

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-44349

(P2010-44349A)

(43) 公開日 平成22年2月25日(2010.2.25)

(51) Int.Cl.

G02B 6/12 (2006.01)

F I

G02B 6/12

F

テーマコード (参考)

2H147

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L (全 37 頁)

(21) 出願番号 特願2008-307602 (P2008-307602)
 (22) 出願日 平成20年12月2日 (2008.12.2)
 (31) 優先権主張番号 特願2008-182989 (P2008-182989)
 (32) 優先日 平成20年7月14日 (2008.7.14)
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(71) 出願人 000004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
 (74) 代理人 100077481
 弁理士 谷 義一
 (74) 代理人 100088915
 弁理士 阿部 和夫
 (72) 発明者 亀井 新
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内
 (72) 発明者 鬼頭 勤
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

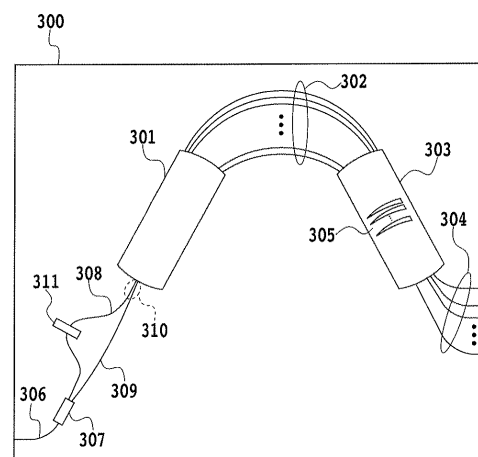
(54) 【発明の名称】 光波長合分波回路

(57) 【要約】

【課題】アサーマルAWGにおいて残留する透過中心波長の温度依存性を補償し、全使用温度領域において透過中心波長精度に優れた、あるいは使用可能温度領域が比較的広い、低損失かつ透過スペクトルの平坦な光波長合分波回路を提供する。

【解決手段】MZI同期AWGの透過中心波長が、およそMZIの透過波長とAWGの透過中心波長の平均値であることに着目し、アサーマルMZIの透過波長の温度依存性を変調しアサーマルAWGに残留する透過中心波長の温度依存性と相殺するように設定する。本発明においては、特にMZIにおける光カプラに着目し、光カプラ自体に、2つの出力間の位相差が温度により変化する機構を与えることにより、MZIの透過波長の温度依存性を変調する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

アレイ導波路回折格子とマッハツェンダ干渉回路とから構成される光波長合分波回路であって、

前記アレイ導波路回折格子は、

所定の光路長差で順次長くなる導波路からなるアレイ導波路と、

前記アレイ導波路の両端部に接続された第 1 および第 2 のスラブ導波路と、

透過波長における主要な温度依存性を補償する温度補償手段とを備え、

前記マッハツェンダ干渉回路は、

所定の光路長差を有する第 1 および第 2 のアーム導波路と、

10

前記第 1 および第 2 のアーム導波路の片端と前記第 1 のスラブ導波路の端部に接続された後段光カプラと、

前記第 1 および第 2 のアーム導波路の他端に接続された前段光カプラと、

透過波長における主要な温度依存性を補償する温度補償手段と

を備えたことを特徴とする光波長合分波回路において、

前記前段光カプラが、特定の強度比で光を分岐する第 1 の光カプラと、

前記第 1 の光カプラに更に接続され、所定の光路長差を有する第 3 のアーム導波路および第 4 のアーム導波路と、

前記第 3 および第 4 のアーム導波路それぞれに更に接続された第 2 の光カプラとから構成される位相差生成カプラであり、

20

前記第 4 のアーム導波路に対する前記第 3 のアーム導波路の光路長差が温度によって変化する機構であって、前記位相差生成カプラの 2 出力間の位相差の温度変化によって変調された前記マッハツェンダ干渉回路の透過波長の温度依存性が、前記アレイ導波路回折格子における透過波長の残留する温度依存性を補償するように構成された機構と

を備えることを特徴とする光波長合分波回路。

【請求項 2】

前記機構は、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の少なくとも一方を分断して形成され、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料が挿入された溝であることを特徴とする請求項 1 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 3】

30

前記溝は、複数の溝から構成されることを特徴とする請求項 2 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 4】

前記機構は、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の少なくとも一方の一部において、導波路コア側面あるいは上面あるいはその両方のクラッドを取り除いて形成された溝であることを特徴とする請求項 2 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 5】

前記第 1 の光カプラにおいて、前記第 3 のアーム導波路への光強度分岐比が 50% より小さく、かつ、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の少なくとも一方に形成された溝は、前記第 3 のアーム導波路にのみ形成されることを特徴とする請求項 2 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

40

【請求項 6】

前記第 2 の光カプラは、方向性結合器であることを特徴とする請求項 2 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

【請求項 7】

前記第 2 の光カプラは、マルチモード干渉回路であることを特徴とする請求項 2 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

【請求項 8】

前記第 1 の光カプラは、方向性結合器であることを特徴とする請求項 2 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

50

【請求項 9】

前記第 1 の光カプラは、2 本のアーム導波路と、その両端に接続された光カプラから構成される波長無依存カプラ (WINC) であることを特徴とする請求項 2 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

【請求項 10】

前記アレイ導波路回折格子およびマッハツェンダ干渉回路は、石英系ガラスから構成され、前記溝に挿入する材料は、シリコン樹脂、エポキシ樹脂、フッ素樹脂等の光学樹脂であることを特徴とする請求項 2 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の光波長合分波回路。

【請求項 11】

前記アレイ導波路回折格子における温度補償手段は、前記アレイ導波路および前記第 1 および第 2 のスラブ導波路の少なくともいずれか 1 つに、光波の進行方向に交差して導波路を分断する溝を形成し、前記溝に前記導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であり、

前記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であることを特徴とする請求項 10 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 12】

前記アレイ導波路および前記第 1 および第 2 のスラブ導波路の少なくともいずれか 1 つに形成された溝に挿入する材料と、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料と、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料とが同一であることを特徴とする請求項 11 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 13】

前記アレイ導波路回折格子における温度補償手段は、回路に沿って弧状に切断したチップの両端をつなぐ金属棒を接合し、金属棒の熱伸縮によりチップを変形させ、前記アレイ導波路の光路長差の温度変化と相殺させる手段であり、

前記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であることを特徴とする請求項 10 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 14】

前記アレイ導波路回折格子における温度補償手段は、前記第 1 あるいは第 2 のスラブ導波路を分断し、分断したチップを金属板で接合して、金属板の熱伸縮により分断されたスラブ導波路の相対位置を変化させることによりアレイ導波路の光路長差の温度変化による光路の変化と相殺させる手段であり、

前記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、前記第 1 および第 2 のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であることを特徴とする請求項 10 に記載の光波長合分波回路。

【請求項 15】

前記第 1 および第 2 のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料と、前記第 3 および第 4 のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料とが同一であることを特徴とする請求項 13 または請求項 14 に記載の光波長合分波回路。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、アレイ導波路回折格子 (AWG) とマッハツェンダ干渉回路 (MZI) から構成される透過スペクトルが高い平坦性を有しかつ低損失な光波長合分波回路に係り、詳

