

FTTH用PLC製品の開発

PLC Chip and Module for FTTH Networks

小野卓宏* Takahiro Ono 陳 檣* Qiang Chen 津田寿昭* Toshiaki Tsuda 渡辺智宏* Tomohiro Watanabe 澤村壮嗣* Taketsugu Sawamura
田中完二* Kanji Tanaka 川島洋志*² Hiroshi Kawashima 占部晴樹*² Haruki Urabe 品田 保*² Tamotsu Shinada 奈良一孝*² Kazutaka Nara

概要 最近急速に普及が進んでいるFTTH (fiber to the home) 用のPLC製品を開発した。従来よりWDMシステム向け製品に使われていたPLC (planar lightwave circuit) 技術を用いて新たにFTTH向けに技術開発を行い、低価格で高性能なPLC製品を開発することができた。信頼性試験も行い、高い長期信頼性もあることを確認したので報告する。今回は、代表的なFTTH用PLC製品として、波長無依存型カップラ (wavelength insensitive coupler: WINC) と1×4, 1×8, 1×16スプリッタについて報告する。

1. はじめに

最近、日本国内ではブロードバンドサービスが急速に普及している。現在最も普及しているのはADSL (asymmetric digital subscriber line) であるが、光ファイバを使ったFTTHも、ADSLの2倍以上の伸び率で急激に加入者数を増やしており、既に100万加入を達成した¹⁾。今後もFTTH加入者は、今まで以上の伸び率で、増加することが予想されている。

ブロードバンドサービスの中でもFTTHは最も高速で安定したシステムであるが、ADSLに比べ初期費用、利用料の高さにより普及が遅れていた。しかし、現在では初期費用が低額になり、利用料金もADSLに近づいてきたことにより急激に普及し始めている。料金を下げるために通信キャリアは、図1に示すように、一本のファイバを複数のユーザが共有するPON (passive optical network) といわれるシステムの導入を進めており、このシステムには光を分岐する部品 (光スプリッタ) が多数使われる。例えばNTT Bフレッツのシステムでは、局内では8連の1×4スプリッタや4連の1×8スプリッタが使われている。局外では、1×4, 1×8スプリッタが使われている。また、このシステムではケーブルの監視・保守のため、WINCを通して監視光をシステム内に挿入する光監視システムを世界に先駆けて導入している^{2), 3)}。

また、現在標準的な100 MbpsのPONシステムから、将来G-PONやGE-PON (giga ethernet-PON) などに移行した場合、映像配信も光ファイバを通して行うことも可能になり、その場合波長により、IP信号と映像信号を分岐するWDMの機能を持った部品も必要になる。

更に海外においても、同様にブロードバンドサービスが伸びており、FTTHシステム導入のためのフィールド試験が始まっている。数年のうちには海外においても、FTTHシステムが普及し始めると予想されるため、今後FTTH関連の光部品は

大きな伸びが期待されている。

ところが、FTTH用光部品は、従来主流であった幹線系のシステムに使われる光部品とは違い、大量に使われるものの非常に低価格が要求される。

そこで、今回我々は、FTTH用光部品を作製するのに適したPLC技術を用いて、PLCチップの開発を行った。PLC技術は、半導体プロセスのようにシリコンや石英の基板上一括して回路を作製できるため、一度に多くのチップを安価に提供することが可能である。作製プロセスは、ガラス膜の形成は火炎堆積法 (flame hydrolysis deposition: FHD) 法を用い、コアのチャンネル化はレジストと光学的マスクを用いて、パターン付けを行い、それをRIE (reactive ion etching) を用いてドライエッチングすることで行った。更に、このチップに適した高信頼性で低価格なモジュール開発を行った。

本稿では、FTTH用部品として、NTTのBフレッツシステムで使われている部品であるWINC³⁾と8連の1×4及び1×8, 1×16スプリッタについて報告する。他のFTTH用製品である1×32スプリッタやWDMカップラについても、PLC技術を用いて開発を進める予定である。

