシステム向け光トランシーバモジュール

Optical Transceiver Modules for the Gigabit Ethernet-PON FTTH System

岩瀬 正幸*
Masayuki Iwase石川 陽三*
Yozo Ishikawa小松 拓也*
Takuya Komatsu笠原 淳一*
Junichi Kasahara服部 伸彦*
Nobuhiko Hattori三浦 昌之*
Masayuki Miura中村 尚人*
Naoto Nakamura尾高 邦雄*
Kunio Odaka

概要 GE-PON FTTH (gigabit ethernet-passive optical network fiber to the home) システムは、次期光通信アクセス系システムの本命として期待されており、2005年度からサービスの本格的な導入が開始される。

我々は、IEEE802.3ah GE-PON規格準拠の一心双方向光トランシーバを、独自の無調心組立て技術によるOSAを適用し、ONU用及びOLT用としてそれぞれ開発した。

1. はじめに

FTTHはブロードバンドアクセス系の本命インフラストラクチャーと期待されており、日本国内では2003年より本格的な導入が始まり、2004年7月には208万加入を超えた(総務省発表)。2005年度よりIEEE802.3ah 1000BASE-PX ギガビットイーサネットPON規格(GE-PON)に基づくシステムの実用導入が開始される。

我々は、GE-PON用ONU(加入者端末)及びOLT(センター局端末)機器に必要な一心双方向光トランシーバモジュールを開発した。キーデバイスである光サブアセンブリ(optical sub-assembly: OSA)には、新規に開発した高精度樹脂成形体パッケージの内部にて、光ファイバと光素子が無調心により組立てし、また、WDMフィルタを光ファイバの端面に直接形成することによる超小型のWDM回路を適用することで小型化、低コスト化を図った。

本稿では光トランシーバについて解説する。

2. GE-PONシステムの概要

GE-PONシステムは、光ファイバの効率的な使用を目的としたアクセスシステムであり、1 Gbpsのデータ通信速度を複数の加入者に分配して使用する。

この規格はIEEEにてEthernetの802.3ah 1000BASE-PXとして2004年に制定された。伝送距離10 km版であるPX10と20 km版であるPX20として物理層の要求仕様が規定されている。

図1にGE-PONの概要を示す。従来の加入者ごとに一本の

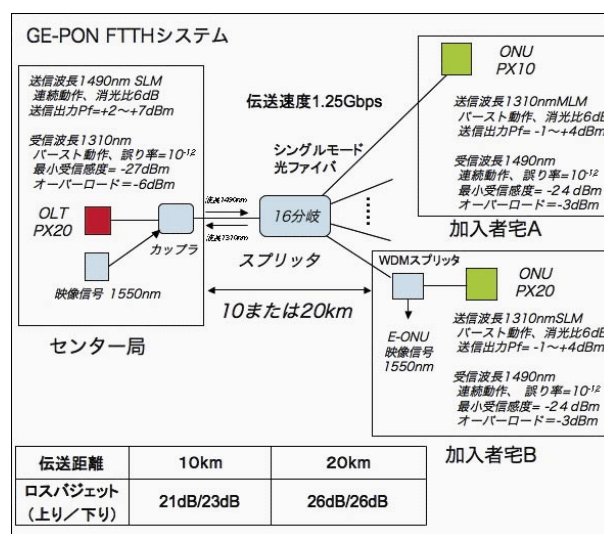


図1 GE-PON FTTH システム
GE-PON FTTH system architecture.

ファイバを占有するメディアコンバータを用いた100 Mbps FTTHシステムとの違いは、上り/下り波長にそれぞれ1310 nm/1490 nmを用い、16分岐のPDS(passive double star)伝送路にて最大1.25 Gbpsの一心双方向通信を行う点にある。センター局のOLTと分岐点(スプリッタ)までの光ファイバを複数の加入者で共有することで、経済的メリットがある。また、IEEE 802.3ah規格では規定されていないが、ITU-T983.3規格に基づく1550 nm帯を使用した映像信号を下り方向に重ねて(3波多重)、映像配信することも考慮されている。

GE-PONシステムでは、OLTは分岐点のスプリッタより先で、距離の異なる複数の光ファイバを介して加入者宅のONUとの間で時分割(TDM)通信を行う。したがって、OLTは各

* 研究開発本部 ファイタル・フォトリクス研究所

ONUからのパワーレベルが異なる、衝突の無い上り信号を受信するため、OLTの受信器は各々のパワーレベルに対して瞬時に追従して順番に通信を行う必要がある（バーストモード通信）。なお、下り方向は従来の通信方式と同じく連続モードである。