10

20

30

40

50

しくは透過波長の温度依存性が補償された上記構成の光波長合分波回路に関するものである。

【背景技術】

【0002】

シリコン基板上に形成された石英系ガラス導波路により構成されるプレーナ光波回路（PLC：Planer Lightwave Circuit）の研究開発が盛んに行われている。このPLC技術を利用したアレイ導波路回折格子（AWG：Arrayed Waveguide Grating）は、光波長合分波を実現する回路であり、光通信の部品として重要な役割を果たしている。

【0003】

AWGは、合分波される光の透過波長に温度依存性を有する。これは、AWGを構成する石英系ガラス導波路の実効屈折率が温度依存性を有するためである。このため、通常のAWGにおいては、波長透過特性を一定に保持するために、温度調節装置を付加する必要があるが。

【0004】

AWGに付加的に必要とされる温度調節装置を省略するため、AWGの透過波長の温度依存性を低減する方法が開発されている。この方法について詳しくは、特許文献1および2に開示されている。透過波長の温度依存性を低減したAWGは、温度無依存AWG、あるいはアサーマルAWGと呼ばれる。特許文献1および2に開示されたアサーマルAWGは、AWG内の各光経路（アレイ導波路あるいはスラブ導波路）において、光波の進行軸に交差するように溝を形成し、その溝に導波路の実効屈折率の温度係数とは異なる屈折率温度係数を有する材料（以下「温度補償材料」と記載）を挿入することにより、実現される。

【0005】

図40は、この従来技術におけるスラブ導波路に溝を形成するアサーマルAWGタイプの光波長合分波回路の一例である構成4000を示す平面図である。アサーマルAWGタイプの光波長合分波回路4000は、第1の入出力導波路4001と、第1のスラブ導波路4002と、アレイ導波路4003と、第2のスラブ導波路4004と、第2の入出力導波路4005と、第1のスラブ導波路4002に形成され、温度補償材料が充填されている溝4006とを備える。

【0006】

また、図41は、図40に示したアサーマルAWGタイプの光波長合分波回路4000において、線AA'部分の断面構造を示した図である。線AA'部分の断面構造には、溝4006と、シリコン基板4007と、導波路コア4008と、クラッド4009とが含まれる。溝4006は、導波路コア4008およびクラッド4009の1部を取り除いて形成されており、導波路コア4008を分断している。

【0007】

アサーマルAWG4000は、第1の入出力導波路4001に入力された波長多重信号光を第2の入出力導波路4005の各導波路へ分波し、波長チャネルごとの信号光として出力する機能と、第2の入出力導波路4005の各導波路に入力された波長チャネルごとの信号光を第1の入出力導波路4001へ合波し、波長多重信号光として出力する機能を有し、光波長合分波回路として動作する。

【0008】

また図40において、溝4006は複数の溝に分割されているが、これは、単一の溝よりも、放射損失を低減することができるためである。図40において、 i 番目のアレイ導波路の長さ L_i は、 $L_i = L_1 + (i - 1) \cdot \Delta L$ と表され、一定量 ΔL ずつ順次長くなるよう設計されている。これに応じて、各アレイ導波路に入力する光波が、第1のスラブ導波路4002において、溝4006により分断される長さの和 L_i' は、 $L_i' = L_1' + (i - 1) \cdot \Delta L'$ と表され、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ ずつ順次長くなるような形状をしている。このときAWGの第1の入出力導波路4001の中央の導波路から第2の入出力

10

20

30

40

50

導波路 4 0 0 5 の中央の導波路への透過中心波長 λ_c は、

$$\lambda_c = \{ n_a \Delta L - n_s \Delta L' + n' \Delta L' \} / M \cdots \text{数 1}$$

と表される。ここで、 n_a はアレイ導波路の実効屈折率、 n_s はスラブ導波路の実効屈折率、 n' は温度補償材料の屈折率であり、 M は A W G の回折次数であって、 $n_a \Delta L - n_s \Delta L' + n' \Delta L'$ は A W G における隣接する光経路の距離の差、すなわち光路長差を示している。このとき、 n' は n_s に近く、溝における光波の屈折角は十分小さいと仮定している。ここで光路長とは、光波が感じる距離であり、材料の屈折率と物理的な経路距離の積で求められる。また、ここで α はアレイ導波路およびスラブ導波路の実効屈折率温度係数 ($\alpha = d n_a / d T = d n_s / d T$ 、 T は温度)、 α' は温度補償材料の屈折率温度係数 ($\alpha' = d n' / d T$) であるとする、アサーマル A W G では、 $\Delta L' / (\Delta L - \Delta L') = -\alpha / \alpha'$ すなわち $\Delta L' = \Delta L / (1 - \alpha' / \alpha)$ と設計されている。これにより、アレイ導波路およびスラブ導波路での光路長差の温度変化が、溝に充填された温度補償材料の光路長差の温度変化により相殺され、透過中心波長の温度依存性が補償されている。温度補償材料としては、導波路の α に対して前述の条件を満たす α' を有する材料であれば構わないが、特に α' が α と異符号であり、かつ $|\alpha'|$ が $|\alpha|$ に比較して十分大きいような材料が好ましい。これは $\Delta L'$ を小さく設計することができ、溝による過剰損失を抑制できるからである。このような条件の材料としては、例えば光学樹脂であるシリコーン樹脂があり、 α' はおよそ $-35 \times \alpha$ である。また、光学樹脂は光部品材料として長期信頼性に優れるという点でも好ましい。

10

20

【0 0 0 9】

A W G の透過波長の温度依存性を低減する別の方法としては、A W G のチップを回路に沿い弧状に切断し、そのチップの両端をつなぐ金属棒を接合し、金属棒の熱伸縮により A W G チップを変形させて、隣接するアレイ導波路の光路長差の温度変化と相殺させる方法がある。この方法について詳しくは、非特許文献 1 に開示されている。

【0 0 1 0】

また、A W G の透過波長の温度依存性を低減する更に別の方法としては、A W G チップの入力側または出力側のスラブ導波路を分断し、分断したチップを金属板で接合して、金属板の熱伸縮により分断したスラブ導波路の相対位置を変化させることにより、アレイ導波路の光路長差の温度変化と相殺させる方法がある。

30

【0 0 1 1】

一方、光通信システムの進展に伴い、リング網やメッシュ網など、多地点を接続しフレキシブルに通信路を切り替えるシステムが構築され始めている。このような高度なネットワークでは、光信号が電気信号に復調されることなく多地点を通過する事が求められており、使用される光波長合分波回路としては、透過スペクトルが高い平坦性を有し、かつ低損失であることが求められる。このような優れた透過特性を有する光波長合分波回路として、マッハツェンダ干渉回路 (M Z I) と A W G を組み合わせた M Z I 同期 A W G 型の光波長合分波回路が提案されている。この回路について詳しくは、特許文献 3 および 4 に開示されている。この低損失かつ平坦な透過スペクトルを有する M Z I 同期 A W G により、多数回通過しても光信号の劣化が少ない、あるいは光信号の波長揺らぎに対して損失変動の少ない光波長合分波回路を得ることができる。

