

2 芯型光モジュールの開発

An Optical Module for DWDM

松浦 寛*

Hiroshi Matsuura

渡辺泰弘*²

Yasuhiro Watanabe

香川昌義*

Masayoshi Kagawa

風味 創*

Hajime Kazami

井田一美*²

Kazumi Ida

佐藤宣明*²

Nobuaki Sato

概 要 ラマン増幅，DWDM用高出力光アンプ及びADM (Add Drop Module) に使用するための2 芯型光モジュールを開発した。光学フィルタ素子とファイバの結合系を最適化し共通プラットフォームを作ることによりフィルタの過剰損失を除き挿入損失平均0.2 dBを実現した。また，アイソレータを組み込むことも容易に出来るため，多様化するシステムに対応することも可能である。

1. はじめに

1990年代始めに，エルビウム添加ファイバアンプ (EDFA) が実用化され，光通信技術が飛躍的に向上した。それと時期を同じくして，北米を中心としたインターネットが全世界に爆発的な勢いで普及が始まったことで，更なる大容量化が必要となった。幸にも，エルビウム添加ファイバ (EDF) の利得帯域が広がったため，伝送速度を上げる技術より，この利得帯域にできるだけ多くの信号波長を詰め込む波長分割多重 (WDM) 技術が急速な勢いで進歩した。WDMのキーとなる増幅技術は，光ファイバの伝送損失が小さく，利得平坦化の容易な1550 nm帯からスタートし1530 nm帯をカバーし，最近では利得の小さい1580 nm帯や1500 nm帯までも帯域が拡大してきた。それに合わせて，EDF増幅帯域外で光増幅を行うことが出来るラマン増幅も注目されはじめ実用化に入りつつある。同時に次世代光通信システムが要求する高密度化，広帯域化・波長多重化，高出力化，拡張容易性などに対応するためのモジュール開発も活発に行われている。その中でも2 芯型光モジュールは使用される誘電体多層膜フィルタ (以後フィルタ) の特性を変えるだけで，ラマンアンプ用の波長合波，多重化された信号光の波長合成分波，励起光と信号光の波長合波用など非常に用途が広がるモジュールであり，個々の用途に応じて柔軟に構成を変更できる設計の自由度が必須となっている。

本稿では，基本となる2 芯部分の性能を向上させ，設計変更の自由度が高く，低挿入損失でかつ耐パワー性の優れた2 芯型光モジュールの開発を行ったので報告する^{1)~7)}。

2. 2 芯型光モジュール

2 芯型光モジュールの基本構成を図1に示す。2本のシングルモード光ファイバSMF1とSMF2，2 芯フェルル，第1レンズ，フィルタ，第2レンズ，単芯フェルル，シングルモード

光ファイバ (SMF3) から構成され (励起モジュールの場合はフィルタとレンズの間にアイソレータが入る) それぞれの部品はレーザー溶接，又は接着剤で固定されている。ただし，ワットクラスの光パワーの入力に耐えられるようにするため光路中には接着剤を使用しない構造となっている。

光線追跡の一例として， λ_1 反射， λ_2 透過のフィルタを用いた場合，2 芯フェルル側のSMF1に入射した波長 λ_1 の光は第1レンズでコリメートされフィルタで全反射する。反射した波長 λ_1 の光は再び第1レンズに入射集光されてSMF2に入る。つぎに単芯側のSMF3から入射された波長 λ_2 の光は第2レンズでコリメートされ光フィルタを透過し第1レンズで集光されファイバSMF2に入るようになっている。図2に光モジュールの外観を示す^{8)~10)}。

2.1 応用例

ラマンアンプにおける2 芯型光モジュールの使用例を図3に示す。波長コンバイナー1には，半導体レーザモジュール (LDM) の励起光1420 nmを反射して励起光1440 nmを透過するバンドパスフィルタ (BPF) が組み込まれている。したがって，励起光1420 nmと励起光1440 nmを波長合波することが出来る。同様に，波長コンバイナーモジュール2は励起光1460 nmと励起光1480 nmを波長合波する。更に波長コンバイナー1及び2で合波した励起光を波長コンバイナー3によって合波することで1420 nm，1440 nm，1460 nm，1480 nmの4つの励起光が合波される。つぎに，その合波された1420 nmから1480 nmの励起光を後方励起モジュールに入射する。後方励起モジュールには，励起光 (1400 nmから1500 nm) を反射して，信号光 (1525 nmから1570 nm帯) を透過するロングウェイブ