GE-PONシステムのロスバジェットは、IEEE802.3ah規格では10 km版と20 km版の仕様があり、それぞれファイバによるロスが異なる。実際のシステムにおいては、OLTは20 km仕様を選択し、場合に応じてONUを10 km版、20 km版を使い分けることが実用的である。

3. トランシーバモジュール設計

3.1 ONU用トランシーバ

図2に開発した10 km版ONU用トランシーバモジュールのブロックダイアグラム、図3に外観写真を示す。ONU用トランシーバモジュールは、宅内に設置されるONU機器に搭載されるため、小型なSFF (small form factor) 準拠サイズで設計した。光コネクタには、SCレセプタクル型を採用した。

ONU用トランシーバモジュールは、一心双方向機能を有する小型のOSA (optical sub-assembly) と送信用ドライバ回路を内蔵した回路基板、きょう体、SCコネクタレセプタクルから構成される。OSAは後述するように、樹脂パッケージによる無調心組立て構造であり、WDMフィルタ付きファイバ、受信側にバンドパスフィルタ、受信用PD、電気信号アンプIC、送信側にFP-LD (ファブリペロレーザ)、モニタPDを内蔵している。本機の特徴として受信アンプにトランスインピーダンスプリアンプとリミッティングアンプを集積したカスタムICを用

い、OSAのみで2R機能を実現し、部品点数の削減及び低消費電力化を図った。

3.2 OLT用トランシーバモジュール

図4に20 km版OLT用トランシーバモジュールのブロックダイアグラム、図5に外観写真を示す。OLT用トランシーバモジュールの寸法は、伝送装置のラック内での高密度ボード間実装の要望から、高さ8.5 mm以下とするため、FSAN ATM-PON用トランシーバサイズに準拠した。光コネクタには、SCレセプタクル型を採用した。

GE-PONでは、OLTの光出力は高出力の1490 nm波長のDFBレーザを必要とする。このため、OSAには送信レーザにキャンパッケージを採用し、非球面レンズによる高結合効率設計とした。受信側はONU用OSAと同構造の無調心組立て樹脂パッケージにWDMフィルタ付きファイバ、受信PD、受信アンプを内蔵した。OLT用受信アンプはトランスインピーダンスプリアンプとリミッティングアンプを集積した2R機能バースト受信対応カスタムICである。

4. OSA 構造と特性

4.1 ONU用OSA構造

一心双方向トランシーバの性能及びコストはOSAによって決定される。特にONU用OSAは小型、低消費電力であることが重要である。本トランシーバモジュールの開発に当たっては、OSAの組立てプロセスの簡略化、部品点数の削減、集積密度の向上を目的として、以下の新技術を開発した。

- 1) 高精度樹脂成形技術によるファイバ固定用Ω溝と成形突起を備えた無調心組立てパッケージ^{1, 2)}

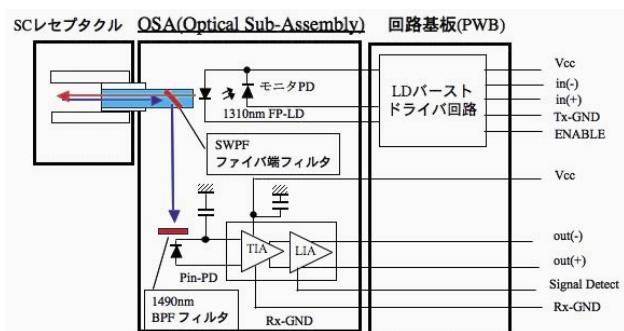


図2 ONU用トランシーバモジュールのブロックダイアグラム
Block diagram of ONU transceiver module.

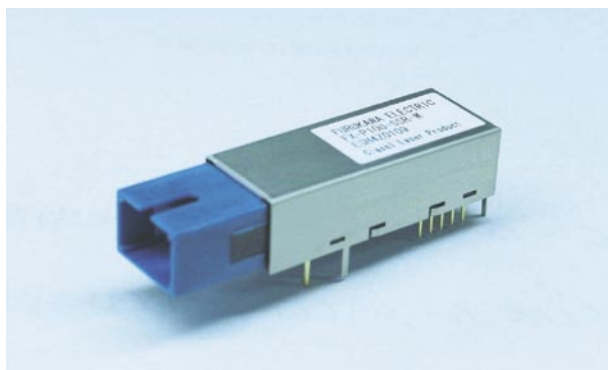


図3 ONU用トランシーバモジュールの外観
Picture of ONU SFF size transceiver module.