40

【0 0 1 2】

また、上記 M Z I 同期 A W G の透過波長の温度依存性を低減 (アサーマル化) するためには、M Z I と A W G それぞれの透過波長の温度依存性を低減する必要がある。M Z I と A W G それぞれについて、特許文献 1 に開示される手法を適用した、アサーマル M Z I 同期 A W G については、非特許文献 2 に開示されている。

【0 0 1 3】

図 4 2 は、アサーマル M Z I 同期 A W G タイプの光波長合分波回路の一例である構成 4 2 0 0 を示す平面図である。アサーマル M Z I 同期 A W G タイプの光波長合分波回路 4 2 0 0 は、A W G 部分 4 2 0 0 a と、M Z I 部分 4 2 0 0 b とから構成される。A W G 部分 4 2 0 0 a は、第 1 のスラブ導波路 4 2 0 1 と、アレイ導波路 4 2 0 2 と、第 2 のスラブ

50

導波路 4203 と、第 2 の入出力導波路 4204 と、第 1 のスラブ導波路 4201 に形成され、温度補償材料が充填されている溝 4205 とを備える。MZI 部分 4200b は、第 1 の入出力導波路 4206 と、光カプラ 4207 と、第 1 のアーム導波路 4208 と、第 2 のアーム導波路 4209 と、方向性結合器 4210 と、第 1 のアーム導波路 4208 に形成され、上記の温度補償材料が充填されている溝 4211 とを備える。また、溝 4205、4211 は、複数の溝に分割されているが、これは、単一の溝よりも放射損失を低減することができるためである。

【0014】

複数の波長を有する光波が MZI 4200b の第 1 の入出力導波路 4206 に入射されると、光カプラ 4207 により第 1 および第 2 のアーム導波路 4208、4209 に分岐され、その光路長差により波長に応じて位相差が生じる。この光波は、方向性結合器 4210 における近接して配置された 2 つの導波路間で干渉し、その位相差（すなわち波長）に応じて 2 つの導波路間でパワーが分配される。そのため、方向性結合器 4210 が AWG 4200a の第 1 のスラブ導波路 4201 に接続する終端で集光する光波の位置が、その位相差（波長）により 2 つの導波路間で周期的に変化することになる。一方、方向性結合器 4210 から AWG 4200a に入射した光波は、アレイ導波路 4202 における隣接導波路間の光路長差により、波長に応じて位相差が与えられ、その位相差（すなわち波長）に応じて第 2 のスラブ導波路 4203 の終端で集光する光波の位置が変化し、第 2 の入出力導波路 4204 それぞれに、所望の波長の光波が分波される。

【0015】

ここで、方向性結合器 4210 における 2 つの導波路間で集光する光の位置が変化すると、第 1 のスラブ導波路 4201 への光波の入射位置が変化し、各アレイ導波路までの光路長が変化する。これにより、アレイ導波路 4202 の隣接導波路間の光路長差が変化せずとも、光波長分波回路全体での光路長差が変化し、第 2 のスラブ導波路 4203 の終端で集光する光の位置が変化する。このことは、第 2 のスラブ導波路 4203 の終端で集光する光波の位置は、MZI 4200b における第 1 および第 2 のアーム導波路 4208、4209 の光路長差より調整できることを意味する。すなわち、ある波長領域において、MZI 4200b の方向性結合器 4210 の終端で集光する光の位置変化と、MZI 4200a の第 2 のスラブ導波路 4203 の終端で集光する光の位置変化が同期するように設定すれば、第 2 のスラブ導波路 4203 の終端で集光する光の位置は変化せず、従って、この波長領域で平坦な透過スペクトル特性を得ることができる。

【0016】

図 42 のアサーマル MZI 同期 AWG において、AWG 部分 4200a は、図 40 のアサーマル AWG と同様の手法によりアサーマル化されている。また、MZI 部分 4200b において、第 2 のアーム導波路 4209 に対する第 1 のアーム導波路の長さの差を Δl とした場合、第 1 のアーム導波路において溝 4211 により分断されている長さの和は、 Δl の比例した量 $\Delta l'$ となるように設計されている。このとき MZI 4200b の透過波長 λ_c^{MZI} は

$$\lambda_c^{MZI} = \{ n_r \Delta l + n' \Delta l' \} / m \cdots \text{数 2}$$

と表される。ここで、 n_r は第 1 および第 2 のアーム導波路 4208、4209 の実効屈折率、 n' は温度補償材料の屈折率であり、 m は MZI 4200b の回折次数であって、 $n_r \Delta l + n' \Delta l'$ は第 2 のアーム導波路 4209 に対する第 1 のアーム導波路の光路長差を示している。ここでアーム導波路の実効屈折率温度係数は、アレイ導波路およびスラブ導波路のそれと同様の α であるから、アサーマル化された MZI 4200b では、 $\Delta l' / (\Delta l - \Delta l') = -\alpha / \alpha'$ すなわち $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha)$ と設計されている。これにより、第 2 のアーム導波路 4209 に対する第 1 のアーム導波路 4208 の光路長差の温度変化が、溝に充填された温度補償材料の光路長差の温度変化により相殺され、透過波長の温度依存性が補償されている。温度補償材料としては、図 40 の例と同様に、 α' が α と異符号であり、かつ $|\alpha'|$ が $|\alpha|$ に比較して十分大きいような材料が好ましく、このような条件の材料としては、例えば光学樹脂であるシリコン樹脂が

ある。

【 0 0 1 7 】

M Z I 同期 A W G の透過中心波長は、およそ M Z I の透過波長と A W G の透過中心波長の平均値となる。図 4 2 の M Z I 同期 A W G においては、M Z I 4 2 0 0 b の透過波長と、A W G 4 2 0 0 a の透過中心波長が共にアサーマル化されているため、M Z I 同期 A W G の透過中心波長もアサーマル化される。また、アサーマル M Z I 同期 A W G の A W G 部分をアサーマル化する手法については、上記非特許文献 1 に開示された手法も適用可能である。

【 0 0 1 8 】

【特許文献 1】国際公開第 W O 9 8 / 3 6 2 9 9 号パンフレット

10

【特許文献 2】特開 2 0 0 1 - 1 1 6 9 3 7 号公報

【特許文献 3】特開平 8 - 6 9 0 2 1 号公報

【特許文献 4】米国特許 6 7 2 8 4 4 6 号明細書

【特許文献 5】特開 2 0 0 3 - 1 4 9 4 7 4 号公報

【非特許文献 1】J.B.D.Sooile, et, al., "Athermalisation of silica arrayed waveguide grating multiplexers", ELECTRONICS LETTERS, Vol.39, pp.1182-1184, 2003.

【非特許文献 2】S.Kamei, et, al., "Athermal Mach-Zehnder interferometer-synchronised arrayed waveguide grating multi/demultiplexer with low loss and wide passband", ELECTRONICS LETTERS, Vol.44, pp.201-202, 2008.

