

高出力対応PLC型ポンプコンバイナの開発

Development of High-Power Durable PLC-Type Pump Combiner

瀬尾 浩司*

Koji Seo

岩屋 光洋*

Mitsuhiro Iwaya

椎野 雅人*

Masato Shiino

田中 完二*²

Kanji Tanaka

概要 ラマン増幅及びDWDM用高出力光アンプに使用する1410 nmから1510 nmにわたる15波長の半導体励起レーザを一括で合波することができるPLC型ポンプコンバイナを開発した。本モジュールは、1 THz間隔という狭い波長間隔にも関わらず低挿入損失(最大2.0 dB以下)を実現した。更に、PLCとファイバの接続には接着剤を使用せずMTコネクタ構造のPC (Physical Contact) 接続とすることで、1.2 W以上の高出力光においても安定した特性を示した。

1. はじめに

ここ数年、光通信ネットワークは波長分割多重(WDM)技術の進展とその導入によって大容量化を急速に進めて来た。現在は北米におけるIT市場の過剰投資及びその崩壊による景気低迷の影響で、幹線系ネットワークにおける高速・大容量化は停滞しているが、中長期的かつ世界的に見た場合、アクセス系のブロードバンド化が進めば通信トラヒックは確実に伸長すると予想されており、一旦止まっている感がある光通信ネットワークの構築機運も上昇気流に乗ると期待されている。

これまでのWDM技術はエルビウム添加ファイバアンプ(EDFA)の利得帯域に多くの信号波長を詰め込むことで成功してきた。ただし、EDFAにおいては波長多重数が増えると高出力励起光源が必要となる¹⁾²⁾。それに加え最近では、EDF増幅の帯域外で光増幅を行うことができるラマン増幅が注目されている。ラマン増幅は1970年代から盛んに実験が行われてきたが、数百mWという励起光が必要あることから実用化は不可能であった。しかし、EDFAの進歩で半導体レーザも同じく進歩したことで実用化が可能となった。EDF増幅はエルビウムイオンのエネルギー準位によって利得波長帯が決まるのに対し、ラマン増幅は励起光の波長によってこれが決まるという特徴を持つ³⁾。そのため、励起光波長を選ぶことによって任意の波長帯を増幅でき、さらには励起光を波長多重し帯域を拡大することによりEDF増幅では成し得ない利得の広帯域化が可能となる⁴⁾⁵⁾。

ラマン増幅は1500 nm付近では励起光から約110 nm長波長側にて利得が発生するので、1450 nmの周りで100 nmの帯域にわたる励起光源の波長多重を行うことにより、信号光は1560 nmの周りで100 nmの広帯域で増幅される。更に励起光

の波長数を増やすことにより、広帯域に渡る利得のより一層の平坦化が可能となる。

一方で、増幅器内及びその周辺で使用される光部品においては耐高出力特性が重要な課題となっている。例えば、光コネクタの接続端面にゴミが付着した場合には端面が焼けることもあり⁶⁾、また光部品の接続部に接着剤が介在する場合にも接着剤の光吸収による発熱が部品の性能を劣化させることもある。

本稿では、ラマン増幅及びDWDM用高出力光アンプに使用する1410 nmから1510 nmにわたる15波長の半導体励起レーザ(LD)を一括で合波可能な、高出力耐久性のあるPLC(Planar Lightwave Circuit)型ポンプコンバイナを開発したので報告する。

2. PLC型ポンプコンバイナ

2.1 構成

今回開発した15波用PLC型ポンプコンバイナの外観を図1に示す。波長合波器には火炎堆積法に基づいた石英系ガラス集積回路(PLC)の技術を用いており⁷⁾、幅10 mm、高さ8 mm、長さ130 mm、入力側は8心テープ心線2本、出力側は0.25 mm単心ファイバの形状となっている。

本開発品で使用しているPLCの構成を図2に示す。14個のマツツェンダ(MZI)干渉計が一つのシリコン基板上に集積されており、波長配置はラマン増幅における利得の平坦化に適

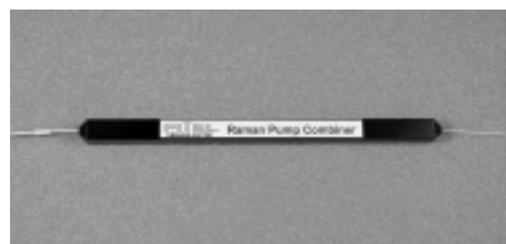


図1 15波用PLC型ポンプコンバイナの外観
Appearance of 15-wavelength PLC-type pump combiner

* ファイナルフォトニクス研究所 光部品開発部

*² ファイナル製品事業部 光コンポーネント部

するよう、1410 nm から 1510 nm の 100 nm に渡り約 7 nm 間隔の狭いピッチで設定されている。

15 波用 PLC 型ポンプコンバイナをラマン増幅器に適用した場合、15 波長を一括で合波することが可能であるため、溶融型ファイバコアブラや誘電体多層膜を使用して励起光を合波するよりも装置構成を簡略化及びコンパクト化できる^{8)~10)}。