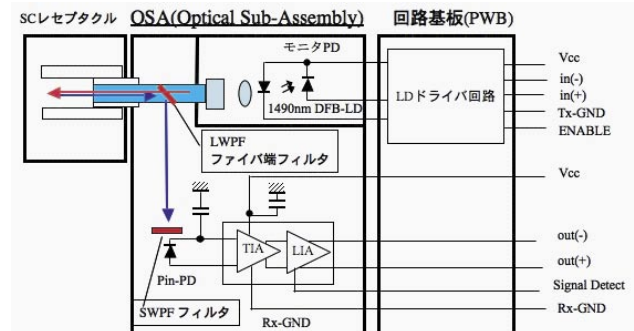


図4 OLT用トランシーバモジュールのブロックダイアグラム
Block diagram of OLT transceiver module.

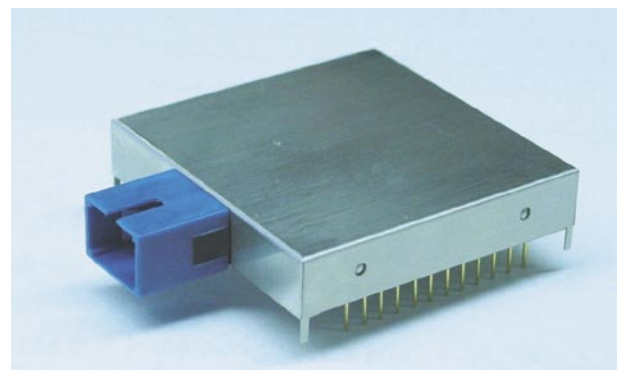


図5 OLT用トランシーバモジュールの外観
Picture of OLT transceiver module.

- 2) 30°斜研磨したファイバ端面への誘電体多層膜WDMフィルタ蒸着技術
- 3) 無調心組立て用V溝付きスポットサイズ変換石英導波路(SSC-PLC)³⁾

図6にONU用OSAの断面構造を示す。OSAはWDMフィルタ付きファイバ、受信側にはシリコン基板上に搭載した受信用PD及び電気信号アンプIC、送信側にはシリコン基板上に搭載したFP-LD、モニタPDを内蔵し、電気端子をプリモールドしたリードフレームパッケージ、セラミックフェルールを含む樹脂パッケージから構成される。図7はONU用OSAの外観写真である。寸法は最大高さ5.0 mm、幅6.2 mm、長さ13.0 mm(リード部を除く)である。以下に主要部品について説明する。

4.2 高精度樹脂成形体

高精度樹脂成形体パッケージは、高精度な樹脂フェルールであるMTコネクタの成形技術により、ファイバと光素子の相対的な位置決めをパッシブアライメントで行うパッケージとして開発した。図8にOSAの受信(Rx)部、SSC-PLC部、送信(Tx)部の断面図を示す。

本成形体の特徴は、1) 樹脂成形体にファイバを位置決めする穴、2) 光素子を搭載するシリコン基板上のV溝との位置合わせを行うための突起、3) 角度付き研磨ファイバの端面に施されたフィルタにより反射した下り光信号をファイバの側面から取り出し受信PDに入射させるため、パッケージ内のファイバ位置決め穴の側面の一部分に開口部を設けたことである。このファイバ固定溝は断面形状がギリシャ文字のΩの形状をしていことからΩ溝と呼び、従来のV溝とは異なり、挿入した

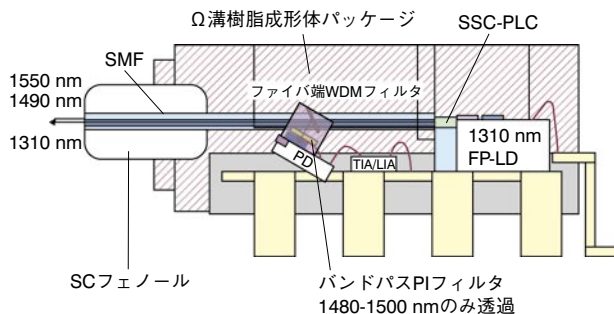


図6 ONU トランシーバ用 OSA の構造
Structure of optical sub-assembly for ONU transceiver.