【非特許文献 3】T.Mizuno, et, al., "Uniform wavelength spacing Mach-Zehnder interferometer using phase-generating couplers", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.24, pp.3217-3226, 2006.

20

【非特許文献 4】I.Zhang, et, al., "Planar waveguide-based silica-polymer hybrid variable optical attenuator and its associated polymers", APPLIED OPTICS, Vol.44, pp.2402-2408, 2005.

【非特許文献 5】J. Leuthold, et al., "Multimode Interference Couplers for the Conversion and Combining of Zero- and First-Order Modes," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.16, pp1228-1238, 1998.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

30

【 0 0 1 9 】

上述の設計によるアサーマル M Z I 同期 A W G は、透過中心波長の温度依存性を完全に補償できるわけではない。これは、石英ガラス導波路や温度補償材料の実効屈折率温度係数、あるいは金属の熱膨張係数には、1 次のみならず 2 次の成分が存在し、1 次と 2 次の成分比は、一般には材料により異なるため、両次の温度依存性を同時には相殺できないからである。石英ガラス導波路の場合、 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 T$ 、 $\alpha_1 = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\alpha_2 = 1.9 \times 10^{-8}$ 程度 (T の単位は) である。シリコン樹脂の場合、 $\alpha' = \alpha'_1 + \alpha'_2 T$ 、 $\alpha'_1 = -3.5 \times 10^{-4}$ 、 $\alpha'_2 = 1.5 \times 10^{-7}$ 程度である。従来のアサーマル A W G においては、使用温度領域の中央の温度において、この 1 次の温度依存性が補償されるよう設計がなされている。2 次の係数は 1 次の係数に比較して微小ではあるが、使用温度領域全体では僅かな温度依存性が在留する。

40

【 0 0 2 0 】

ここで、図 4 2 のアサーマル M Z I 同期 A W G を例として、波長チャネル数 4 0、チャネル波長間隔 0.4 nm (5 0 GHz) の場合を挙げる。導波路の比屈折率差 (Δ) 1.5 %、コア厚 4.5 μ m、アレイ導波路 4 2 0 2、第 2 の入出力導波路 4 2 0 4、第 1 の入出力導波路 4 2 0 6、第 1 および第 2 のアーム導波路 4 2 0 8、4 2 0 9 のコア幅は 4.5 μ m であり、第 1 のスラブ導波路 4 2 0 1、第 2 のスラブ導波路 4 2 0 3 の長さは 8 4 0 0 μ m である。第 2 の入出力導波路 4 2 0 4 は第 2 のスラブ導波路 4 2 0 3 に接続する部分において 1 5 μ m 間隔で波長チャネル数配置されており、その終端には開口幅 1 1.0 μ m の直線テーパ導波路が設けられている。また光カプラ 4 2 0 7 の分岐比は 5 0 :

50

50%、方向性結合器の2つの導波路のコア幅は4.0 μm、導波路間隔は6.0 μm、結合率は50%、温度補償材料はシリコン樹脂とする。このときアレイ導波路の本数は250本、ΔLは62.5 μm、Δlは4040 μmである。ここで溝4205に充填された温度補償材料により与えられるべきΔL'およびΔl'は、 $\Delta L' = \Delta L / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta L / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで使用温度領域はT = -5 ~ 65 であるとし、中央のT = 30 での条件を考えると、ΔL' = 1.79 μm、Δl' = 115.4 μmとなる。

【0021】

このアサーマルMZI同期AWGにおける、MZI部分の透過波長の相対的な温度依存性、AWG部分の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性、MZI同期AWG全体の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を図43に示す。また、図44は、このアサーマルMZI同期AWGにおける温度-5、30、65 での透過波形を示した図である。図43、44からわかるように、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されてはいるが、MZI、AWG同様に、T = 30 を最小として2次関数的な微小温度依存性が残留しており、従ってMZI同期AWG全体にも同様の温度依存性が残留している。使用温度領域T = -5 ~ 65 においては、この波長変動幅は0.03 nmとなり、波長チャネル間隔の8%に達する。

【0022】

このように、従来技術によるアサーマルMZI同期AWGにおいては、透過中心波長の2次の温度依存性が僅かながら残留していた。このため、透過中心波長の精度を求められる狭波長チャネル間隔、あるいは使用温度領域の広い光波長合分波回路においては、場合によっては伝送システムの要求性能を満足できないという課題があった。

【0023】

本発明は、かかる問題を鑑みてなされたものであり、その目的は、アサーマルAWGにおいて残留する透過中心波長の温度依存性を補償し、全使用温度領域において透過中心波長精度に優れた、あるいは使用可能温度領域が比較的広い、低損失かつ透過スペクトルの平坦な光波長合分波回路を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0024】

上記の課題を達成するために、本発明の光波長合分波回路においては、MZI同期AWGの透過中心波長が、およそMZIの透過波長とAWGの透過中心波長の平均値であることに着目した。アサーマルMZIの透過波長の温度依存性を変調しアサーマルAWGに残留する透過中心波長の温度依存性と相殺するように設定できれば、アサーマルMZI同期AWGに残留する温度依存性を補償することが可能である。ここで本発明においては、特にMZIにおける光カプラに着目した。光カプラ自体に、2つの出力間の位相差が温度により変化する機構を与えることにより、MZIの透過波長の温度依存性を変調することが可能である。

【0025】

以上の考察を踏まえた本発明による光波長合分波回路は、アレイ導波路回折格子とマッハツェンダ干渉回路とから構成される光波長合分波回路であって、上記アレイ導波路回折格子は、所定の光路長差で順次長くなる導波路からなるアレイ導波路と、上記アレイ導波路の両端部に接続された第1および第2のスラブ導波路と、透過波長における主要な温度依存性を補償する温度補償手段とを備え、上記マッハツェンダ干渉回路は、所定の光路長差を有する第1および第2のアーム導波路と、上記第1および第2のアーム導波路の片端と上記第1のスラブ導波路の端部に接続された後段光カプラと、上記第1および第2のアーム導波路の他端に接続された前段光カプラと、透過波長における主要な温度依存性を補償する温度補償手段とを備えたことを特徴とする光波長合分波回路において、上記前段光カプラが、特定の強度比で光を分岐する第1の光カプラと、上記第1の光カプラに更に接続され、所定の光路長差を有する第3のアーム導波路および第4のアーム導波路と、上記

10

20

30

40

50

第3および第4のアーム導波路それぞれに更に接続された第2の光カブラとから構成される位相差生成カブラであり、上記第4のアーム導波路に対する上記第3のアーム導波路の光路長差が温度によって変化する機構であって、上記位相差生成カブラの2出力間の位相差の温度変化によって変調された上記マッハツェンダ干渉回路の透過波長の温度依存性が、上記アレイ導波路回折格子における透過波長の残留する温度依存性を補償するように構成された機構とを備えることを特徴とする。

【0026】

また、上記機構は、上記第3および第4のアーム導波路の少なくとも一方を分断して形成され、上記第3および第4のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料が挿入された溝であるものとしてもよい。