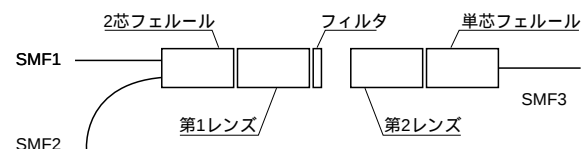


図1 2 芯型光モジュールの基本構成
Basic configuration of optical combiner module

* ファイナルフォトニクス研究所 WP チーム

² ファイナル製品事業部 光部品部

パスフィルタ（LWPF）が組み込まれているため励起光は、LWPFで反射されてEDFに入り、EDF側からアンプされた信号光は後方励起モジュールを通過し伝送される。

つぎに、Mux/Demuxユニットにおける使用例を図4に示す。各々の100 GHz - BPFは5キャビティー構造の誘電体多層膜フィルタで、ピーク波長から損失0.5 dBダウンの透過帯域幅が550 pmあり、その帯域内部での分散が小さいという特性を持つ。これらのフィルタは、フィルタのピーク波長を信号光の波長に合わせるために、光モジュールの設計によって決まるフィルタ入射角度に対して0.01度以下の入射角精度でスペクトルを測定し選別を行う。透過波形の実測値を図5に示す。8つの波長が混ざった信号光を光モジュール1の共通ポートに入射すると、BPF1は194.7 THzの信号波長を取り出し、残りの7つの信号波長は反射されて、光モジュール2の共通ポートに入射する。これを繰り返すことで各々の信号波長を取り出すDemuxユニットができる。また、逆方向から各々の信号波長を入れることでMuxユニットを構成することが出来る。

2.3 他方式との比較

まず、光モジュールに、ワットクラスの光パワーを入射すると一部の光が吸収されてモジュール温度が上昇する。結合損失が0.2 dBでも6ワットの励起光を入力するとパッケージ温度の上昇は10℃以上である。したがって、内部では更に高い温度になっていると考えられる。



図2 DWDMモジュールの外観写真
Appearance of DWDM Module

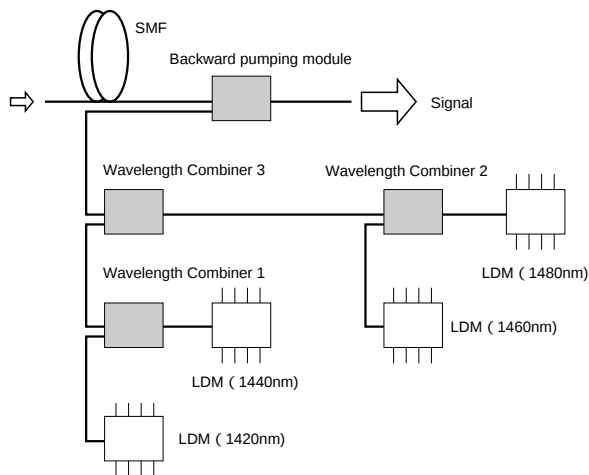


図3 ラマン増幅器の構成例
Schematic diagram of Raman amplifier, an application of combiner module

一般的に単純な構造で手軽に設計が出来るため、分布屈折率型レンズとファイバ端面を接着したコリメータを使用する方法がある。しかし、この方法は有機系接着剤を塗布する際に小さなゴミが混入すると、混入物が光を吸収して接着剤が焼ける場合がある。そのため溶接固定や半田固定によるエアギャップと比較すると耐パワー信頼性は明らかに低い。しかし半田固定方法も温度上昇により半田のクリープ現象が加速され損失増加する場合がある。それに対し本光モジュールはすべてレーザー溶