2.2 高出力耐久性に対する要求

図 3 に、ラマン増幅器で使用される広帯域高出力励起光源 (High-power pumping unit; HPU) の一例を示す。従来の PLC 型合波器は容易に低ロス化が可能ないように PLC とファイバの接続には、ファイバアレイを使用した調心接続が可能ないボンディング方式をとっていたため³⁾、200 mW を越える光パワーを入力すると接続部損失、若しくは接着剤の光吸収による発熱により接続損失が変動することがあり耐高出力特性に問題があった。現在のラマン増幅器における 1400 nm 帯半導体励起レーザ (LD) の高出力化を考えると、LD1 個あたりの出力が最大 300 mW に達する場合の部品保証が必要である。今回の PLC 型ポンプコンバイナに関していえば、LD2 個が偏波合成モジュール (PBC) により合成されることもあるので、入力 (多心) 側に関しては 1 ポートあたり 600 mW の保証が必要である。ラマン増幅において励起光を偏波合成するのは、単に高出力化という目的以外に、利得の偏波依存性解消の意味もある。また、出力 (単心) 側に関してはラマン増幅で使用する場合、利得を平坦化するためにはすべてのポートで LD が最大パワーとなることはなく、当面 3 W を保証すれば十分である。

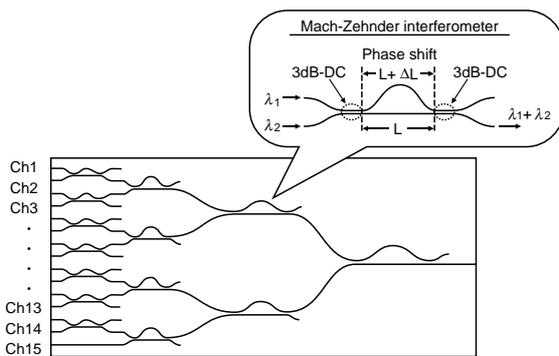


図 2 15 波合成用 PLC の構成
Schematic of 15-wavelength PLC

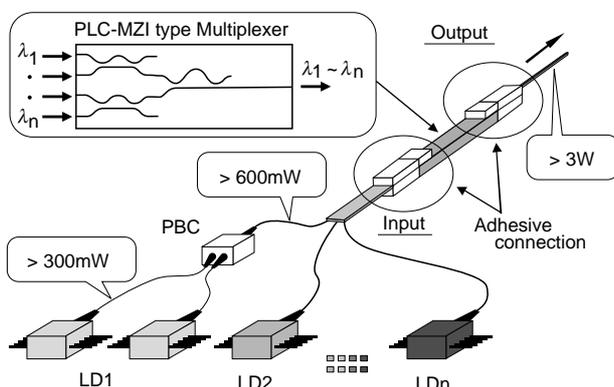


図 3 ラマン増幅器用広帯域高出力励起光源
HPU for Raman amplifier

3. 構造

今回我々は PLC 型ポンプコンバイナの接続部を MT コネクタ構造とし、通光部に接着剤が介在しない PC 接続でかつその低損失化を図ることにより、耐高出力特性に優れたモジュールを開発した。15 波用 PLC 型ポンプコンバイナの構造を図 4 に示す。PLC の入力端及び出力端には MT コネクタとの接続が可能ないようにガイド穴を形成した MT 互換フェルールを取り付ける。PLC と MT 互換フェルールとの組み立ては、双方に各々サブミクロンの精度で形成された V 溝を位置合わせすることにより行われ、これにより接続損失が低減されている。出力側の接続には 1 心 MT コネクタを、入力側の接続には 15 心 MT コネクタを使用することで、MT コネクタ同士の接続と同様にガイドピンを使用した無調心接続構造となっている。

MT コネクタと PLC との接続部断面を図 5 に示す。入力側、出力側ともに同構造であり、接続端面は各端面とも 8° に斜研磨され、PLC 側は斜平面に MT コネクタ側はファイバが数ミクロン突き出すように斜研磨されている。これらをクリップで加圧接続することにより、PC 接続構造を実現している。

