

ヒーター制御タイプAWGモジュールの開発

Development of Heater-control Type AWG Module

長谷川 淳一*
Junichi Hasegawa

斎藤 恒聡*
Tsunetoshi Saito

越 浩之*
Hiroyuki Koshi

柏原 一久*
Kazuhisa Kashihara

概要 北米を中心として世界的に広がりつつある波長分割多重通信（DWDM：Dense-Wavelength Division Multiplexing）において、波長合分波器の一つであるAWG（Arrayed Waveguide Grating）は重要な役割を担っている。今回我々は、ヒーター制御によるAWGモジュールを開発した。開発したAWGモジュールは、厚さが12 mmと薄型であり、かつ、5 W以下の低消費電力を実現している。また、環境温度の変化、さらには、光ファイバの引張に対しても安定な光学特性を実現している。なお、各光学特性及び信頼性は、100 GHz–40 chのAWGモジュールを試作し、確認した。

1. はじめに

光通信に対する大容量化、高速化の要求に応えるべく、複数の異なる波長の光信号を多重化して伝送する波長分割多重通信（DWDM：Dense-Wavelength Division Multiplexing）が北米を中心として実用化され、世界的な広がりを見せている。

図1にDWDM技術を用いた光通信網の概略図を示す。DWDMはこれまで大都市間を結ぶLong Haulや海底横断のUltra Long Haulと呼ばれる長距離網を中心に導入が進められてきたが^{1), 2)}、今後、中小都市間を中心とする中距離網や大都市内のMetro Ringにおいても導入が進むものと考えられる。また、さらなる大容量化の要求に伴い、既存のDWDM通信網においてもチャンネル数が増大し、システムの高機能化が進んでいくものと考えられる。このような光通信網を構築していく上で、波長合分波器は重要なキーデバイスの一つである。

波長合分波器は、異なる波長の信号光を合波、あるいは、合波された信号光を波長ごとに分波する機能を有するものであり、AWG（Arrayed Waveguide Grating）、FBG（Fiber Bragg Grating）、TFF（Thin Film Filter）等を用いたものが実用化されている。

AWGは、シリコンまたは石英等の基板上に光導波路を集積させたPLC（Planar Lightwave Circuit）であり、ガラス膜の堆積技術及びフォトリソグラフィーとエッチングによるパターンニング技術により作製される^{3), 4)}。このAWGは、チャンネル数や波長間隔に対する設計の自由度が大きいいため、多チャンネル化が容易であり、小型で対応することが可能である。また、チャンネル数が増えてもモジュールの価格はあまり変わらないため、チャンネルあたりのコストを低減できるというメリットがある。さらに、AWGは波長分散が極めて小さいため、40 Gbps

等の高速化にも適しており、今後のDWDMシステムにおいて、さらなる活躍が期待されている。

2. AWGの原理

2.1 AWGの波長合分波原理

図2は、AWGの回路構成を示したものである。基板上には入射導波路、入射側スラブ導波路、アレイ導波路、出射側スラブ導波路、出射導波路が形成されている。以下、波長分波器として使用される場合の、分波の仕組みについて説明する。

複数の波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ が多重された波長多重光が入射導波路に入射されると、入射側スラブ導波路で回折されて広がり、アレイ導波路に入射する。アレイ導波路は入射側スラブ導波路から導出された光を伝搬する複数の併設された光導波路であり、隣接する導波路はある一定の光路長差をもって配列されている。このため、アレイ導波路の出力端では、各導波路を伝搬した光は $n_c \Delta L$ に相当する分だけ位相にずれを生じる。アレイ導波路を通過した光は出射側スラブ導波路に到達し、回折により広が