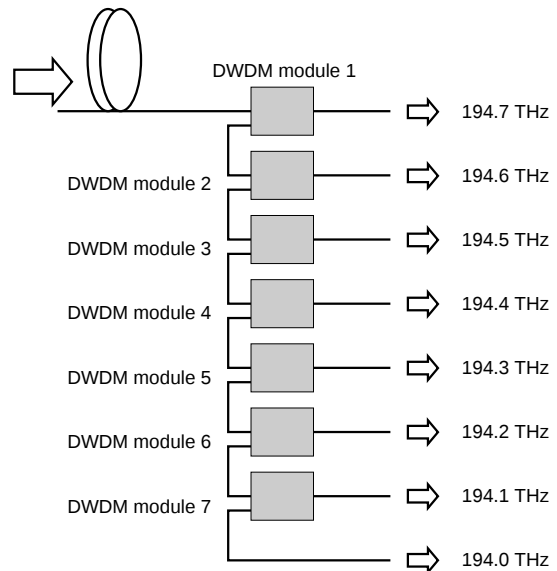


図4 ドロップユニットの構成例
Schematic diagram of ADM system, an application of DWDM module

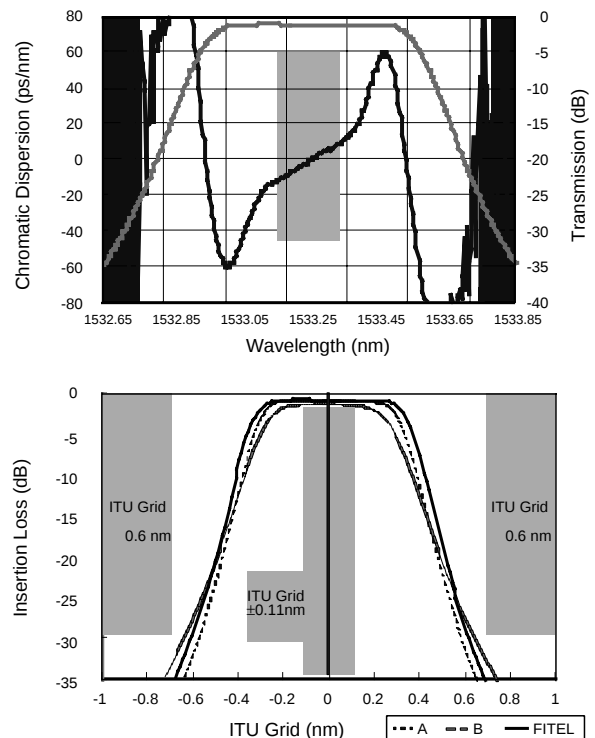


図5 100 GHz用2芯型光モジュールの透過波形 (a) と分散特性 (b)
Typical spectrum (a) and chromatic dispersion (b) of 100 GHz ADM module

接を行っているため、熱に対する挿入損失変動要因が少なく特性が安定している。光路に接着剤を使用していないので焼ける可能性もなく、ハイパワーに対して非常に信頼性が高い。

つぎに、100 GHz 以下の超狭帯域フィルタは膜厚制御を膜厚の 0.01 % 以下で行わなければ所望する透過波形が得られない。しかし同時に非常にわずかな膜厚のばらつきが存在するため、製膜後有効面内において透過波形を測定すると透過帯域幅と透過帯域中心波長がばらついている。本光モジュールに使用するチップを精密測定する技術を確認したため超狭帯域 BPF モジュールも容易に作成することが可能となっている。

3. 仕様

広帯域、低挿入損失であること、今後要求が強まる高出力化に十分耐えられること、を考慮し設計を行い、表 1 の基本仕様を定めた。

4. 製品特性

励起モジュール、波長コンバイナー、アイソレータ入り励起モジュール、偏波保持型励起モジュールのデータを元に、各々の光学特性について述べる。

4.1 挿入損失分布

信号光と励起光を合波する励起モジュールの全温度、全波長範囲、全偏光状態での SMF1 から SMF2 の挿入損失のヒストグラムを図 6 に、SMF3 から SMF2 の挿入損失のヒストグラムを図 7 に示す。図 2 外観写真にある 2 芯側の入射ポートは SMF1 に、共通ポートは SMF2 に、単芯側の入射ポートは SMF3 に相当する。本モジュールは非球面レンズを使用しているために反射側も透過側いずれも損失平均 0.2 dB、損失の分散が 0.03 dB と非常に低損失になっている。

表 1 2 芯型光モジュールの仕様
Specification of DWDM module

Operating Temp.	0 - 70°C	Notes
λ_{op}	1400 - 1620 nm	R, S, C, L-band
Insertion Loss	< 0.25 dB	@R.T., SOP, λ_c
	< 0.45 dB	@Top, SOP, λ_{op}
PDL	< 0.05 dB	@Top, SOP, λ_{op}
Directivity	> 60 dB	@Top, SOP, λ_{op}
Optical Power	< 3 W	@Top, SOP, λ_{op}
Return Loss	> 50 dB	@Top, SOP, λ_{op}

