

超低損失／多チャンネルアサーマルAWGモジュール

Ultra-Low Loss Athermal AWG Module with a Large Number of Channels

長谷川 淳一*
Junichi Hasegawa

奈良 一孝*
Kazutaka Nara

概要 波長合分波器の役割を担うAWGの要求の一つに、アサーマル化(温度無依存化)がある。我々は、この要求を実現するために、独自のアサーマル化技術を用い、従来実現が難しかった多チャンネルアサーマルAWGを開発した。また、回路パターンの工夫により、100GHz-48chアサーマルAWGモジュールの低損失化を行った。開発したモジュールは、挿入損失2.8 dB以下と低損失を実現しており、その温度特性はすべてのチャンネルにおいて、中心波長変動 ± 0.015 nm以下、挿入損失変動 ± 0.1 dB以下であった。

1. はじめに

近年、多様化が進むD-WDMシステムにおいて、波長合分波器として重要な役割を担うAWG (arrayed waveguide grating) は、電源を必要としないアサーマル(温度無依存)化が強く求められている。アサーマル化の大きなメリットは、電力が不要になることは言うまでもなく、AWGモジュールの温度監視が不要になる点にある。そのため、AWGモジュールを局内の伝送装置より切り離せ、電力の無い様々な場所に設置でき、今後のより多様化する光通信ネットワークのニーズに対応できるものと考えられる。さらに、モジュールの信頼性が向上する点も挙げられる。従来のヒータ等を使用した温度制御型AWGモジュールでは、AWGの中心波長を一定に保つために、AWGチップを70℃以上の高温で保持しなければならず、モジュール化に使用されている接着剤の温度による劣化が懸念されていた。そのため、アサーマル化を行えば、高温保持が不要になるため、その信頼性は向上することになる。

このAWGのアサーマル化に関して、いくつかの試みが報告されている^{1)~4)}が、実際にD-WDMシステムで使用するためには、チャンネル数の自由度と温度依存性のさらなる低減が必要であった。そこで、我々は独自のアサーマル化原理を考案し、その原理を用いてスペクトラム形状がGaussianとFlat-topの中間の形状を持つSemi-Flatの100GHz-48chのアサーマルAWGモジュールを開発した^{5), 6)}。今回は、低損失化技術⁷⁾により、挿入損失が2.8 dB以下を実現した超低損失100GHz-48chアサーマルAWGモジュールを開発したので報告する。さらに、モジュールの低コスト化を実現できうる独自の中心波長補正技術を確立したので併せて報告する。

2. アサーマル化技術

2.1 AWGの合分波原理

AWGはシリコン基板上に石英系ガラスによりクラッドおよびコアを堆積し、光導波路を形成したPLC (planar lightwave circuit) である。図1にAWG回路の概略図を示す。AWGは入力導波路、入力スラブ導波路、アレイ導波路、出力スラブ導波路、出力導波路により構成されている。以下に波長分波器として使用される際のAWGの機能について説明する。入力導波路に多重化された光が入力されると、スラブ導波路で回折により広がりアレイ導波路に入射される。アレイ導波路は、隣り合った導波路の長さが、ある一定の長さ ΔL だけ異なっているため、このアレイ導波路部を通過することで位相差がつけられ、波長に応じて出力スラブ導波路端部の異なった位置に集光される。そのため、それぞれの集光位置に出力導波路を設けることにより異なった波長の光を取り出すことができる。また、AWGは波長合波器としても機能する。上述の場合とは逆に、各々の出力スラブ導波路から各波長の光を入力すると、入力導波路からこれらの光が合波されて出力される。