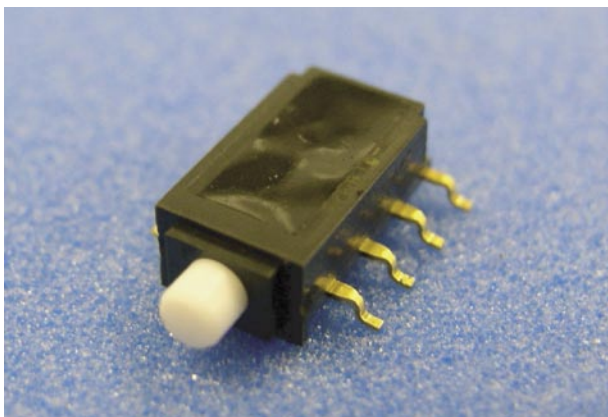


図7 ONU トランシーバ用 OSA
Optical sub-assembly for ONU transceiver.

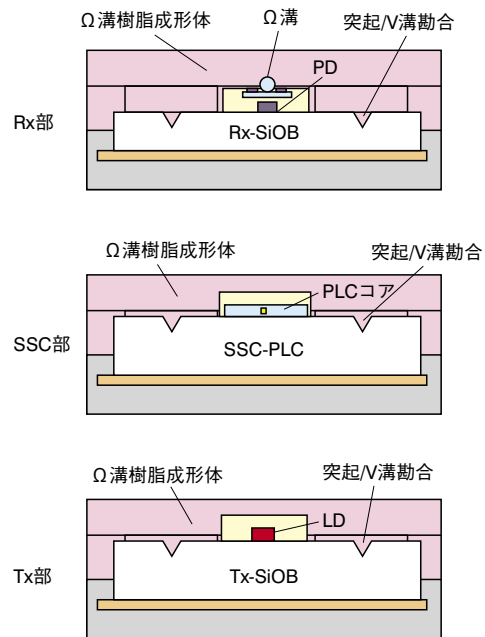


図8 OSA の断面図
Cross-section of OSA.

ファイバが溝から外れないという特徴がある。受信用 Pin-PD には結合ロスを低減するため受光径 80 μm のものを使用し、受信感度は 1.0 A/W 以上を得ている。送信側の光軸の位置決め方法は、光素子を搭載したシリコン基板 (SiOB : silicon optical bench) 及び後述の SSC-PLC それぞれの上の 2 本の V 溝と整形突起のかん合により自動的に行われる。シングルモードファイバの低ロス結合を実現するため、樹脂突起とファイバ穴の相対位置精度は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ に管理しており、シングルモードファイバ、SSC-PLC、LD の光軸は組立て後に $\pm 1 \mu\text{m}$ に収まる。図9に樹脂成形体の突起とシリコン基板上のV溝のかん合状態とΩ溝の断面写真を示す。

4.3 ファイバ端WDMフィルタ

GE-PONシステムでは、上り／下りの光波長を分離するためにWDMフィルタによる波長分離が必要である。従来のWDMフィルタはガラス基板等に成膜し、数mm角の大きさのチップに切り出しOSAに搭載している。我々はフィルタのサイズを極小にするため、30°角度付き研磨ファイバの端面に直接的にWDMフィルタを形成する技術を開発した。このフィルタ付きファイバは、前述の樹脂成形体のΩ溝に挿入固定され、下り信号光はフィルタ反射により受信PDに結合される。これにより、コストアップの主要因であったWDMフィルタ回路をパッケージ内のファイバ組立てのみで実現できた。なお、LDと結合す



図9 樹脂成形体突起部とシリコン基板のV溝かん合部断面(左)及びΩ溝部断面(右)
Cross-sections of the V-groove alignment on silicon substrate (left), and the Ω-shape groove of plastic mold (right).

るファイバは、別の30°角度付き研磨ファイバを樹脂成形体のΩ溝内で突き合わせている。図10はファイバ端に形成されたフィルタの写真である。図11はフィルタの透過スペクトル波長特性である。上り方向の最大波長1360 nmと下り方向の最小波長1480 nmの間の透過損失差は20 dBである。更に、送信LDの波長1310 nm光のモジュール内部のクロストーク及び映像下り信号である波長1550 nm光に対しての光のアイソレーションを各々40 dB以上にするため、ファイバ端フィルタとは別に1480～1500 nm波長のみを透過するバンドパスフィルタを受信PDの直前に挿入している。バンドパスフィルタの特性を十分に得るため、PDを30°傾けて実装し、反射光がPDにほぼ垂直に入射するように工夫をした。

4.4 SSC (spot size converter) -PLC

GE-PONシステムではスプリッタにより16光分岐を行うことから、従来の光通信システムに比較して高いパワーの信号光が必要である。ONUの光出力要求仕様は-1～4 dBmである。