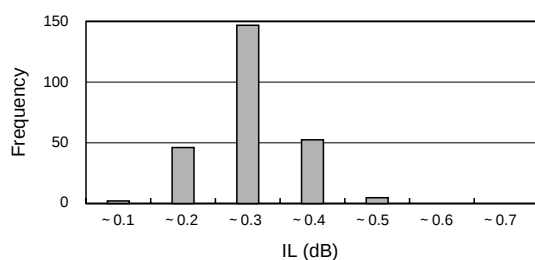


図 6 ラマン用コンバイナーの挿入損失ヒストグラム（ポート 1, 2）
Histogram of insertion loss

4.2 反射減衰量分布

信号光と励起光を合波する励起モジュールのポート 1 からポート 3 までを集計した反射減衰量のヒストグラムを図 8 に示す。消光比は仕様を十分満足しており、使用波長範囲において波長を変えて測定しても反射減衰量は同じ値である。

4.3 消光比

偏波保持型光増幅器に使用される光入出力に偏波保持光ファイバ (PMF) を用いた偏波保持型励起モジュールの信号光での消光比のヒストグラムを図 9 に示す。消光比は、光増幅器の増幅効率と挿入損失劣化に影響するので出来るだけ高い値にしなければならない。本モジュールに使用している 2 芯フェルルは全ポート PMF にしても消光比の劣化が起きにくい構造を取っている⁸⁾。

4.4 波長特性

アイソレータを組み込んだ励起モジュールの挿入損失の波長依存特性を図 10 に示す。一つのモジュールに信号波長範囲で 0.1 dB の損失の違いがあると、EDF を 4 段以上接続するような次世代通信システムの光増幅器は挿入損失の 0.4 dB 以上の波長依存性を持つことになり要求性能を満たさなくなる。そのため信号波長範囲で挿入損失が平坦なものでなければならない。本モジュールは信号波長の挿入損失の平坦性を 0.05 dB 以下に抑えるよう設計している^{9)~10)}。

4.5 ハイパワー特性

ラマン用の波長コンバイナーの場合、1 W 以上の励起光が入力されることがある。本モジュールは高温高湿槽に 12 台のモジュールを接続し励起光波長 1480 nm の光を 3 W 入力して 1000 時間試験を行った。各モジュールの試験前後の挿入損失劣化は 0.1 dB 以下であった。