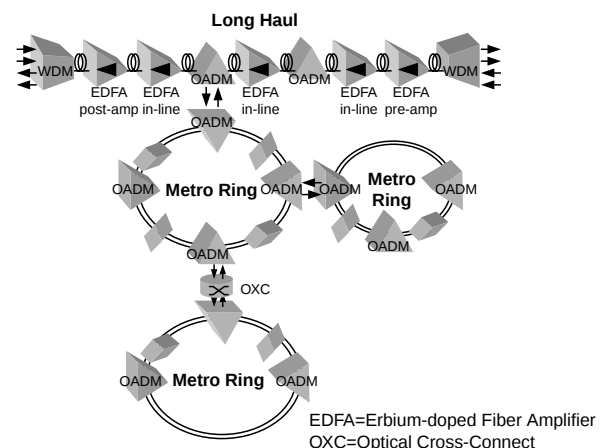


図1 光通信網の概略図
Outline of optical communication

* ファイテルフォトンクス研究所 光部品開発部

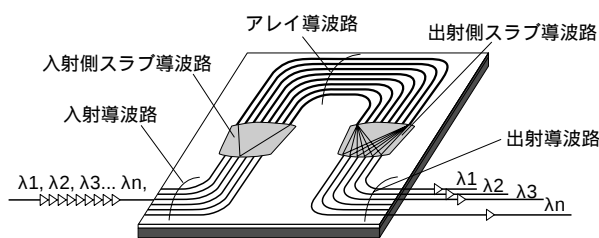


図2 AWGの導波路回路構成
Light-waveguide circuit structure of AWG

るが、それぞれの導波路を通過した光は互いに干渉し、結果的に全体として波面の揃う方向に回折することになる。このとき、アレイ導波路とスラブ導波路の有効屈折率を n_c, n_s 、回折角を θ 、アレイ導波路の導波路間隔を d 、波長を λ とすると、波面が揃う同位相条件は式(1)で表される。

$$n_s d \theta + n_c \Delta L = m \lambda \quad (1)$$

ここで m は任意の整数であり、回折次数である。波面がそろう方向である回折角は波長に依存することから、異なる波長の光はそれぞれ別の方向に回折されることになる。このため、波長の異なる光が出射側スラブ導波路の出射導波路側で集光する位置は互いに異なり、それぞれの位置に出射導波路を設置することにより、波長の異なった光を波長毎に異なる出射導波路から出力できる。すなわち波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を別々に取り出すことが可能となる。

以上、波長分波器として機能する場合のAWGの仕組みについて説明したが、同一のAWGを用いて波長合波器として使用することも可能である。すなわち、波長合波器として使用するときの出射導波路から各々の波長の光を入射すると、波長合波器として使用するときの入射導波路からこれらの光が一括して出力されることになる。

2.2 中心波長の温度依存性

前述のように、AWGは決められた波長の光を合分波することが可能であるが、この波長（中心波長）は温度依存性を有している。

温度が変化すると、導波路材料の屈折率の変化や基板及び導波路の熱膨張、収縮が発生するために光路長が変化し、光路長差も変化する。この結果、出射側スラブ導波路の出射導波路側における焦点位置が変化し、出射導波路に入射する光の波長が変化することになる。この波長の温度変化量は式(1)において $\theta = 0$ とし、 λ について解いた式を温度 T で微分することにより、式(2)で表される。

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda}{n_c} \cdot \frac{dn_c}{dT} + \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \quad (2)$$

右辺第一項は屈折率の温度依存性、第二項は基板の伸縮に伴う導波路長の変化により導波路にかかる応力を原因とする屈折率変化である。石英ガラスの屈折率の温度依存性： $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、及び基板の線膨張係数： $3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ （シリコンの場合）から、中心波長の変化は約 $0.011 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ となる。

この中心波長の温度依存性を補償するために、環境温度が変

化してもAWGの温度が一定に保持されるような温度調節機構が必要となる。一般にAWGの温度調節機構にはペルチェやヒーターを用いたものがあり、当社では既にペルチェを用いたAWGモジュールを開発済みである⁵⁾。今回我々は、ヒーター制御タイプAWGモジュールの開発を行った。