一方で、低コスト要求に応えるための無調心組立て構造においては、レンズレスでファイバとLDを直接に突き合わせて結合を行うが、ファイバとLDのモードフィールド径の差による結合ロス約10dB程度であり、それ以上の高結合を得ることは困難であった。更に一心双方向モジュールではWDMフィルタの挿入損失も加わるため、所望の光出力を得るにはLDとファイバの結合ロスを低減することが必須である。

我々は低コストでありながら高出力という、相反する要求に応えるため、LDとファイバの間にスポットサイズ変換を行う石英導波路(SSC-PLC)を挿入することで結合損失の改善を行うとともに高精度樹脂パッケージ内での無調心組立てを実現した。図12にSSC-PLCを用いた光学結合系を示す。SSC-PLCは、長さ300 μmのテーパ部を有する長さ500 μmの微小な光学部



図10 ファイバ端のWDMフィルタ
WDM filter evaporated on the facet of angled polished fiber.

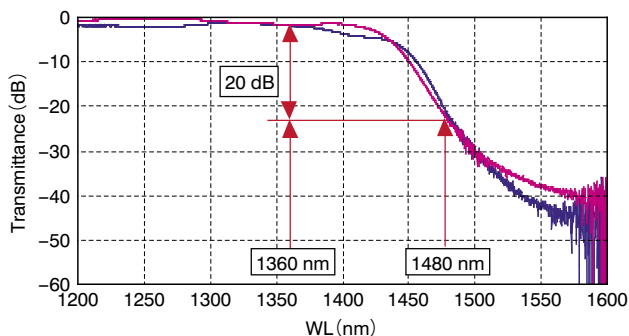


図11 ONU用SWPFフィルタ特性の例
Characteristic of the SWPF (Short wavelength pass filter) on the 30 degree angled polished fiber facet.

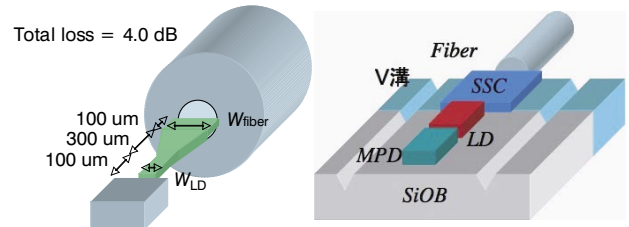


図12 SSC-PLCの導波路構造と光学結合系
Structure of spot size converter using planer lightwave circuit.

品であり、光導波路によりLD光のスポットサイズをファイバのそれに変換することで接続ロスを低減する³⁾。

図13はSSC-PLCとLD、シングルモードファイバ各々に対する結合ロスと光導波路幅の計算結果である。光導波路のコアとクラッドの屈折率比は0.8%を用いた。計算の結果、LD側を4.5 μm、ファイバ側を10 μm幅にすることでLDとファイバの結合ロスを最小4 dBにすることが期待できる。

図14にSSC-PLCの効果を検証するために試作したフィルタ無しのONU用OSAの光出力-電流特性を示す。SSC-PLCを介したシングルモードファイバと1310 nm FP-LDとの結合損失は、4.4 dBと見積もられ、設計にほぼ合致した結果であった。85°Cでのファイバ出力 P_f は+3 dBm以上が得られた。

4.5 ONU用OSAの特性

図15はSSC-PLCを用いたONU用OSAの光出力-電流特性と結合ロスのヒストグラムである。WDMフィルタのロスと実装ばらつき、内蔵アンプICの発熱によるLDの発光効率低下などが加わった結果、トータルのロスは約8 dB±1 dBであった。

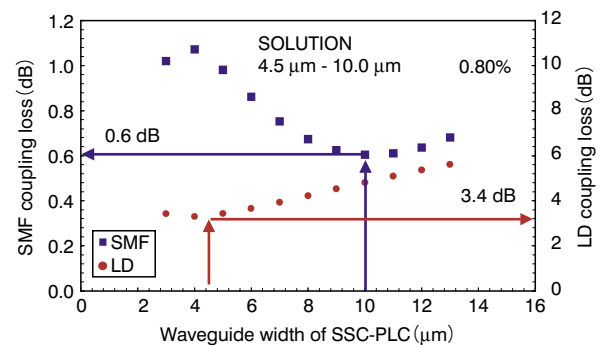


図13 SSC-PLCの構造パラメータと結合損失計算
Calculated results of coupling loss of SSC-PLC versus LD and fiber.