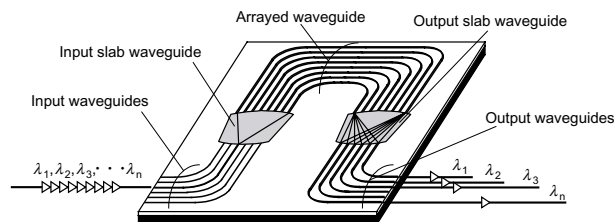


図1 AWGの回路構成
Light-waveguide circuit structure of AWG

* 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

2.2 AWGの温度依存性

光導波路を構成する石英系ガラスの屈折率に温度依存性があるため、それに起因した形で、AWGの中心波長にも温度依存性がある。図2を用いてAWGの温度依存性の原理について説明する。今、温度が室温(R.T.)の時、アレイ導波路を伝播してきた光の等位相面はスラブ導波路端部の円弧状に沿った形で形成され、中央の出力導波路に集光すると仮定する。ここで、温度が室温(R.T.)よりも大きくなった場合、アレイ導波路等価屈折率 n_{eff} が大きくなり、結果としてアレイ導波路の位相差 $(2\pi/\lambda)(\Delta L)n_{\text{eff}}$ が大きくなる。ここで、 λ は中心波長、 ΔL はアレイ導波路における隣接導波路の光路長差である。アレイ導波路の位相差が大きくなると、図に示すように等位相面が傾く。光は等位相面に対して垂直に進む性質があるために、集光位置がシフトする。すなわち、中央の出力導波路からは異なる波長の光が出力され、波長シフトが生じる。

石英系ガラスで作製されたAWGの中心波長の温度依存性は $0.011 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ であり、D-WDMシステムで使用するためには、無視できない大きな値となっている。そのため、従来のAWGモジュールでは、ペルチェやヒータを搭載し、チップの温度を一定に保持する必要があった。

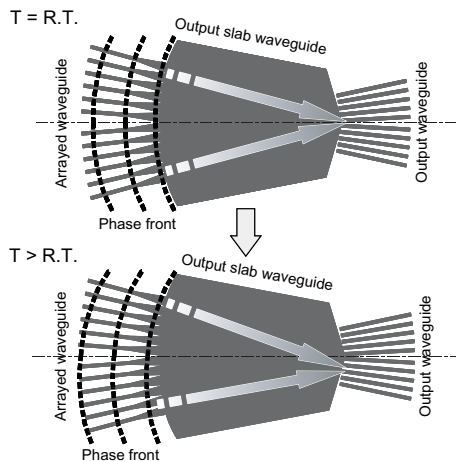


図2 温度依存性の原理
Principle of temperature dependence

2.3 アサーマル化原理

我々は、このAWGの中心波長の温度依存性をペルチェやヒータ無しで補償するために、次に示すアサーマル化原理を考案した。図3 (a) にそのアサーマルAWGの構造概略図を示す。一方のスラブ導波路部分でAWGが回路ごと切断されており、大片と小片に2分割されている。これらのチップは補償板である銅板に接続されている。温度が変化すると銅板が伸縮し、それに伴って小片をスライドさせることができる。図3 (b) には温度補償のメカニズムを模式的に示している。個々の図は出力スラブ導波路部の模式図を示している。ここでは、図3 (a) の矢印で示されているように、光は(1)から入力され(2)に出力される場合を考える。従来のAWGでは、温度が変化すると、上述したAWGの温度依存性により集光位置がシフトする。すなわち、同一の出力導波路からは異なる波長の光が出力される。一方、アサーマルAWGは、温度が変化すると集光位置は変化するが、その変化した位置に銅板の伸縮によって出力導波路を

移動することができるため、同一の出力導波路から同一の波長の光を取り出すことが可能となる。これがアサーマルAWGの原理である。

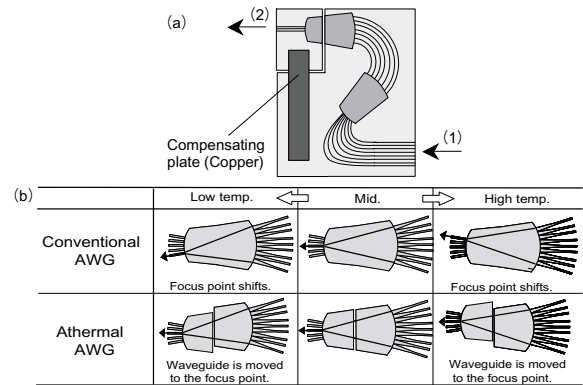


図3 アサーマルAWGの概略図
Outline of Athermal AWG

2.4 アサーマルAWGの設計

上述したアサーマル化原理を用いて、精密に中心波長の温度依存性を補償するためには、補償板である銅板長を調整する必要がある。温度変化による中心波長シフト $d\lambda$ と位置補正量 dx の間には次の関係がある。

$$dx = \frac{L_f \Delta L}{n_s d \lambda_0} n_g \frac{d\lambda}{dT} \Delta T \quad (1)$$