3. AWGモジュールに要求される特性

ところでAWGモジュールには、基本的な光学特性の他に下記の特性が求められる。

- ・低消費電力
- ・小型パッケージ
- ・環境温度変化に対する安定性
- ・高い信頼性

近年の光アンプ(EDFA)のハイパワー化やラマンアンプの導入、さらにはDWDMシステムの高性能、高機能化による新しい光モジュールの採用等により、システム全体の消費電力は増大する傾向にある。また、これらを収納するスペースも必要となり、システム全体が大型化してきている。このため、各々の光モジュールには小型化、低消費電力化が強く求められている。

しかしながら、光モジュールの大きさと消費電力には次のようなトレードオフの関係がある。図3は、温度調節機構を設けた光モジュールの例としてAWGモジュールの断面を模式的に示したものである（温調機構は省略）。AWGチップとパッケージ内部の上下端までの距離 g を大きくすると、空気層の断熱性が向上するため、消費電力は小さくなるが、パッケージ自体の厚さ(t)は厚くなる。一方、AWGチップとパッケージ内部の上下端までの距離 g を小さくすると、パッケージ自体の厚さ(t)は薄くなるが、AWGチップとパッケージの熱伝導が大きくなり、消費電力が大きくなってしまふ。

このため、小型、かつ低消費電力のAWGモジュールを実現するのは非常に困難であるが、我々は、パッケージ厚を12 mm以下、使用環境温度 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ での消費電力を5 W以下とすることを目標として、AWGモジュールのパッケージ筐体の設計、パッケージ材質、AWGチップの把持方法の最適化を行った。

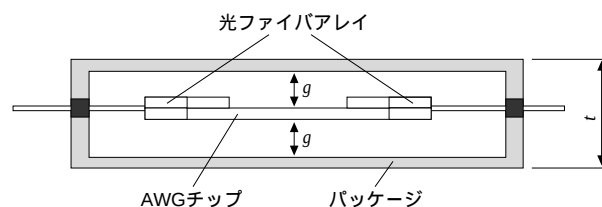


図3 AWGモジュールの断面模式図
Cross-section view of AWG module

4. ヒーター制御タイプAWGモジュールの構造

以下、開発したヒーター制御タイプAWGモジュールの構造について説明する。AWGチップに光ファイバアレイを接続し、ヒーターと測温抵抗素子（RTD）を搭載し、パッケージに収納した。写真1に100 GHz-40 ch ヒーター制御タイプAWGモジュールの外観を、図4にその寸法を示す。パッケージサイズは、119.6 × 65.5 × 12 mmと小型（薄型）である。なお、このパッケージは、他種類のAWG（50 GHz-40 ch等）も収納可能である。

また、本モジュールは、低消費電力を実現するために、パッケージ材質として熱伝導率の小さいプラスチックを使用し、さらに、AWGチップとパッケージの接触面積が極力小さくなる工夫を施した。

ところで、パッケージ材質にプラスチックを使用すると、以下のような問題が生じる。一般にプラスチックは線膨張係数が大きく、環境温度の変化によってパッケージが伸縮するため、パッケージに光ファイバが固定されていると、光ファイバには引張応力が働いてしまう。このため、AWGチップと光ファイバアレイの接続界面に応力がかかり、挿入損失の増大を招き、モジュールが破損することもある。このため、パッケージにプ