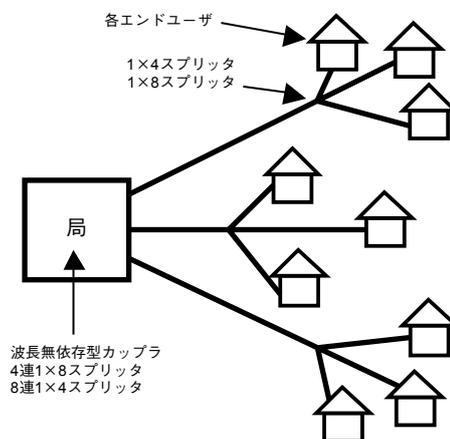


図1 Passive optical networkシステム
Passive optical network system

* 情報通信カンパニー 光コンポーネント部
*² 研究開発本部 ファイタルフォトリクス研究所

2. FTTH用PLCチップ

FTTH用に開発したPLCチップとして、今回はWINCとスプリッタチップについて説明する。

2.1 WINC

WINCとは、NTT局内で使われる線路監視用のシステムに使われる部品で、1.3 μm帯、1.55 μm帯でほぼ同じ分岐比を持つカップラである。その回路構成を図2に示す。2つの方向性結合器(directional coupler: DC)と位相シフタによりマッシュェンダ干渉計を構成している。2つの方向性結合器のギャップ、長さ及び位相シフタ部の導波路長差を調整することにより、1つの方向性結合器の波長依存性を打ち消し、広帯域でほぼ等しい結合効率が得られる。図2において、Port Aから入射された光がPort Cから出る光のパワーを P_C 、Port Dから出る光のパワーを P_D とすると、結合効率 R は、式(1)のように定義される。

$$R = \frac{P_D}{P_C + P_C} \quad (1)$$

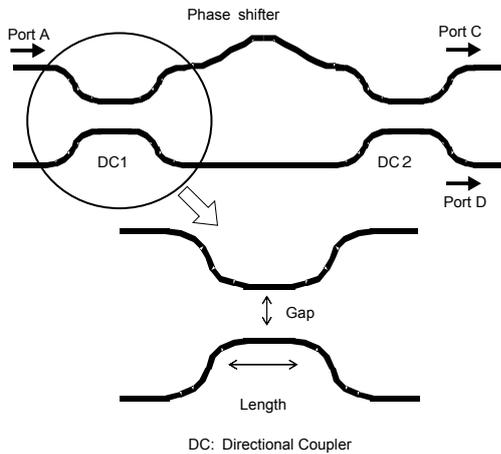


図2 WINCの回路構成
Circuit configuration of WINC

2.1.1 WINCの設計

FTTH用部品は、低価格が必須であるため、高歩留まりが必要とされる。そこで、プロセスの変動に対して、結合効率が安定な設計を行った。

ここで、位相シフタにより生じる位相差を 2ϕ 、DC1の結合効率を位相表示したものを θ_1 、同じくDC2の結合効率を位相表示したものを θ_2 とすると、結合効率 R は式(2)のように表せる³⁾。

$$R = \cos^2(\phi) \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + \sin^2(\phi) \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

この式の第一項は、設計において位相シフタの位相を適当に選ぶことで、第二項に比べ非常に小さくできる。この場合、結合効率 R の変動を考えるには、第二項のみ考えれば良い。 ϕ は位相シフタの長さで決まる量で、パターン付けに用いるマスクの精度で決まるため、変動しないと考えられる。 θ は方向性結合器のギャップ(gap)と長さ(length)の関数であるが、長さは

マスクの精度により決まるので、変動しない。したがって、設計の段階において考慮するのは、方向性結合器のギャップのばらつきであることがわかる。

ギャップは、エッチングのばらつき、上部クラッドの埋め込みの条件により変化するが、我々のプロセスの経験上、次のようなことがわかっている。2つの方向性結合器のギャップを G_1, G_2 その変動量を $\Delta G_1, \Delta G_2$ とすると、 $G_1 \neq G_2$ の場合は、 $\Delta G_1 \neq \Delta G_2$ になる場合が多く、逆に、 $G_1 = G_2$ の場合には $\Delta G_1 = \Delta G_2$ になる場合が多い。

したがって、2つの方向性結合器のギャップが等しい場合には変化量がほとんど同じなので、式(2)の第二項にある $(\theta_1 - \theta_2)$ の変化は少なくなると考えられる。