10

【0027】

また、上記溝は、複数の溝から構成されるものとしてもよい。

【0028】

また、上記機構は、上記第3および第4のアーム導波路の少なくとも一方の一部において、導波路コア側面あるいは上面あるいはその両方のクラッドを取り除いて形成された溝であるものとしてもよい。

【0029】

また、上記第1の光カブラにおいて、上記第3のアーム導波路への光強度分岐比が50%より小さく、かつ、上記第3および第4のアーム導波路の少なくとも一方に形成された溝は、上記第3のアーム導波路にのみ形成されるものとしてもよい。

20

【0030】

また、上記第2の光カブラは、方向性結合器であるものとしてもよい。

【0031】

また、上記第2の光カブラは、マルチモード干渉回路であるものとしてもよい。

【0032】

また、上記第1の光カブラは、方向性結合器であるものとしてもよい。

【0033】

また、上記第1の光カブラは、2本のアーム導波路と、その両端に接続された光カブラから構成される波長無依存カブラ(WINC)であるものとしてもよい。

【0034】

また、上記アレイ導波路回折格子およびマッハツェンダ干渉回路は、石英系ガラスから構成され、上記溝に挿入する材料は、シリコン樹脂、エポキシ樹脂、フッ素樹脂等の光学樹脂であるものとしてもよい。

30

【0035】

また、上記アレイ導波路回折格子における温度補償手段は、上記アレイ導波路および上記第1および第2のスラブ導波路の少なくともいずれか1つに、光波の進行方向に交差し導波路を分断する溝を形成し、上記溝に上記導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であり、上記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、上記第1および第2のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、上記第1および第2のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であるものとしてもよい。

40

【0036】

また、上記アレイ導波路および上記第1および第2のスラブ導波路の少なくともいずれか1つに形成された溝に挿入する材料と、上記第1および第2のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料と、上記第3および第4のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料とが同一であるものとしてもよい。

【0037】

また、上記アレイ導波路回折格子における温度補償手段は、回路に沿って弧状に切断し

50

たチップの両端をつなぐ金属棒を接合し、金属棒の熱伸縮によりチップを変形させ、上記アレイ導波路の光路長差の温度変化と相殺させる手段であり、上記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、上記第1および第2のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、上記第1および第2のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であるものとしてもよい。

【0038】

また、上記アレイ導波路回析格子における温度補償手段は、上記第1あるいは第2のスラブ導波路を分断し、分断したチップを金属板で接合して、金属板の熱伸縮により分断されたスラブ導波路の相対位置を変化させることによりアレイ導波路の光路長差の温度変化による光路の変化と相殺させる手段であり、上記マッハツェンダ干渉回路における温度補償手段は、上記第1および第2のアーム導波路の少なくとも一方を分断する溝を形成し、上記第1および第2のアーム導波路の実効屈折率の温度係数と異なる屈折率温度係数を有する材料を挿入することにより形成される手段であるものとしてもよい。

10

【0039】

また、上記第1および第2のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料と、上記第3および第4のアーム導波路の少なくとも一方の導波路に形成された溝に挿入する材料とが同一であるものとしてもよい。

【発明の効果】

【0040】

以上のように、本発明によれば従来技術によるアサーマルAWGおよびMZI同期アサーマルAWGにおいて残留していた透過中心波長の2次の温度依存性を補償することができ、全使用温度領域において透過中心波長精度に優れた、あるいは使用可能温度領域が広く、低損失で、かつ透過スペクトルの平坦性が高い、光波長合分波回路を提供することができる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0041】

従来技術によるアサーマルMZI同期AWGにおいては、図43の例に示されるように、AWG部分の透過中心波長の温度依存性、およびMZI部分の透過波長の温度依存性について、同様の2次の成分が残留しており、そのためMZI同期AWGの透過中心波長の温度依存性についても、やはり同様の2次の成分が残留していた。これは、AWGにおける隣接するアレイ導波路間の光路長差の温度依存性、およびMZIにおけるアーム導波路間の光路長差の温度依存性に、同様な2次の成分が残留しているためである。ここで、図42における光カプラ4207に、2つの出力間の位相差が温度により変化する機構を与えれば、MZIにおけるアーム導波路間の光路長差が擬似的に変調され、MZI部分の透過波長の温度依存性を変調することが可能である。2つの出力間に位相差を与えるカプラとしては、位相差生成カプラが提案されている。位相差生成カプラについて詳しくは、非特許文献3に開示されている。

30

【0042】

本発明の課題を解決するために、位相差生成カプラは、与えられる位相差が温度により変化し、かつ使用波長領域によりほとんど変化しないことが必要である。この条件を満足するものとして、温度依存型位相差生成カプラを新規に発案した。図1にその基本構成を示す。図1において、温度依存型位相差生成カプラ100は、第1の光カプラ101と、第1の光カプラの入力導波路101aと、アーム導波路102、103と、第2の光カプラ104と、第2の光カプラの2つの出力導波路104a、104bと、アーム導波路の一方を分断し温度補償材料が挿入される溝105とを備える。温度依存型位相差生成カプラの原理としてはアーム導波路の光路長差に温度依存性を付与できれば良いのだが、この温度依存型位相差生成カプラ100の構成は、従来のMZI同期アサーマルAWGから工程を何ら変えることなく、同時に作成できるという点で優れている。また、温度補償材料として、AWGおよびMZIの温度補償手段に使用されているものと同材料を使用するな

40

50

らば、新規の材料を付加することなく作製できるという点でも好ましい。

【0043】

以下、温度依存型位相差生成カブラ100の動作例を示す。設計例として、導波路の Δ 1.5%、コア厚4.5 μ m、アーム導波路102、103のコア幅4.5 μ m、第1の光カブラ101からアーム導波路102、103それぞれへの光パワー分岐比を6:94%、第2の光カブラ104の分岐比を50:50%、アーム導波路103に対するアーム導波路102の長さの差-2.5 μ m、溝105の幅52.5 μ m、温度補償材料はシリコン樹脂とする。

【0044】

図2は、上述の温度依存型位相差生成カブラ100において、第1のカブラの入力導波路101aから波長1525、1545、1565nmの光波を入射したときに、第2の光カブラ104の2出力導波路間に与えられる位相差の、-5~65における温度依存性を示す図である。ここで上記位相差は、出力導波路104bに対する104aの位相差とする。図2より、-5~65に温度範囲において、位相差は-1.62 π から-1.35 π の間で変化し、また位相差はほとんど波長に依存しないことが分かる。

以上を踏まえ、以下、本発明の実施形態について、具体的に説明する。

【0045】

[第1の実施形態]

本発明の第1の実施形態に係る光波長合分波回路について説明する。図3は、本実施形態におけるアサermalMZI同期AWGタイプの光波長合分波回路300の構成を示す平面図である。光波長合分波回路300は、第1のスラブ導波路301と、アレイ導波路302と、第2のスラブ導波路303と、第2の入出力導波路304と、第2のスラブ導波路303に形成され、温度補償材料が充填されている溝305と、第1の入出力導波路306と、温度依存型位相差生成カブラ307と、第1のアーム導波路308と、第2のアーム導波路309と、方向性結合器310と、第1のアーム導波路308に形成され、上記の温度補償材料が充填されている溝311とを備える。