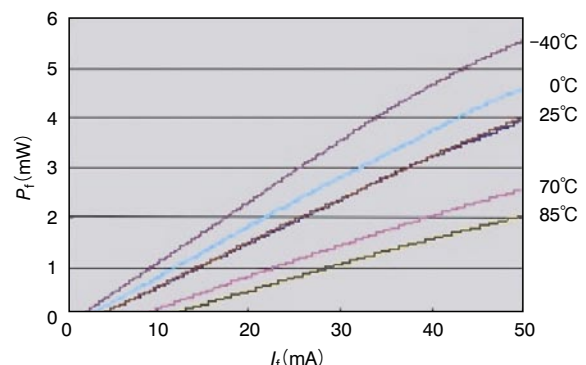


図14 フィルタ無しONU用OSAのL-I温度特性
L-I characteristics of ONU OSA without WDM filter.

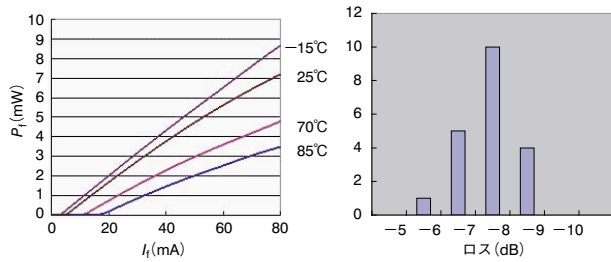


図15 ONU用OSAの光-電流特性と結合ロスヒストグラム
 L - I characteristics and histogram of insertion loss of ONU OSA.

同一組立てロット内の光結合効率は正規分布を示しており、組立ての再現性が得られている。

一方、ONU用OSAの1490 nm波長に対する受信感度は1.0 A/W以上が得られた。オーバーロードは+3 dBmが得られている。

4.6 OLT用OSA構造と特性

GE-PONシステムのOLT用OSAには仕様上1490 nm波長のDFB-LDを用いることが必須となっている。特に20 km版においては、+2～+7 dBmの光出力が求められる。図16は開発したOLT用OSAである。受信側にONU用OSAと同様な構造のWDMフィルタ(LWPF)内蔵PIN-TIA/LIAを用い、非球面レンズ付き金属キャンパッケージDFBレーザを溶接固定したハイブリッド構造のOSAを開発した。溶接固定を行うため、メタルフェルールを高精度樹脂成形体にインサートモールドし、ファイバ組立てを行った。また、レーザとの高結合による反射戻り光対策として、メタルフェールの端面にアイソレータを実装し、反射戻り光の影響を低減した。図17はOLT用OSAの外観写真である。寸法は最大高さ5.6 mm、幅6.2 mm、長さ

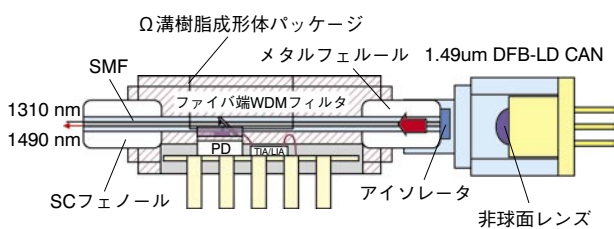


図16 OLTトランシーバ用OSAの構造
 Structure of OSA for OLT transceiver.

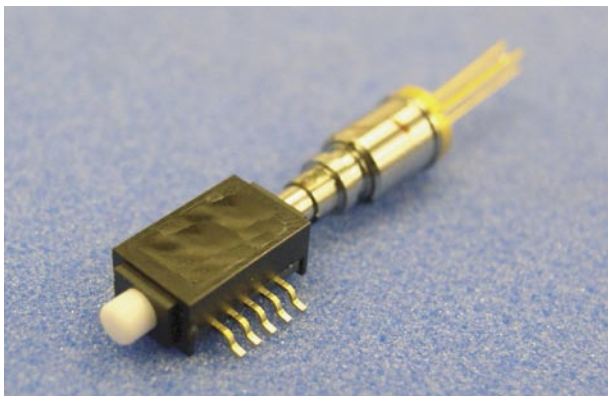


図17 OLTトランシーバ用OSA
 Optical sub-assembly for OLT transceiver.