このことを確かめるため、計算を行った。図3には、 $G_1 = G_2$ の場合と $G_1 \neq G_2$ の場合それぞれについて、 $\Delta G_1 = \Delta G_2$ を仮定し、横軸に $\Delta G_1 (= \Delta G_2)$ を、縦軸に狙いの結合効率21%に対しての変動量を示した。ここで、 $G_1 = G_2$ の場合のほうが、 $G_1 \neq G_2$ の場合より変動量が小さいことがわかる。また、図4には、 $G_1 \neq G_2$ の場合に起こりうる変動を考慮して、 $\Delta G_1 = \Delta G_2$ を保持して変化する場合と、 $\Delta G_1 = 0, \Delta G_2$ のみ変化した場合に関して、図3と同様に横軸に ΔG_2 、縦軸に結合効率の変動量を示した。両者は逆の動きになっており、このことから、ギャップが異なる設計($G_1 \neq G_2$)では、特性を安定させるのが難しいことがわかる。

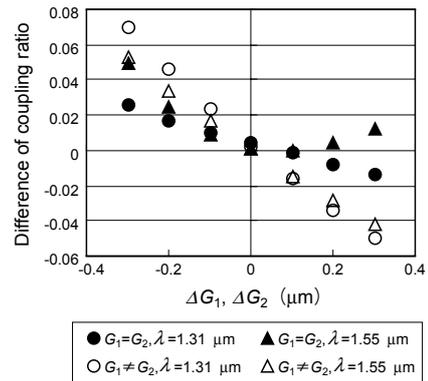


図3 等ギャップDCと異ギャップDCを持つWINCの結合係数の変化
Coupling ratio variation of WINC with same and different DC gaps

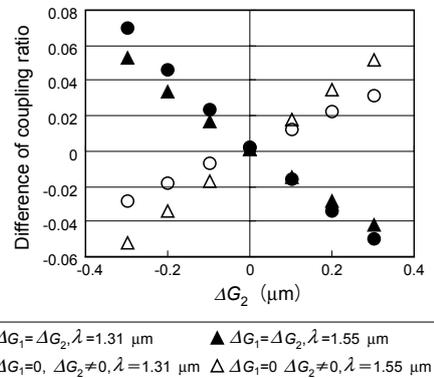


図4 異ギャップDCを持つWINC結合係数の変化
Coupling ratio variation of WINC with different DC gap

2.1.2 WINCの作製結果

このような設計段階での考察に基づき、 $G_1=G_2$ の条件で広帯域で結合効率が一定になるような設計を行い、実際にWINCを作製した。比較のために、 $G_1 \neq G_2$ の条件で設計したWINCも作製した。図5、6に結果を示す。波長1.31 μm 及び1.55 μm 両波長帯域で、 $G_1=G_2$ の条件で作製したWINCの結合効率のばらつきが非常に小さいことがわかる。

また、図7には設計した波長特性と実際に作製した波長特性の比較を示す。設計と作製結果が非常に良く一致しており、設計どおり作製できている。

以上のように、プロセスのばらつきがあっても、高歩留まりのWINCを製造できる設計を行い、高歩留まりを実現した。なお、このチップをモジュール化し、信頼性に付いても問題ないことを確認した。

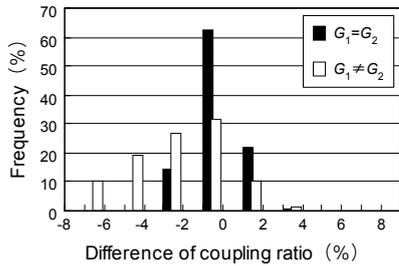


図5 結合効率の分布の比較 ($\lambda=1.31 \mu\text{m}$)
Comparison of coupling ratios ($\lambda=1.31 \mu\text{m}$)

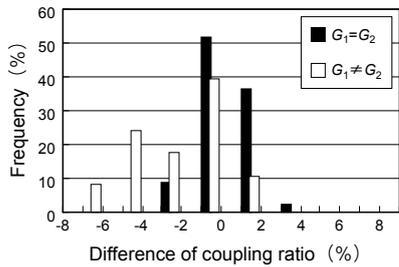


図6 結合効率の分布の比較 ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)
Comparison of coupling ratios ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)