【0046】

図3において、 i 番目のアレイ導波路の長さ L_i は、 $L_i = L_1 + (i - 1) \cdot \Delta L$ と表され、一定量 ΔL ずつ順次長くなるよう設計されている。これに応じて、各アレイ導波路を通過し、中央の波長チャネルを通過する光波が、第2のスラブ導波路303において、溝305により分断される長さ L_i' は、 $L_i' = L_1' + (i - 1) \Delta L'$ と表され、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ ずつ順次長くなるような形状をしている。また、第2のアーム導波路309に対する第1のアーム導波路308の長さの差は Δl に設計されており、第1のアーム導波路において溝311により分断されている長さは、 Δl に比例した量 $\Delta l'$ となるよう設計されている。

【0047】

光波長合分波回路300は、導波路の Δ が1.5%、コア厚4.5 μ m、実効屈折率温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-8} \times T$ 、アレイ導波路302、第2の入出力導波路304、第1の入出力導波路306、第1のアーム導波路308、第2のアーム導波路309のコア幅は4.5 μ mであり、第1のスラブ導波路301、第2のスラブ導波路303の長さは8200 μ mである。第2の入出力導波路304は、第2のスラブ導波路303に接続する部分において15 μ m間隔で波長チャネル数配置されており、その終端には開口幅11.0 μ mの直線テーパ導波路が設けられている。方向性結合器310の2つの導波路のコア幅は4.0 μ m、導波路間隔は6.0 μ m、結合率は50%、温度補償材料はシリコン樹脂（屈折率温度係数 $\alpha' = -3.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-7} \times T$ ）である。また、光波長合分波回路300は、波長チャネル数40、波長チャネル間隔0.4nm（50GHz）、中央の波長チャネル（21番目の波長チャネル）の透過波長1544.53nm（194.1THz）と設計されている。このとき、アレイ導波路302の本数は250本、 ΔL は62.6 μ m、 Δl は4040 μ mである。ここで溝305、311に充填された温度補償材料により与えられるべき $\Delta L'$ および $\Delta l'$ は、 $\Delta L' =$

$\Delta L / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta L / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで、光波長合分波回路 300 の使用温度領域は $T = -5 \sim 65$ であるとする。このとき、中央の $T = 30$ で上記条件を満足するように設計されるので、 $\Delta L' = 1.79 \mu m$ 、 $\Delta l' = 115.4 \mu m$ となる。この設計により、アレイ導波路 302 の隣接する導波路間の光路長差における 1 次の温度依存性、および第 1、第 2 のアーム導波路 308、309 間の光路長差における 1 次の温度依存性が補償されている。

【0048】

図 4 は、本実施形態の光波長合分波回路 300 における温度依存型位相差生成カプラ 307 の構成を示す平面図である。温度依存型位相差生成カプラ 307 は、方向性結合器で形成された第 1 の光カプラ 312、第 3 のアーム導波路 313、第 4 のアーム導波路 314、方向性結合器で形成された第 2 の光カプラ 315、第 4 のアーム導波路 314 に形成され、温度補償材料であるシリコン樹脂が挿入されている溝 316 とを備える。ここで、第 3、第 4 のアーム導波路 313、314 のコア幅は $4.5 \mu m$ 、第 1 の光カプラ 312 から第 3、第 4 のアーム導波路 313、314 それぞれへの光パワー分岐比を $6:94\%$ 、第 2 の光カプラ 315 の分岐比を $50:50\%$ 、第 4 のアーム導波路 314 に対する第 3 のアーム導波路 313 の長さの差 $-2.5 \mu m$ 、溝 316 が第 4 のアーム導波路 314 を分断する幅 $52.5 \mu m$ としている。この構成により、温度依存型位相差生成カプラ 307 全体は、ほぼ分岐比 $50:50\%$ のカプラとして動作する。ここで原理的に温度依存型位相差生成カプラの光カプラ 312、315 の構成は問わないが、本例では方向性結合器を適用した。方向性結合器は比較的低損失で、また分岐比の設計自由度が高いという利点を有する。

【0049】

図 5 は、上記の温度依存型位相差生成カプラ 307 において、第 1 の入出力導波路 306 から波長 $1536.61 nm$ (1 番目の波長チャネルの波長)、 $1544.53 nm$ (中央 21 番目の波長チャネルの波長)、 $1552.12 nm$ (40 番目の波長チャネルの波長) の光波を入射したときに、第 2 の光カプラ 315 の 2 出力間に与えられる位相差の、 $-5 \sim 65$ における温度依存性を示したものである。ここで上記位相差は、第 2 のアーム導波路 309 に接続する出力に対する、第 1 のアーム導波路 308 に接続する出力の位相差とする。図 5 より、 $-5 \sim 65$ に温度範囲において、位相差は、 -1.62π から -1.35π の間で変化し、また位相差は使用する波長チャネルの波長範囲ではほとんど波長に依存しない。

【0050】

図 6 は、本実施形態の光波長合分波回路 300 において、温度依存型位相差生成カプラ 307 から方向性結合器 310 で構成される MZI での光路長差の $-5 \sim 65$ における温度依存性 (線 Z) を示す図である。ここで上記光路長差は、第 2 のアーム導波路 309 を経由する光路長に対する第 1 のアーム導波路 308 を経由する光路長の差とし、光波の波長は $1544.53 nm$ とする。比較として、同波長における、第 1、第 2 のアーム導波路 308、309 間の光路長差の温度依存性 (線 X)、温度依存型位相差生成カプラ 307 の 2 出力間で生成される光路長差の温度依存性 (線 Y) を併せて示す。図 6 より、線 X においては、2 次の温度依存性が残留しているが、上記 MZI 全体としての光路長差 (線 Z) は、線 X の光路長差と、温度依存型位相差生成カプラ 307 で与えられる光路長差 (線 Y) の和となるので、ここでは線 X とは逆符号の 2 次的な温度依存性となる。

【0051】

図 7 は、本実施形態の光波長合分波回路 300 において、MZI 部分の透過波長の相対的な温度依存性、AWG 部分の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性、MZI 同期 AWG 全体の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を示す図である。また、図 8 は、光波長合分波回路 300 における、温度 -5 、 30 、 65 での中央波長チャネルの透過波形を示す図である。図 7、8 より、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されており、また、AWG 部分において残留していた 2

10

20

30

40

50

次の温度依存性が、MZI部分における逆符号の2次的な温度依存性により補償されていることが分かる。従来技術によるアサermal MZI同期AWGにおいて、使用温度領域 $T = -5 \sim 65$ の範囲で 0.03 nm 残留していた透過中心波長の温度依存性は、その変動量を 0.007 nm すなわち波長チャネル間隔の2%にまで低減できている。