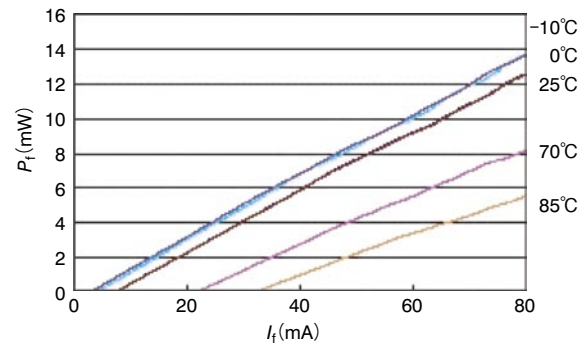


図18 OLT用OSAのL-I温度特性
 Temperature dependence of L - I characteristics of OSA for OLT transceiver.

24 mm (リード部を除く)である。

図18は、OLT用OSAの光出力-電流特性である。85℃において目標仕様上限を満たす5 mW (+7 dBm)以上の光出力が得られた。フィルタの透過ロスと最大1 dBと仮定した場合のDFB-LDとのトータルロスは3 dBである。

一方、1310 nm波長に対する受信感度は1.0 A/W以上が得られた。

5. トランシーバ特性

5.1 ONU用トランシーバ特性

図19にONUトランシーバに要求されるバースト送信特性の評価結果を示す。図中(a)に示す波形にてバースト送信し、立ち上がり・立ち下がり時間の測定、及びバースト送信時の送信アイを取得した。

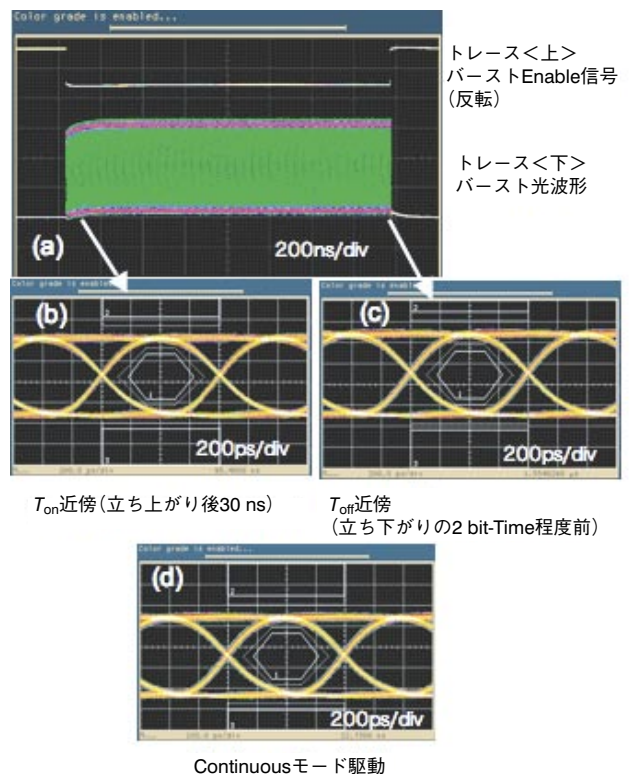


図19 ONU用トランシーバのバースト送信アイダイアグラム
 Eye diagram of ONU transceiver in burst mode operation.

T_{on} , T_{off} 時間はそれぞれ数nsであった。バースト送信時のアイに関しては(b), (c)に示されるように連続発光モードで動作させた時(d)のアイマスクマージンと同等であり、いずれもIEEE802.3ah規格に対して十分な余裕が得られた。

ONU用トランシーバの受信特性を図20に示す。送受同時動作での誤り率 10^{-12} での最小受信感度は -29.0 dBmが得られ、目標とする最小受信感度仕様 -24 dBmに対して5 dBのマージンが得られた。なお、送信受信同時動作(Tx on)でのクロストークによる感度劣化は0.5 dBであった。

5.2 OLT用トランシーバ特性

OLT用トランシーバの送信特性を図21に示す。1.25 Gbpsにおいて良好なアイパターンが得られている。

OLT用トランシーバのバースト受信特性は、OLTトランシーバに2台のONUを接続し、図22に示す入力条件にて測定した。バースト受信信号としては、一番厳しい条件、すなわち、ダミー信号にオーバーロードの光信号、測定信号に最小受信感度の光信号を入力し、かつバースト間隔を0にした条件で測定を行った。受信機のsettling timeは約300 nsであり、IEEE 802.3ahの規格400 nsに対して、十分なマージンがあることを確認した。図23はOLT用トランシーバの受信誤り率特性である。送受同時動作における誤り率 10^{-12} での最小受信感度は -28.5 dBmであり、目標とする最小受信感度仕様 -27 dBmに対して1.5 dBのマージンが得られた。送信受信同時動作(Tx on)でのクロストークによる感度劣化は0.5 dBであった。