ここで、 L_f はスラブ導波路の長さ、 ΔL はアレイ導波路における隣接導波路の光路長差、 n_s はスラブ導波路の実効屈折率、 n_g はアレイ導波路の群屈折率、 d はアレイ導波路部における導波路ピッチ、 λ_0 は中心波長、 ΔT は温度変化量である。この式(1)に表1の回路パラメータを代入すると、次式(2)を得る。

$$dx = 0.275 \Delta T \quad (2)$$

この式(2)は 1°C あたり 0.275 mm 集光位置をシフトすることができれば、中心波長の温度依存性を補償することができることを意味する。銅板の線膨張係数は 1.7×10^{-5} であるため、銅板長は 16.2 mm と計算される。

表1 回路パラメータ
Circuit parameters for the AWG developed here

Parameters	Values
Channel spacing	100 GHz
Number of channels	48
Relative refractive index difference	0.8%
Focal length of slab waveguide: L_f	17.2 mm
Length difference of arrayed waveguide: ΔL	31.0 μm
Pitch of adjacent channel waveguides: d	13.75 μm
Diffraction order: m	29

2.5 中心波長補正技術

一般に、AWGをD-WDMシステムで使用するためには、AWGの中心波長はグリット波長に合わせ込まなければならない。我々は、アサーマル化の工程の中で、中心波長をグリット波長に合わせ込む独自技術を開発した⁶⁾。これは、銅板をチッ

プに固定する際に使用している接着剤の硬化温度を変化させることにより、中心波長を容易に変化させることができる技術である。図4に中心波長補正のフローチャートおよび作製プロセスを示す。以下に、そのフローチャートに従い、中心波長補正技術の手順を述べる。

はじめに、AWGチップを切断(アサermal化)する前にそのチップの中心波長を測定する。その測定値をもとにグリッド波長からのずれ量を計算し、硬化温度を算出する。その後、作製プロセスに移行する。その作製プロセスは、大きく4つのプロセスから成る。

プロセス1: AWGチップをベースプレートに仮固定し、その後、スラブ導波路部分でチップを2分割する。

プロセス2: 接着剤を塗布した銅板をチップ上の所定の位置にセットする。

プロセス3: チップ全体を算出された各々の硬化温度で均一に保ちながら接着剤を硬化させる。この時、温度によって銅板が伸長し、その長さを保ったままチップに接着固定される。

プロセス4: チップの温度を室温に戻す。この時、銅板の収縮により、大片と小片の相対位置が変化する。すなわち、導波路の位置が相対的に変化する、中心波長をシフトすることが可能となる。その後、ベースプレートからチップを取り外す。

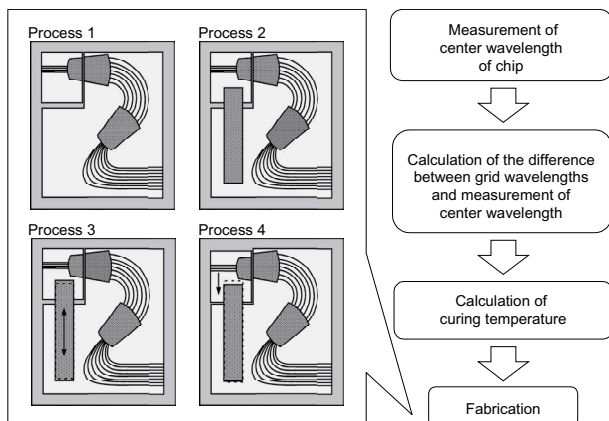


図4 中心波長補正のフローチャートおよび作製プロセス
Flowchart for adjustment of the center wavelength and fabrication