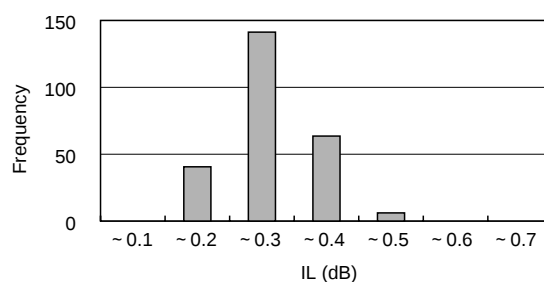


図 7 ラマン用コンバイナーの挿入損失ヒストグラム（ポート 2, 3）
Histogram of insertion loss

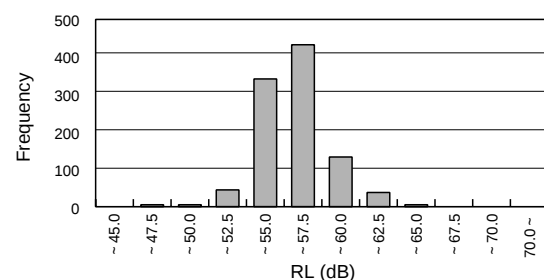


図 8 ラマン用コンバイナーの反射減衰量ヒストグラム（ポート 1, 2, 3）
Histogram of return loss

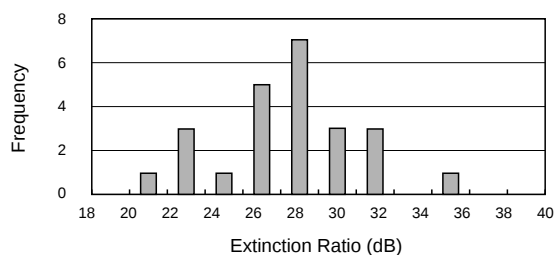


図9 偏波保持型2芯型モジュールの消光比分布
Histogram of extinction ratio

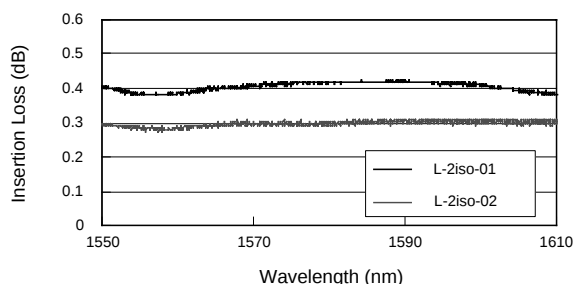


図10 Lバンド用2芯型モジュールの波長特性
Wavelength dependent loss of pumping module for L-band

つぎに励起光を入れたときのモジュール温度上昇をサーモビューアで確認した。結果を図11、図12に示す。図11より、本波長コンバイナーは低挿入損失であり、高光パワーの入力対策をしているため、3 Wの光パワーでも全体が均等に2～3 上昇するだけであった。つぎに、挿入損失0.29 dBの波長コンバイナーに6 Wの光パワーを入力したところ図12に示すような結果となった。波長コンバイナーの2芯側の温度が10 上昇したが挿入損失の変動はなかった。

5. 信頼性

2芯型光モジュールの信頼性を確認するため、ベルコア1209及び1221試験を実施した。いずれの試験においても、損失及び変動は規格値を満足しており、十分な信頼性が得られていることが確認された。

6. おわりに

信頼性が高く、小型で超低挿入損失の2芯型光モジュールを開発して商品化した。この製品は、ラマン増幅の励起光合波、DWDM用アンプ、Mux/Demuxユニットに幅広く使われることが期待される。

謝辞

本稿の内容については、光機能部品グループ、ファイテル製品事業部光部品部の成果であり筆者らが代表してまとめた。また、開発にあたり有益な御助言と御協力をいただいた光機器部、光通信材料研究グループの諸氏並びに二ノ宮WPチーム長に感謝する。

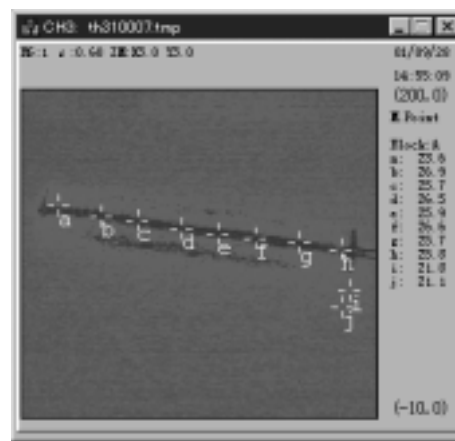


図11 3 Wの光を入力した時の2芯型光モジュール温度
Thermo-viewer image of combiner module for Raman during 3 W optical power incident

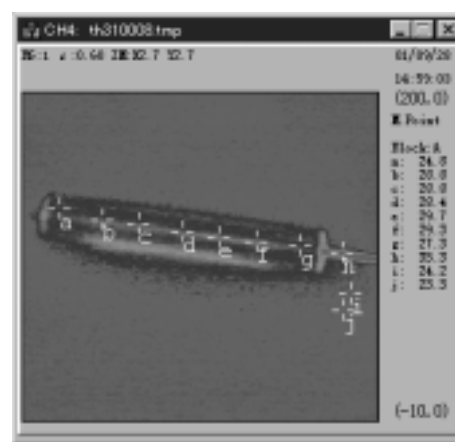


図12 6 Wの光を入力した時の2芯型光モジュール温度
Thermo-viewer image of combiner module for Raman during 6 W optical power incident

参考文献

- 1) R. H. Stolen: " Raman response function of silica-core fibers", J. Opt. Soc. vol.6, pp.1159-1166(1989)
- 2) G. P. Agrawal: Nonlinear fiber optics, 2nd. Academic Press (1995)
- 3) Y. R. Shen: The Principles of Nonlinear Optics, John Wiley & Sons, Inc.(1984)
- 4) R. H. Stolen and E. P. Ippen: "Ramam gain in glass optical waveguides", Appl. Phys. Lett. vol.22, P276-278(1973)
- 5) 枝川・笠・望月・若林:「光ファイバラマン増幅における増幅特性」信学技報, OQE88-33(1988)
- 6) M. Nissov: "100Gb/s(10x10Gb/s)WDM transmission over 7200km using distributed Raman amplification", Proc. European Conference on Optical Communication, vol.5(1998)
- 7) Y. Emori, Y. Akasaka, and S. Namiki: "Less than 4.7dB noise figure broadband in-line EDFA with a Raman amplified 1300ps/nm DCF pumped by multi-channel WDM laser diodes", OAA'98, PD3(1998)
- 8) A. Yariv: "Optical wave in crystals"
- 9) 河野健治:「光デバイスのための光学系の基礎と応用」現代工学社
- 10) A. Yariv: "Optical Electronics in Modern Communications", Oxford Uni. Press(1997)