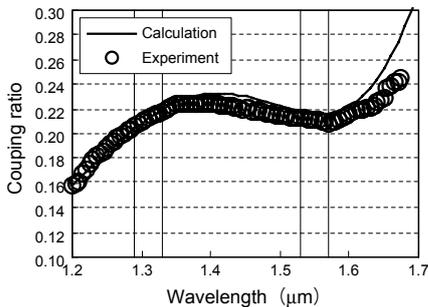


図7 結合係数の波長依存性
Wavelength dependence of coupling ratio

2.2 スプリッタ

スプリッタは、PONシステムにおいて、必要不可欠なデバイスであり、加入者の状況やケーブル長により、 1×4 、 1×8 、 1×16 、 1×32 などの種類のスプリッタが使われる。特性としては、挿入損失 (insertion loss)、偏波依存性 (polarization

dependent loss: PDL) が非常に小さいことが求められる。屋外で用いられることも多いため、温度や湿度による変動も少なくする必要があります。また、PLCは複数のデバイスを一括で形成できるため、上述のスプリッタを複数以上集積化したもの (4 連の 1×8 、 8 連の 1×4) なども使われている。

2.2.1 スプリッタ作製方法の開発

今回、FTTH用スプリッタを開発するにあたって、当社では従来より実績のあるシリコン基板^{4),5)}ではなく、より小さいPDLが期待できる石英基板を選択し、開発を行った。

開発の手順としては、石英基板をアンダークラッド膜として使用でき、かつ損失の少ないコア膜を作製できるように、FHDにおけるガスの流量、ガラス化の温度などの条件を最適化した。コアチャネルエッチング条件やオーバークラッド膜の形成条件も見直し、損失の少ない導波路を作製する条件を求めた。最終的に、数種の回路パターンで試作を行い、特性の良いスプリッタを作製できる条件を導出した。

図8に、従来のシリコン基板を用いたときと石英基板を用いたときの4連の 1×8 スプリッタのPDLの比較を示す。石英基板を用いた場合のほうが、絶対値もばらつきも非常に小さくなっていることがわかる。

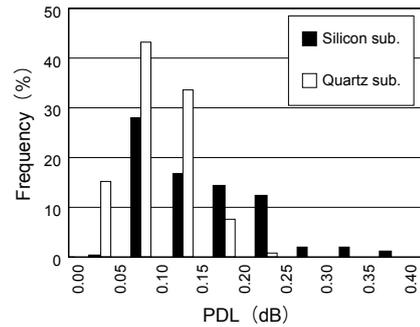


図8 4連 1×8 スプリッタのPDL分布 ($\lambda=1.31 \mu\text{m}$)
Insertion loss distribution of 4x (1x8) splitter

2.2.2 スプリッタ作製結果

このプロセス条件を用いて、8連の 1×4 、 8 連の 1×16 のスプリッタを開発した。

8連の 1×4 では、すべてのポート ($n=2080$) の挿入損失の平均と標準偏差が1.31 μm 帯で6.5 dBと0.16 dB、1.55 μm 帯で6.5 dBと0.13 dB、PDLの平均と標準偏差が1.31 μm 帯で0.06 dBと0.03 dB、1.55 μm 帯で0.05 dBと0.03 dBであり、非常に良好な結果であった。

図9、10には試作した 1×8 スプリッタの挿入損失、PDLを示す ($n=2008$)。挿入損失の平均と標準偏差が1.31 μm 帯で9.7 dBと0.23 dB、1.55 μm 帯で9.9 dBと0.19 dB、PDLの平均と標準偏差が1.31 μm 帯で0.13 dBと0.05 dB、1.55 μm 帯で0.07 dBと0.07 dBであり十分低い値が得られている。図11には、挿入損失の波長特性を示す。波長特性も1.31 μm 帯から1.55 μm 帯まで広い範囲で低損失が得られている。

図12、13には、試作した 1×16 スプリッタの挿入損失、PDLを示す ($n=368$)。挿入損失の平均と標準偏差が1.31 μm 帯で12.8 dBと0.21 dB、1.55 μm 帯で12.8 dBと0.18 dB、PDLの平均と標準偏差が1.31 μm 帯で0.13 dBと0.06 dB、1.55 μm 帯