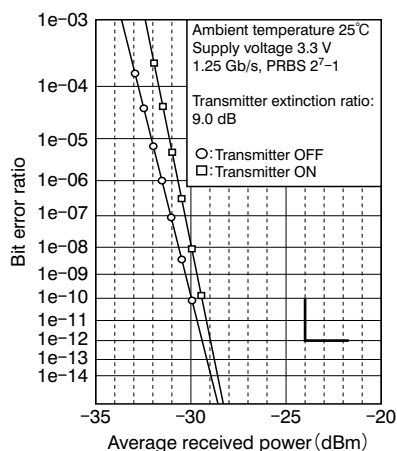


図20 ONU用トランシーバの受信誤り率特性
Bit error ratio of ONU transceiver.

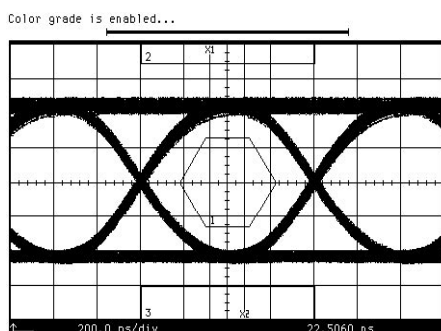


図21 OLT用トランシーバの送信アイダイアグラム
Eye diagram of OLT transceiver.

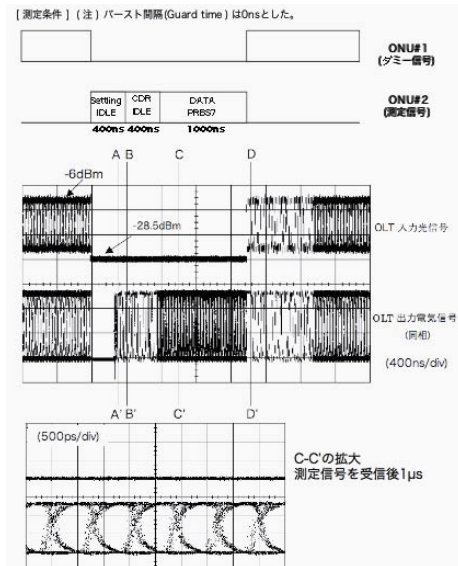


図22 OLT用トランシーバのバースト受信特性
Burst mode receiver characteristics of OLT transceiver.

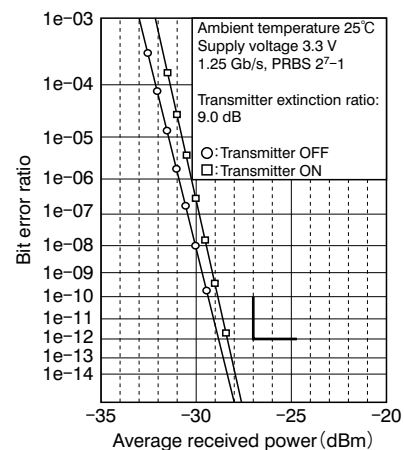


図23 OLT用トランシーバの受信誤り率特性
Bit error ratio of OLT transceiver.

6. おわりに

我々は、GE-PON FTTHシステム向け一心双方向トランシーバモジュールの開発を行った。新規に開発した無調心構造の一心双方向OSAにより、トランシーバの小型化と低コスト化を図ることができた。完成したトランシーバモジュールはIEEE 802.3ah規格を十分に満たしており、ONU、OLT機器への適用を期待する。

参考文献

- 1) M.Iwase: "Passive Alignment Optical Modules using High Precision Plastic Package and Silicon Optical Bench Technologies," OECC2002 10C1-1, (2002), 134.
- 2) 岩瀬正幸, 石川陽三, 伊澤敦, 水野一庸, 阿部拓行, 川島洋志, 奈良一孝: 「高精度樹脂成形体によるGE-PON対応一心双方向送受信OSA (I) —OSA構造および特性—」, 電子情報通信学会 2004年総合大会講演論文集, C-3-62, (2004), 235.
- 3) 川島洋志, 奈良一孝, 石川陽三, 岩瀬正幸: 「高精度樹脂成形体によるGE-PON対応一心双方向送受信OSA (II) —スポットサイズ変換PLC—」, 電子情報通信学会 2004年総合大会講演論文集, C-3-112, (2004), 286.