【0052】

本実施形態の温度依存型位相差生成カブラ307については、図4では第4のアーム導波路314を分断するように溝316を形成し、温度補償材料を充填したが、溝の形状と配置はこの構成に限定されない。図9は、温度依存型位相差生成カブラ307の別の構成を示す平面図である。ここで各符号は図4と同様である。図9において、溝316は、第3のアーム導波路313に形成されている。第1の光カブラ312から第3、第4のアーム導波路313、314それぞれへの光パワー分岐比は6:94%、第2の光カブラ315の分岐比は50:50%、第4のアーム導波路314に対する第3のアーム導波路313の長さの差は $2.5 \mu\text{m}$ 、溝316が第3のアーム導波路314を分断する幅は $52.5 \mu\text{m}$ としている。図9の構成の温度依存型位相差生成カブラは、図4の構成の温度依存型位相差生成カブラと同様に、図10に示すような2出力間の位相差を生成することができる。また、溝316が形成されている第3のアーム導波路への光パワー分岐比が50%より小さいことから、図4の構成に比較して、温度依存型位相差生成カブラ307全体における損失が小さいという利点を有する。

10

【0053】

図11は、温度依存型位相差生成カブラ307の更に別の構成を示した平面図である。ここで各符号は図4および図9と同様である。図11の構成において溝316は、第3のアーム導波路313に形成されており、かつ4つの部分に分割されている。第1の光カブラ312の分岐比、第2の光カブラ315の分岐比、第4のアーム導波路314に対する第3のアーム導波路313の長さの差は、図9の温度依存型位相差生成カブラと同様である。また、溝316が第3のアーム導波路314を分断する幅の和は $52.5 \mu\text{m}$ としており、分割された隣接する溝の端面から端面までの間隔は $15 \mu\text{m}$ としている。図11の温度依存型位相差生成カブラは、図9の構成の温度依存型位相差生成カブラと同様に、図10に示すような2出力間の位相差を生成することができる。また、溝316を分割することにより、図9の構成に比較して、溝316自体で生じる放射損失を低減することができ、ひいては、温度依存型位相差生成カブラ307全体における損失が更に小さいという利点を有する。

20

30

【0054】

図12は、温度依存型位相差生成カブラ307の更に別の構成を示した平面図である。ここで各符号は図4および図9と同様である。図12の構成において溝316は、第3のアーム導波路313および第4のアーム導波路314に形成されており、かつそれぞれで4つの部分に分割されている。第1の光カブラ312の分岐比、第2の光カブラ315の分岐比、第4のアーム導波路314に対する第3のアーム導波路313の長さの差は図9の温度依存型位相差生成カブラと同様である。また、分割された溝316が第3のアーム導波路313を分断する長さの和と、第4のアーム導波路314を分断する長さの和の差分は $52.5 \mu\text{m}$ としており、分割された隣接する溝の端面から端面までの間隔は $15 \mu\text{m}$ としている。図12の温度依存型位相差生成カブラは、図9および図11の構成の温度依存型位相差生成カブラと同様に、図10に示すような2出力間の位相差を生成することができる。また、溝316を第3のアーム導波路313および第4のアーム導波路314の両方に分割して形成することにより、溝316自体で生じる放射損失を抑制しながら、溝316の溝幅に作製誤差が生じた場合においても、第3のアーム導波路313と第4のアーム導波路314の光路長差への影響が少ないため、より作製トレランスに優れているという利点を有する。

40

【0055】

図13は、温度依存型位相差生成カブラ307の更に別の構成を示した平面図であり、図14は図13の線BB'部分の断面図である。図13、14のような構造の導波路は、

50

非特許文献 4 において開示されている。図 13、14 において、線 BB' 部分の断面には、シリコン基板 317 と、導波路コア 318 と、クラッド 319 とが含まれる。図 13、14 の構成において、溝 316 は第 3 のアーム導波路 313 の一部である導波路コア 318 の両側面に接するように形成されており、温度補償材料が挿入されている。このとき、溝 316 が導波路コア側面に接している長さは、 $550\text{ }\mu\text{m}$ に設定されている。図 13、14 の構成により、図 9、図 11、または図 12 の構成の温度依存型位相差生成カプラと同様に、図 10 に示すような 2 出力間の位相差を生成することができる。また、図 9、図 11 または図 12 の構成に比較して、溝 316 は導波路コア 318 を分断していないため、溝 316 において発生する損失を抑制することができ、より損失特性に優れるという利点を有する。

10

【0056】

図 15 は、温度依存型位相差生成カプラ 307 の更に別の構成を示した平面図であり、図 16 は、図 15 の線 CC' 部分の断面図である。ここで各符号は図 13、図 14 と同様である。図 15、図 16 の構成において、溝 316 は、第 3 のアーム導波路 313 の一部である導波路コア 318 の上面に接するように形成されており、温度補償材料が挿入されている。このとき、溝 316 がコア上面に接している長さは、 $1400\text{ }\mu\text{m}$ に設定されている。図 15、図 16 の構成によっても、図 9、図 11 または図 12 の構成の温度依存型位相差生成カプラと同様に、図 10 に示すような 2 出力間の位相差を生成することができる。また、図 9、図 11 または図 12 の構成に比較して、溝 316 は導波路コアを分断していないため、溝 316 において発生する損失を抑制することができ、より損失特性に優れるという利点を有する。

20

【0057】

本実施形態の MZI 部分については、図 3 では第 1 のアーム導波路 308 を分断するように単一の溝 311 を形成し、温度補償材料を充填したが、溝の形状と配置はこの構成に限定されない。図 17 は、第 1、第 2 のアーム導波路 308、309、および溝 311 の別の構成を示した平面図である。ここで各符号は図 3 と同様である。図 15 において、溝 316 は、第 1 のアーム導波路 308 に形成されており、かつ 4 つの部分に分割されている。第 2 のアーム導波路 309 に対する第 1 のアーム導波路 308 の長さの差 ΔL は図 3 の構成と同様に $\Delta L = 4040\text{ }\mu\text{m}$ であり、溝 316 が第 1 のアーム導波路 308 を分断する幅の和 $\Delta L'$ は $\Delta L' = 115.4\text{ }\mu\text{m}$ であり、分割された隣接する溝の端面から端面までの間隔は $15\text{ }\mu\text{m}$ としている。溝 311 を分割することにより、図 3 の構成に比較して、溝 311 自体で生じる放射損失を低減することができ、ひいては、光波長合分波回路全体における損失が小さいという利点を有する。

30

【0058】

図 18 は、第 1、第 2 のアーム導波路 308、309、および溝 311 の更に別の構成を示した平面図である。ここで各符号は図 3 および図 15 と同様である。図 18 の構成において溝 311 は、第 1 のアーム導波路 308 および第 2 のアーム導波路 309 の両方に形成されており、かつそれぞれが 4 つの部分に分割されている。第 2 のアーム導波路 309 に対する第 1 のアーム導波路 308 の長さの差 ΔL は、図 3 の構成と同様に $\Delta L = 4040\text{ }\mu\text{m}$ であり、溝 311 が第 2 のアーム導波路 309 を分断する幅の和と、第 1 のアーム導波路 308 を分断する幅の和との差 $\Delta L'$ は $\Delta L' = 115.4\text{ }\mu\text{m}$ であり、分割された隣接する溝の端面から端面までの間隔は $15\text{ }\mu\text{m}$ としている。溝 311 を第 1 のアーム導波路 308 および第 2 のアーム導波路 309 の両方に分割して形成することにより、図 3 の構成に比較して、溝 311 自体で生じる放射損失を抑制しながら、溝 311 の溝幅に作製誤差が生じた場合においても、第 1 のアーム導波路 308 と第 2 のアーム導波路 309 の光路長差への影響が少ないため、より作製トランズに優れているという利点を有する。