4. 光学的特性

4.1 PC 確認

耐高出力接続における課題として、接着剤以外にも接続端面に付着したゴミにより端面破壊が発生し得ることは前述したとおりであるが、この問題に関しては製造工程における十分な検

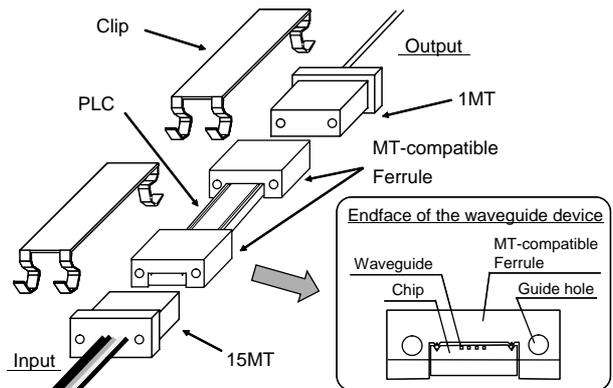


図 4 15 波用 PLC 型ポンプコンバイナの構造
Structure of 15-wavelength PLC-type pump combiner

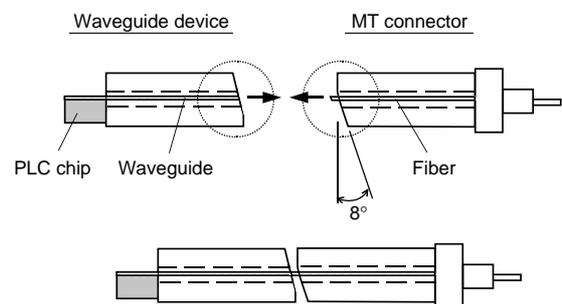


図 5 接続部断面
Cross section of the connection

査により防止できる。今回のモジュールに関して最も重要なのは、PC外れを起こすと多重反射による発熱及び端面溶融が起こり得るという点である。したがって、導波路とファイバコアは確実にPCさせる必要がある。今回、MTコネクタ及びPLC端面のジオメトリとクリップの設計を最適化することにより図6に示す特性を得た。図6は屈折率整合剤なしで接続した際の接続損失を測定した後、その接続状態を維持したまま接続部に粘度の低い屈折率整合剤を流し込んだ際の接続損失を測定し比較したグラフである。PCが不十分で導波路とファイバコアとの間に微量の隙間がある場合には、その隙間を屈折率整合剤が埋めるため接続損失が良くなる。しかし実験結果においては整合剤の有無によって接続損失に差はなく、すなわちすべてのポートにおいてPCしていることを示している。

4.2 接続損失

耐高出力接続においては、接続損失もまたモジュール特性劣化の要因となる。光パワー損失は熱エネルギーへと変換されるため、接続損失が大きいと非常に高温となり周辺材料の耐熱温度を越え損失変動を引き起こす。そこで我々は、フェルルールを形成するエポキシ樹脂の耐熱性を考慮して接続損失0.3 dB以下を目標とした。

接続損失の測定結果を図7に示す。平均接続損失は0.29 dB、最大0.54 dBとなり、実験結果は入力側と出力側の2接続分の接続損失を含んでいるので、入出力の構造が全く同じことを考慮すると1接続あたり平均0.15 dB、最大0.27 dBとなり目標値を達成した。

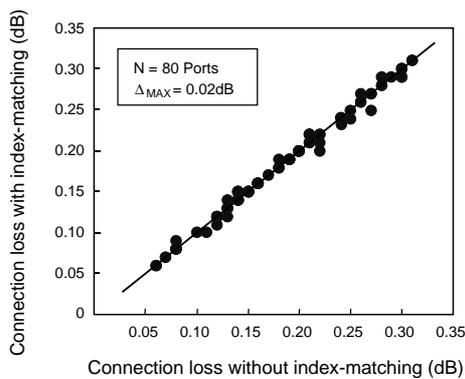


図6 PC確認結果
Test of Physical Contact (PC)

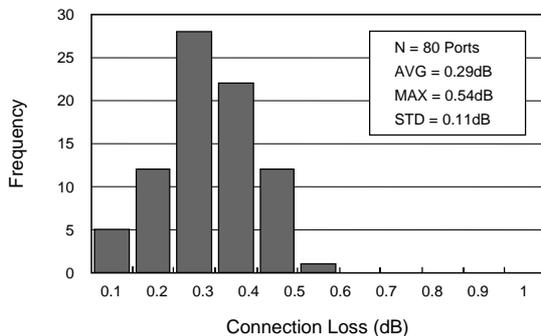


図7 接続損失（入力側と出力側の2接続分）
Connection loss without index-matching

4.3 モジュール特性

15波用PLC型ポンプコンバイナのスペクトラムを図8に示す。すべてのポートにおいて挿入損失1.5 dB程度となっており、誘電体多層膜型合波器を使用して15波を合成した場合と比較して遜色のないレベルになっている。