写真1 ヒーター制御タイプAWGモジュールの外観
Appearance of heater-control type AWG module

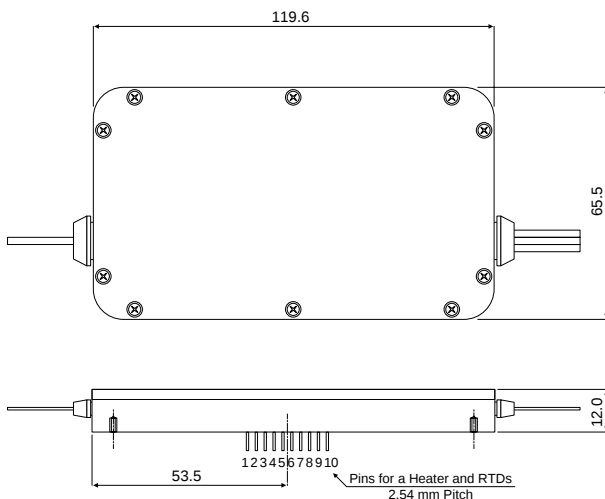


図4 外観寸法
Appearance and dimensions of AWG module

ラスチックを用いる場合には、光ファイバを固定しないか、あるいは柔らかい接着剤を用いて固定する構造とするのが一般的である。しかし、この構造では、光ファイバに引張応力が付与されると、光ファイバとAWGチップとの接続界面に応力が伝わり、挿入損失が大きく増大してしまう結果となる。本ヒーター制御タイプAWGモジュールでは、この問題を解決するために、光ファイバ固定部分を工夫しており、環境温度が変化したり、光ファイバに引張応力が付与されても、AWGチップと光ファイバアレイの接続界面への応力伝達を遮断できる構造となっている。

5. 100 GHz-40 ch ヒーター制御タイプAWGモジュールの試作結果

以上のような構造を採用して100 GHz-40 ch ヒーター制御タイプAWGモジュールをN = 7で試作し、所望の特性について評価を行った。以下にその結果を示す。

ところで、一般にAWGの中心波長は、チップの作製誤差等によりばらつきを有する。このため、中心波長をグリッド波長に一致させるためには、個々のAWGに対し、それぞれ適切な制御温度を設定する必要がある。ヒーター制御タイプAWGモジュールの場合、この制御温度は使用温度範囲（0 ~ 70 °C）より高くする必要があり、ここでは制御温度を70 ~ 80 °Cとした。本試作では、モジュール構造の妥当性を検証するために、全てのAWGモジュールの制御温度を80 °Cとした。

5.1 温度特性

試作したヒーター制御タイプAWGモジュールについて、環境温度0 ~ 70 °Cの範囲で動作確認を行った。環境温度を20 → 70 → 0 → 20 °Cと変化させたときの挿入損失及び中心波長変動の結果を図5に示す。各変動量は、初期設定である

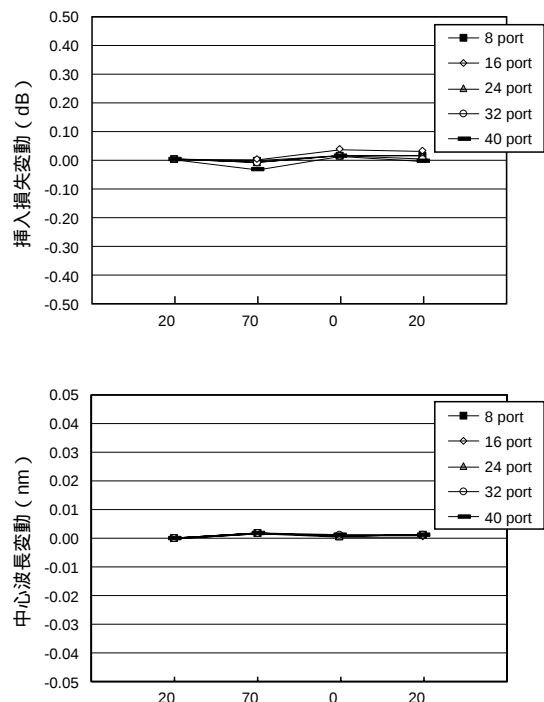


図5 温度特性の結果
Temperature dependence of insertion loss and center wavelength

20 からの変動値として示した。同図より、挿入損失及び中心波長変動はともに極めて小さいことが分かる。また、表1に70 及び0 時の中心波長及び挿入損失の変動値（20 基準）をまとめた。挿入損失変動の最大値は0.05 dBと極めて小さく、採用した光ファイバ引き留め部の構造が良好に機能していることが確認された。また、中心波長変動の最大値も0.006 nmと非常に小さく、環境温度が変化しても光学特性は非常に安定であるという結果が得られた。