続いて、硬化温度の算出方法について述べる。硬化温度は図5に示される中心波長シフトと硬化温度との関係を用いて算出している。この関係は直線で近似でき、その傾きは、AWGの温度依存性である $0.011 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ にほぼ等しく、理論上一致している。例えば、分割する前に 25°C で測定した中心波長とグリッド波長の差が 0.4 nm であった場合は、硬化温度を 63°C にすればグリッド波長に合わせられることになる。その合わせ込み精度は $\pm 20 \text{ pm}$ 以下を実現している。また、中心波長の合わせ込み範囲は、約 0.8 nm と非常に大きい(従来の温度制御型AWGの合わせ込み範囲は 0.15 nm 程度)、AWGチップ作製時における中心波長の歩留まりを大きく向上することができる。そのため、本波長補正技術は、低コスト化が見込めるといったメリットを有している。

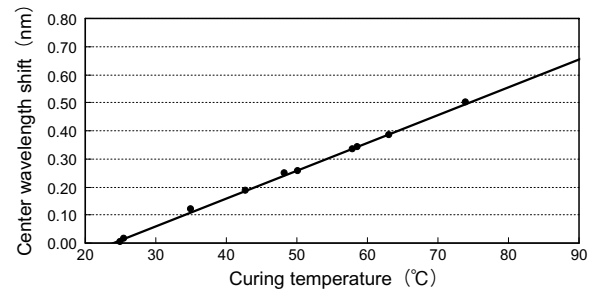


図5 波長シフトと硬化温度との関係
Relationship between center wavelength shift and curing temperature

3. 低損失技術

今後、メトロ/アクセス系等でAWGが使用される領域を拡張するためには、AWG自身の低損失化が必須である。そこで、我々はAWGの低損失化の検討を行った。

3.1 AWGの損失原因と低損失化の手段

AWGの損失には伝搬損失、入出力導波路と光ファイバとの接続損失の他に、回路に固有な損失であるモードフィールドミスマッチ損失が存在する。我々は、AWGの低損失化を実現させるために、このモードフィールドミスマッチ損失低減の検討を行うことにした。

図6 (a) にモードフィールドミスマッチ損失の発生メカニズムを示す。AWGではスラブ導波路からアレイ導波路を励振する際、スラブ導波路端では光電界分布は連続的であるが、アレイ導波路に入った瞬間に離散化された光電界分布となる。この時にモードフィールドミスマッチ損失が発生する。この発生した損失は放射損失となってAWGの損失として観測される。すなわち、このモードフィールドミスマッチ損失で発生する放射損失分を拾うことができれば、損失を低減することができる。そこで、我々は図6 (b) に示すような低損失回路パターンを配置した⁷⁾。帯状導波路が、スラブ導波路に接続するアレイ導波路部分にまたがるように配置されている。この帯状導波路は一定のピッチ A で配置されており、導波路の幅 W_B はスラブ導波路から離れるに従い、徐々に減少している。これらのパラメータはBPM (Beam Propagation Method) により最適化した。

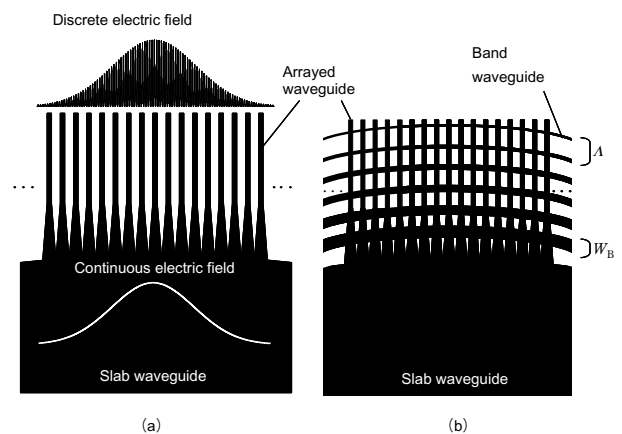


図6 挿入損失の発生メカニズムと低損失回路パターン
Mechanism for the generation of insertion loss and low loss pattern