なお、反射減衰量に関してもすべてのポートにおいて50 dB以上を達成している。

5. 信頼性

5.1 機械試験及び環境試験

Telcordia GR1209及びTelcordia GR1221の試験結果を表1に示す。すべてのサンプルにおいて損失変動0.2 dB以下、波長変動0.2 nm以下であり良好な特性を得た。

5.2 高出力耐久性

耐高出力特性評価系を図9に示す。光源は中心波長1480 nmの3 Wレーザを使用し、入力側の高出力耐久性600 mWを保証

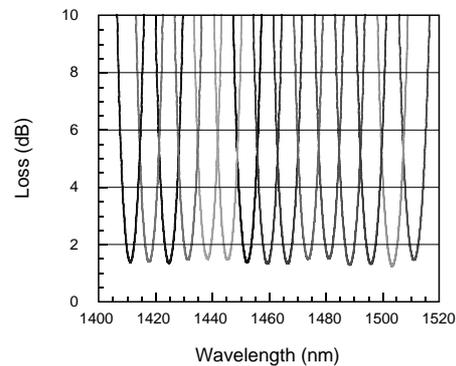


図8 スペクトラム
Spectrum

表1 信頼性試験結果
Results of reliability test

Category	Test	Criteria	Status
Telcordia GR1209-CORE	Temperature-humidity cycling	Loss change <0.2 dB	Pass
	Temperature-humidity aging		Pass
	Vibration		Pass
	Impact	Wavelength change <0.2 nm	Pass
	Cable retention		Pass
Telcordia GR1221-CORE	Temperature cycling		Testing
	Damp heat		Testing

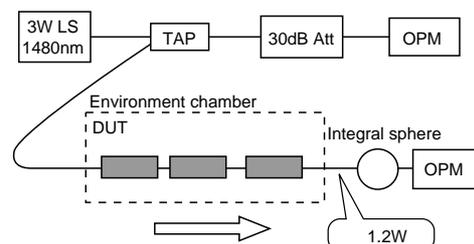


図9 耐高出力特性評価系
Setup for high-power tests

表2 高出力耐久性
High-power durability

Category	Test	Criteria	Status
High-power durability 1.2 W	Room-temperature	Loss change <0.2 dB Wavelength change <0.2 nm	Pass
	Temperature-humidity cycling Telcordia GR1209-CORE		Pass
	Temperature-humidity aging Telcordia GR1209-CORE		Pass
	Temperature cycling Telcordia GR1221-CORE		Testing
	Damp heat Telcordia GR1221-CORE		Testing

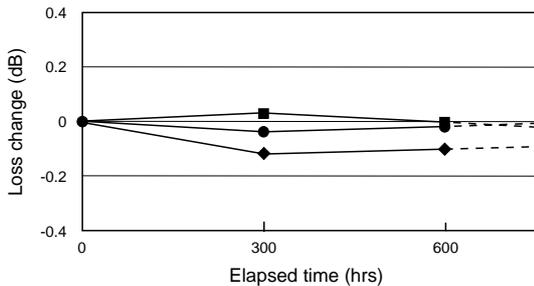
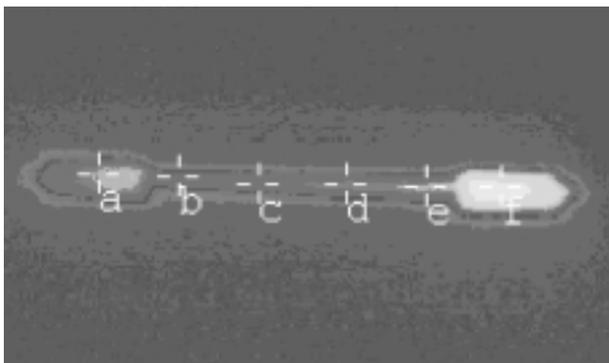


図10 高出力下における挿入損失変動 (85 /85%)
Insertion loss change under high-power input, 85 /85%



	a : Input port	f : Output port
Connection loss	0.37 dB	0.72 dB
Room temp.	24.5 °C	24.5 °C
Temp. under 3 W	31.0 °C	33.0 °C
Temp. change	+6.5 °C	+8.5 °C