図6に試作したモジュールの透過特性の一例を示す。挿入損失5 dB以下、クロストーク26 dB以上であり、光学特性についても当社製のペルチェ制御タイプAWGモジュールと同等な特性であることが確認された。

5.2 消費電力

試作したヒーター制御タイプAWGモジュールについて、環境温度0 , 20 , 70 において消費電力を測定した。AWGモジュールの制御温度は全て80 とした。図7に測定結果の一例を示す。消費電力は環境温度に対して直線的に変化し、環境温度が0 の時に最大となる。表2に試作した7モジュールについての測定結果をまとめた。消費電力の最大値は4.38 Wであり、目標である消費電力5 W以下を満足した低消費電力モジュールであることが確認された。

5.3 引張試験

試作したヒーター制御タイプAWGモジュールについて、Telcordia GR-1209に準拠して光ファイバの引張試験を行った。

試験は、モジュールを固定した状態で、入射側光ファイバ、出射側光ファイバについてそれぞれ行った。なお、引張荷重は、入射側光ファイバは15 N、出射側光ファイバは15 N及び30 Nとし、引張時間はそれぞれ1分間とした。表3に、試験結果（挿入損失の変動）の一例を示す。荷重開放直前と荷重開放から1分後に1, 20, 40の3ポートの挿入損失の変動を測定した。結果は、試験前の初期値からの変動量として示した。同表より、引張応力による挿入損失の変化量は全くなく、本モジュールが光ファイバの引っ張りに対しても極めて安定であることが確認された。

6. 信頼性試験

信頼性試験はTelcordia GR-1209及び1221に準拠し、振動試験、衝撃試験、温度サイクル試験及び高温高湿試験を行った。なお、試験中ではAWGモジュールの温度制御は行っていない。また、各光学特性は、それぞれのAWGモジュールを80 で温度制御し、環境温度20 で測定した。各試験条件および試験結果（挿入損失変動、中心波長変動）を表4にまとめた。結果は試験前の初期値からの変動量として示した。同表より、挿入損失変動の最大値は0.13 dB、中心波長変動の最大値は0.005 nmであり、各試験でのAWGモジュールの劣化は見られなかった。開発したヒーター制御タイプAWGモジュールが高い信頼性を有することが確認された。

表1 温度特性のまとめ
Summary of temperature dependence

項目	環境温度 ()	結果	
		挿入損失変動(dB)	中心波長変動(nm)
温度特性	70	Ave : 0.01 Worst : 0.05 σ : 0.023 n = 4	Ave : 0.001 Worst : 0.006 σ : 0.0030 n = 7
	0	Ave : 0.01 Worst : 0.05 σ : 0.020 n = 4	Ave : 0.001 Worst : 0.003 σ : 0.0011 n = 7

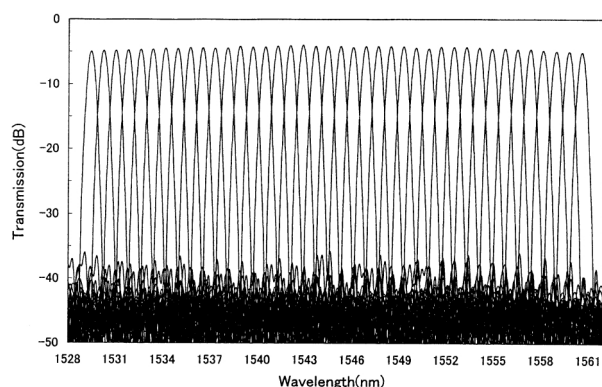


図6 100 GHz-40 ch ヒーター制御タイプAWGモジュールの透過特性例
Typical transmission spectrum of 100 GHz-40 ch heater-control type AWG module