で0.09 dBと0.04 dBであり、実用上十分低い値が得られている。今後更に低損失、低PDLを目指し改良を続ける。

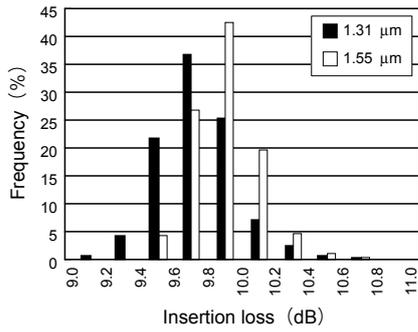


図9 1×8スプリッタの挿入損失分布
Insertion loss distribution of 1x8 splitter

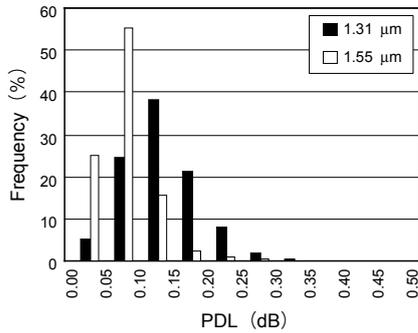


図10 1×8スプリッタのPDL分布
PDL distribution of 1x8 splitter

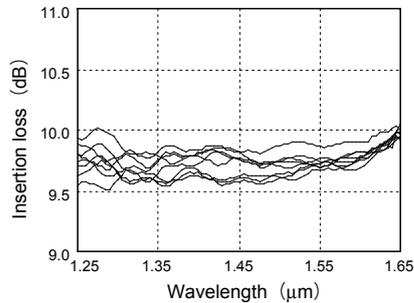


図11 1×8スプリッタの挿入損失の波長依存性
Wavelength dependence of insertion loss for 1x8 splitter

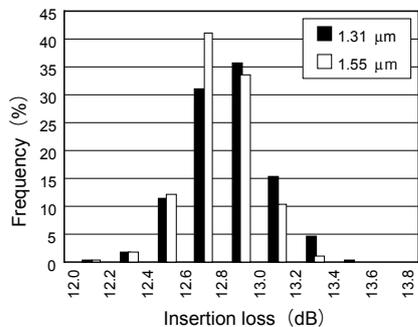


図12 1×16スプリッタの挿入損失分布
Insertion loss distribution of 1x16 splitter

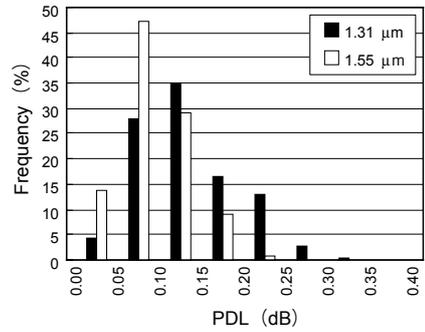


図13 1×16スプリッタのPDL損失分布
PDL distribution of 1x16 splitter

3. PLCモジュール

今回開発したチップを用いて、モジュール化を行い特性を確認した。モジュールのサイズは、当社標準として2種類ある。一つは1×4、1×8、1×16スプリッタ向けに、融着補強スリーブとほぼ同等のサイズである3.9 mm×3.9 mm×L (mm) (Lは1×4では38.0 mm, 1×8では41.5 mm, 1×16では50.0 mm)の小型モジュールであり、もう一つは1×32スプリッタ、8連の1×4スプリッタ向けの8.0 mm×6.4 mm×76 mmのサイズの通常モジュールである。前者の小型サイズモジュールは、収納スペースが少ないクロージャ等の収納に適している。図14には、小型サイズのモジュールの写真を示す。モジュール化の方法は、ガラスV溝を用いて高精度にファイバを配列したファイバアレイとチップを光学部品用UV接着剤で接着を行い、周囲の環境から接着部を保護するため、全体をケースの中に収納する。ファイバアレイとチップの端面は、光学的に損失、反射が起きないように処理を行なっている。今回開発したチップも上記モジュールサイズのどちらかに収納できるようなサイズであり、上記方法で、1×8スプリッタチップは小型サイズで、8連の1×4スプリッタチップは通常サイズでモジュール化を行った。モジュール特性としては、チップ特性から予想される通りの挿入損失、PDLの値で良好であり、反射損失についても1×8スプリッタモジュールでは平均55.6 dB、8連の1×4スプリッタモジュールでは平均56.4 dBと良好な結果であった。その他、温度変動(−40℃/85℃)での損失変動も±0.1 dB以内と十分な信頼性を有している。