3.2 BPMによるシミュレーション結果

次に、BPMによる損失特性の評価結果について説明する。

図7は、低損失回路パターンが無い従来の回路(a)の場合とパラメータ最適化後の低損失パターンを取り入れた回路(b)の場合のシミュレーションの比較を示している。従来の回路の場合(a)では、スラブ導波路を出た後に滑らかにアレイ導波路に接続せず、かなりの放射損失が出ていることがわかる。一方、低損失パターンを取り入れた回路(b)の場合、大きな放射損失は認められなかった。各回路での放射損失を見積もると、(a)の場合は0.70 dBであり、(b)の場合は0.17 dBであった。すなわち、この低損失パターンを用いることで、0.5 dB以上の低減効果を持つことが分かった。AWGにはアレイ導波路とスラブ導波路の接続部分が2箇所あるので、1.0 dB以上の低減効果を期待できる。

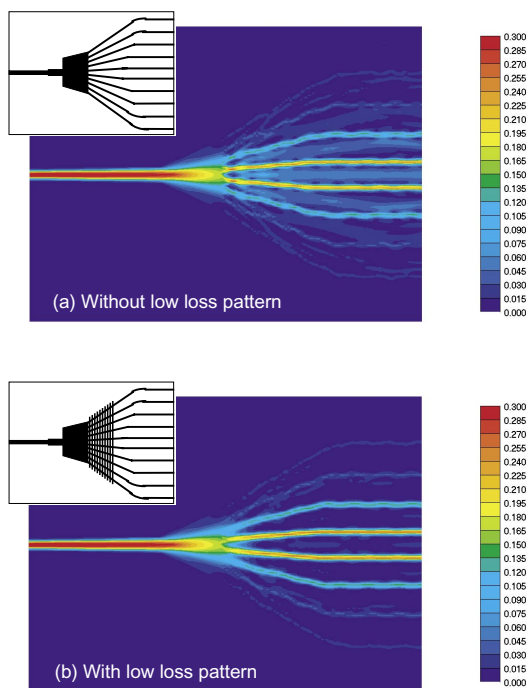


図7 シミュレーション結果
Results of simulation by BPM

また、さらなる低損失化を実現するために、入出力導波路パターンには図8に示すような同一のリニアテーパ導波路を配置した。このねらいは、入出射導波路でのモードフィールド径を同じにし、原理損失を抑えることにある。

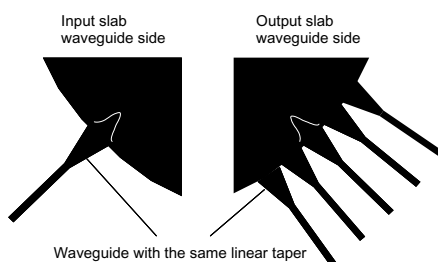


図8 入出力導波路パターン
Pattern of input and output waveguides

4. 作製結果

上述の低損失パターンを導入し、FHD法、フォトリソグラフィ、反応性イオンエッチングを組み合わせたPLC作製技術で、100GHz-48chのAWGチップを作製した。その作製したチップをスラブ導波路部に切断し、上述の中心波長補正技術を用いて中心波長をグリッド波長に合わせ込み、アサーマル化を行った。その後、AWGチップに光ファイバアレイを接続し、パッケージングを行った。図9に作製したアサーマルAWGモジュールの外観写真を示す。パッケージサイズは130×80×8.5 (mm)と薄型化を実現した。



図9 100GHz-48ch アサーマル AWG モジュールの外観図
Appearance of Athermal AWG module

図10に超低損失100GHz-48ch アサーマルAWGのスペクトラムを示す。挿入損失2.8 dB以下(1.8～2.8 dB)、隣接クロストーク-30 dB以下、非隣接クロストーク-30 dB以下、トータルクロストーク-22 dB以下と非常に良好な光学特性が得られた。アサーマル化による光学特性の劣化は無かった。