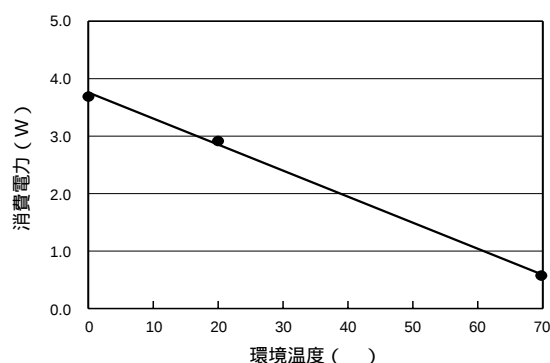


図7 消費電力の結果
Typical results of power consumption measurements

表2 消費電力のまとめ
Summary of power consumption

項目	環境温度 ()	消費電力 (W)
消費電力 n = 7	0	Ave : 4.01 Worst : 4.38 σ : 0.228
	20	Ave : 3.11 Worst : 3.37 σ : 0.145
	70	Ave : 0.57 Worst : 0.62 σ : 0.024

7. まとめ

我々は、DWDMシステムで使用可能なヒーター制御タイプ AWG モジュールを開発した。開発した AWG モジュールの特徴は下記に示すとおりである。

表3 引張試験結果

Typical results of optical fiber retention test

	荷重 (N)	測定port	荷重開放 直前(dB)	荷重開放 1 min後(dB)
入射側	15	1	0.00	0.00
		20	0.00	0.00
		40	0.00	0.00
出射側	15	1	0.00	0.00
		20	0.00	0.00
		40	0.00	0.00
	30	1	0.00	0.00
		20	0.00	0.00
		40	0.00	0.00

- ・厚さ 12 mm の薄型パッケージ
- ・最大消費電力 5 W 以下（環境温度 0 ～ 70 ）
- ・中心波長変動 ± 0.01 nm 以下（環境温度 0 ～ 70 ）
- ・挿入損失変動 ± 0.1 dB 以下（環境温度 0 ～ 70 ）
- ・耐光ファイバ引張構造
- ・当社製ペルチェ制御タイプ AWG モジュールと同等な光学特性
- ・高信頼性（Telcordia GR-1209 及び 1221）

今回開発を行ったヒーター制御タイプ AWG モジュールは、本報告の 100 GHz-40 ch AWG の他に、50 GHz-40 ch 等の種々の AWG に適用可能である。

参考文献

- 1) H. Onaka et al.; OFC '96, PD-19-1,(1996)
- 2) Y. Yano et al.; ECOC '96, ThB. 3.1,(1996)
- 3) H. Takahashi et al.; Electron Lett., vol. 26,(1990), 87
- 4) C. Dragone ; IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3,(1991), 812
- 5) 斎藤恒聡他.; 電工時報, 105,(2000), 30

表4 信頼性試験結果

Results of reliability tests

試験項目	試験条件	n	結果	
			挿入損失変動 (dB)	中心波長変動 (nm)
振動試験	20 G , 20 ~ 2000 Hz 4 min / cycles 4 cycles / axis	3	Ave : 0.00 Worst : 0.06 σ : 0.018	Ave : - 0.001 Worst : 0.004 σ : 0.0016
衝撃試験	500 G 5 times / direction 6 directions	3	Ave : 0.00 Worst : 0.05 σ : 0.023	Ave : 0.000 Worst : - 0.002 σ : 0.0009
温度サイクル試験	- 40 ~ 85 49 cycles	3	Ave : 0.02 Worst : 0.06 σ : 0.015	Ave : 0.000 Worst : - 0.002 σ : 0.0005
高温高湿試験	85 °C ・ 85%RH 336 hr	3	Ave : 0.05 Worst : 0.13 σ : 0.049	Ave : 0.001 Worst : 0.005 σ : 0.0023