図11 サーモビューア観察結果 (3 W)
Thermo-viewer observation at 3 W input power

するため2倍の1200 mW以上のパワーで評価した¹¹⁾。評価結果を表2に示す。長期試験に関しては発熱の影響が最も懸念されるため、より厳しい条件である高温高湿 (85 /85%) 環境下での耐高出力試験を実施中である。経過は図10に示すとおり良好である。

出力側の3 Wを保証する試験に関しては、3 Wの高出力光を試しに10分間入力してみたが問題はなかった。更に、接続部の発熱温度を測定した結果を図11に示す。接続損失のやや大

きいサンプルを使用したにもかかわらず、接続部の温度上昇は10 以下であった。長期試験に関しては別途計画中であるが、以上の結果より問題なくクリアできると予測している。

6. おわりに

今回我々は、特にラマン増幅用を目的とし耐高出力特性に優れた1400 nm帯の励起光を15波合成可能なPLC型ポンプコンバイナを開発した。PLCとファイバの接続をPC構造とし、低接続損失化を達成することにより耐高出力特性を改善した。入力側に関しては1200 mW以上の高出力耐久性を確認し、出力側に関しては3 Wで初期的に問題がないことを確認した。今後、3 W保証のために2倍の6 Wで評価していく計画であるが、接続部の発熱が僅かであることから問題ないと予測している。

また、今回紹介したのは15波合成モジュールであるが、もちろん8波合成モジュールも同構造で開発可能である。

参考文献

- 1) G. R. Jacobovitz-Veselka, R. P. Espimola, C. Headley, A. J. Stentz, S. Kosinski, D. Inniss, D. Tipton, D. J. DiGiovanni, M. Andrejco, J. DeMacro, C. Soccolich, S. Cabot, N. Conti, J. J. Veselka, L. Grunur-Nielsen, T. Strasser, R. Pedrazzani, A. Hale, K. S. Kranz, R. G. Huff, G. Nykolak and P. Hansen, "A 5.5-W single-stage single-pumped erbium doped fiber amplifier at 1550nm," in Tech. Dig. OAA '97, Victoria, B.C. Canada, July '97, paper PD3.
- 2) Y. Tashiro, S. Koyanagi, K. Aiso and S. Namiki, "1.5W erbium doped fiber amplifier pumped by the wavelength division-multiplexed 1480nm laser diodes with fiber Bragg grating," in Tech. Dig. OAA '98, Vail CO, July '98, paper WC2.
- 3) R. H. Stolen, J. P. Gordon, W. J. Tomlinson, and H. A. Haus, "Raman response function of silica-core fibers," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 6, no.6, pp.1159-1166 (1989)
- 4) K. Rottwitt and H. D. Kidorf, "A 92nm bandwidth Raman amplifier," in Tech. Dig. OFC '98, San Jose CA, Feb. 1998, paper PD6.
- 5) Y. Emori, Y. Akasaka and S. Namiki, "Less than 4.7 dB noise figure broadband in-line EDFA with a Raman amplifier-1300 ps/nm DCF pumped by multi-channel WDM laser diodes," in Tech. Dig. OAA '98, Vail CO, July '98, paper PD3.
- 6) M. E. De Rosa, V. A. Bhagavatula, Q. Wu., K. Matusick, "High optical power testing of physical contact connectors at 1550nm," OFC'01, Technical Digest, Tu7-1.
- 7) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba and M. Kawachi, "Silica-based single-mode waveguides on silicon and their application to guided-wave optical interferometers," J. Lightwave Technology, 6, 1003 (1988).
- 8) K. Tanaka, T. Komatsu, K. Iwashita and S. Ozawa, "Low loss and thermally stable Mach-Zehnder-Interferometer-type eight-wavelength multiplexer for 1480 nm band pumping," OFC'99, Technical Digest, TuH5.
- 9) T. Watanabe, K. Iwashita, T. Ota and T. Yamazaki, "Direct core endface connection for coupling single-mode silica-based waveguides to a multifiber array," IEICE'99, Technical Report
- 10) K. Iwashita, T. Watanabe, Xu Jie, T. Yamazaki and T. Ota, "MPO-receptacle waveguide device realizing push-on/ pull-off fiber attachment to single mode waveguides," OFC'00, Technical Digest, Wm13-1.
- 11) M. Tsuyuki, T. Ota, K. Tanaka and T. Kimura, "High power test on highly reliable optical passive components for Raman amplifiers," OAA'02.