図14 1×8小型スプリッタモジュール
Compact 1x8 PLC splitter

表1 信頼性試験結果
Reliability test results

Test	Conditions	Time	Max loss deviation (dB)	Pass/Fail
Temperature-humidity cycling	- 40 to +85°C, 10% to 80%RH	42 cycle	0.07	Pass
Water immersion	+43°C, pH 5.5	168 h	0.11	Pass
Fiber and cable retention	0.45 kg, 5 s, 3 times		0.19	Pass
Mechanical shock	5 times, 6 directions, 500G, 1 ms		0.10	Pass
Vibration	20G, 20 ~ 2000Hz 4 min/cycle 4 cycle/axis		0.09	Pass
Damp heat (non-hermetic)	85°C / 85%RH	2000 h	0.23	Pass
Low temperature storage	- 40°C	2000 h	0.19	Pass
Temperature cycling	- 40 to +85°C	500 cycle	0.22	Pass

4. 信頼性試験

通信システムで使われる部品は長期信頼性が非常に重要であるため、信頼性試験はシリコン基板を用いたPLCも石英基板を用いたPLCについても行った。本稿では、石英基板を用いた8連の1×4スプリッタの信頼性について報告する。

信頼性試験はチップ単体の試験としてプレッシャークッカーテスト (pressure cooker test) を120°C /100%RH/100 hの条件 (85°C /85%RH/8000 hに相当する) で行い、外観のひび、割れ等のないことを確認した。また、テスト前後での挿入損失及びPDLの変化も±0.1 dB以内の変化であり、チップの高信頼性を確認した。

また、モジュール化したPLCについてもTelcordia GR-1221, GR-1209に準拠した信頼性試験を行ったので、結果を表1に示す。いずれの試験にも合格し、高い信頼性を持っていることを確認した。図15には、代表的な試験として、高温高湿試験 (85/85%RH/2000 h) における336時間、1000時間、2000時間経過後の損失変動を示した (n=13)。1モジュール32ポートの損失変動のうち、最も損失の増加したポートの値を示している。どの時点においても、特性が安定しており、高温高湿下で、高い信頼性を持っていることがわかる。

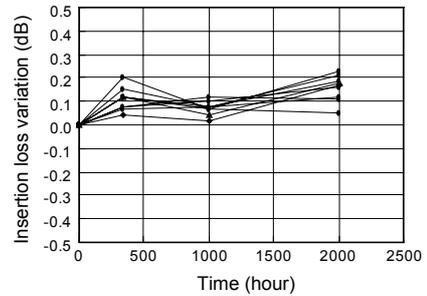


図15 高温高湿試験 (85°C /85%) での8連の1×4スプリッタモジュールの挿入損失の変化
Insertion loss variation of 8x (1x4) splitter module during damp heat test

5. おわりに

FTTH用製品として、PLC技術を用いてWINC及び1×4, 1×8, 1×16スプリッタを開発した。すべて、良好な特性であり、歩留まりも高く製造できる可能性を確認した。信頼性試験の結果も良好であり、製品としての開発を終了した。今後も、この技術を応用し、他のFTTH用製品である1×32スプリッタ、WDMカップラ等の製品の開発も進める予定である。

参考文献

- 1) 「インターネット接続サービスの利用者数等の推移」, 総務省報道資料 (H16.3.31)
- 2) 榎本他: '97信学総合大会, SB - 8 - 7
- 3) K. Jinguji et al.: J. Lightwave Technology, **14**(1996), 2301.
- 4) 奈良他: '97信学ソサイエティ大会, C - 3 - 95
- 5) 根角他: '99信学ソサイエティ大会, C - 3 - 41