図11に中心波長の温度依存性を示す。すべてのチャンネルで、中心波長変動は-5～70℃において±0.015 nmであり、ほぼ完全にアサーマル化することができている。また、挿入損失変動は±0.1 dB以下であった。図12にスペクトラムの温度依存性を示す。いずれの温度においてもスペクトラムの劣化は見られず、その他の光学特性も安定していることを確認した。

なお、信頼性に関しては、同一構造である100GHz-32ch温度無依存AWGモジュールで確認している⁵⁾。

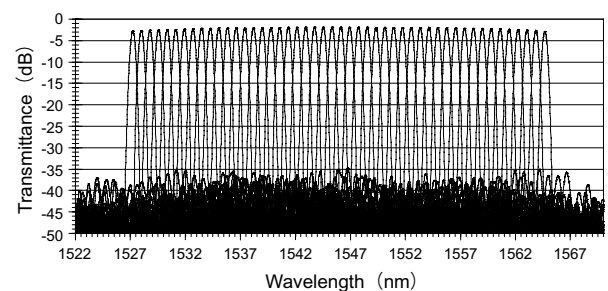


図10 アサーマル AWG のスペクトラム
Transmission spectrum of 100GHz-48ch Athermal AWG

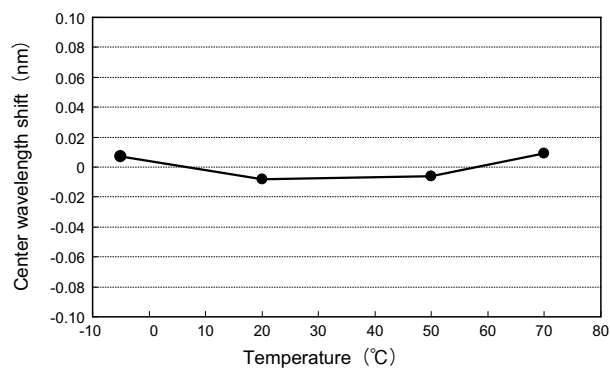


図11 中心波長の温度依存性
Temperature dependence of center wavelength

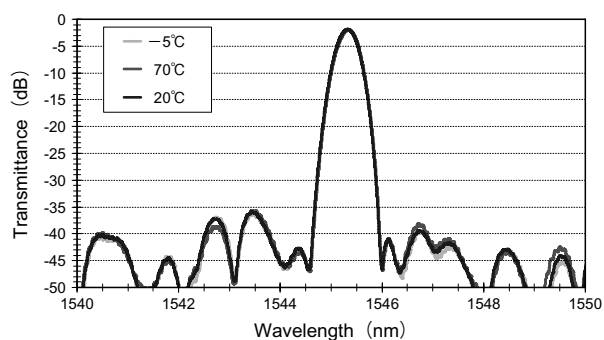


図12 スペクトラムの温度依存性
Temperature dependence of transmission spectrum

5. おわりに

我々は、アサーマル化技術および低損失化技術を用い、挿入損失2.8 dB以下の超低損失100GHz-48chアサーマルAWGモジュールを開発した。開発したモジュールは、 $-5 \sim 70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、すべてのチャンネルで、中心波長変動 $\pm 0.015 \text{ nm}$ 以下、挿入損失変動 $\pm 0.1 \text{ dB}$ 以下を実現していた。また、アサーマル化による光学特性の劣化はなかった。

参考文献

- 1) H.Tanobe, et al. : OFC' 97, ThM4, (1997), 298.
- 2) Bosc.D, et al. : Electron Lett. : **3P3** (1997), 134.
- 3) Y.Inoue, et al. : Electron Lett. : **33** (1997), 1945.
- 4) A.Kaneko, et al. : Electron Lett. : **36** (2000), 318.
- 5) 斎藤, 他: 古河電工時報, 112号, (2003), 26.
- 6) J.Hasegawa, et al. : NFOEC' 03 Tech. Pro., (2003), 801.
- 7) C.R.Doerr, et al. : IEEE Photon.Tech.Lett. : **13** (2001), 329.