40

【0059】

また、第 2 の光カプラ 315 として、図 4、図 9、図 11、図 12、図 13、および図 15 の構成では方向性結合器を適用したが、第 2 の光カプラ 315 の実現はこの構成に限

50

定されない。図 19 は別構成における、第 2 の光カプラ 315 近傍を拡大した図である。図 19 の構成においては、2 入力 2 出力のマルチモード干渉回路 (MMI : Multi-Mode Interferometer) を適用している。ここで MMI 315 は幅 $18\mu\text{m}$ 、長さ $740\mu\text{m}$ 、入出力導波路間隔 $12\mu\text{m}$ であり、50 : 50 % の分岐比を有する。マルチモード干渉回路 (MMI) を適用することにより、方向性結合器と比較して、導波路の幅に作製誤差が生じた場合においても、その分岐比が影響されにくいため、より作製トレランスに優れた光波長合分波回路が実現可能である。

【0060】

また、第 1 の光カプラ 312 として、図 4 や図 9、図 11、図 12、図 13、図 15 の構成では方向性結合器を適用したが、第 1 の光カプラ 312 の実現はこの構成に限定されない。図 20 は別構成における、第 1 の光カプラ 312 近傍を拡大した図である。図 20 の構成においては、2 つの非対称な導波路から構成される断熱的な結合器を適用している。ここで結合器は長さ $1000\mu\text{m}$ 、第 3 のアーム導波路 313 に接続する側の導波路は幅が 0 から $2.5\mu\text{m}$ に直線的に変化し、第 4 のアーム導波路 314 に接続する側の導波路は一定幅 $8\mu\text{m}$ であり、かつ第 1 の入出力導波路 306 と、中心軸が $0.6\mu\text{m}$ オフセットで接続している。この断熱的な結合器では、第 1 の入出力導波路 306 から入射した光波の一部パワーが、上記オフセット接続部分において 1 次モードに変換し、その 1 次モードに変換したパワーのみが隣接する導波路の基底モードに結合することで、光パワー分岐動作し、図 9 の構成の方向性結合器と同様に 6 : 94 % の分岐比を有する。断熱的な結合器を適用することにより、方向性結合器と比較して、導波路の幅に作製誤差が生じた場合においても、その分岐比が影響されにくいため、より作製トレランスに優れた光波長合分波回路が実現可能である。

【0061】

図 21 は、更に別の構成における、第 1 の光カプラ 312 近傍を拡大した図である。図 21 の構成においては、波長無依存カプラ (Wavelength Insensitive Coupler : WINC) を適用している。ここで WINC は、2 つの方向性結合器 320a、320b、2 本のアーム導波路 321a、321b から更に構成され、方向性結合器 320a、320b の結合率はそれぞれ 80 %、85 %、アーム導波路 321b に対する 321a の光路長差は $0.7\mu\text{m}$ であり、WINC は、図 9 の構成の方向性結合器と同様に、6 : 94 % の分岐比を有する。WINC を適用することにより、単一の方向性結合器と比較して、分岐比の波長依存性が小さいため、より広い波長範囲で動作する光波長合分波回路が実現可能である。

【0062】

[第 2 の実施の形態]

本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路について説明する。図 22 は、本実施形態におけるアサermalMZI同期AWGタイプの光波長合分波回路 2200 の構成を示す平面図である。光波長合分波回路 2200 は、第 1 のスラブ導波路 2201 と、アレイ導波路 2202 と、第 2 のスラブ導波路 2203 と、第 2 の入出力導波路 2204 と、金属棒 2205 と、第 1 の入出力導波路 2206 と、温度依存型位相差生成カプラ 2207 と、第 1 のアーム導波路 2208 と、第 2 のアーム導波路 2209 と、方向性結合器 2210 と、第 1 のアーム導波路 2208 に 8 分割されて形成され、温度補償材料が挿入される溝 2211 とを備える。本実施形態の光波長合分波回路 2200 のチップは、回路に沿って弧状に切断されている。金属棒 2205 は、その両端が弧状の AWG チップの両端付近に接合されている。また、金属の材質は本実施形態においてはアルミである。図 22 において、アレイ導波路 2202 は、一定量 ΔL ずつ順次長くなるよう設計されている。また、第 2 のアーム導波路 2209 に対する第 1 のアーム導波路 2208 の長さの差は ΔL に設計されており、第 1 のアーム導波路において分割された溝 2211 により分断されている長さの和は、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ となるよう設計されている。

【0063】

光波長合分波回路 2200 は、導波路の Δ が 1.5 %、コア厚 $4.5\mu\text{m}$ 、実効屈折率

温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-8} \times T$ 、アレイ導波路 2202、第2の入出力導波路 2204、第1の入出力導波路 2206、第1のアーム導波路 2208、第2のアーム導波路 2209のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ であり、第1のスラブ導波路 2201、第2のスラブ導波路 2203の長さは $8400 \mu\text{m}$ である。第2の入出力導波路 2204は、第2のスラブ導波路 2203に接続する部分において $15 \mu\text{m}$ 間隔で波長チャネル数配置されており、その終端には開口幅 $11.0 \mu\text{m}$ の直線テーパ導波路が設けられている。方向性結合器 2210の2つの導波路のコア幅は $4.0 \mu\text{m}$ 、導波路間隔は $6.0 \mu\text{m}$ 、結合率は 50% 、温度補償材料はシリコン樹脂（屈折率温度係数 $\alpha' = -3.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-7} \times T$ ）である。また、光波長合分波回路 2200は、波長チャネル数 40、波長チャネル間隔 0.4 nm （ 50 GHz ）、中央の波長チャネル（21番目の波長チャネル）の透過波長 1544.53 nm （ 194.1 THz ）と設計されている。このときアレイ導波路 2202の本数は 250本、 ΔL は $62.5 \mu\text{m}$ 、 Δl は $4040 \mu\text{m}$ である。

【0064】

ここで金属棒 2205は、材質の熱膨張係数に従い温度により伸縮する。このとき接合された AWGチップも形状が変形するが、高温では伸張する金属棒により ΔL が小さくなるように変形し、低温では収縮する金属棒により ΔL が大きくなるように変形する。従って、金属棒の長さを適切に設定することにより、隣接するアレイ導波路の光路長差（導波路の実効屈折率と ΔL の積）における温度変動を抑制し、AWG部分の透過中心波長の1次の温度依存性が補償されている。また、MZI部分において溝 311に充填された温度補償材料により与えられるべき $\Delta l'$ は、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで光波長合分波回路 2200の使用温度領域は、 $T = -5 \sim 65$ であるとする。このとき中央の $T = 30$ で上記条件を満足するように設計されるので、 $\Delta l' = 115.4 \mu\text{m}$ となる。この設計により、MZI部分の第1、第2のアーム導波路 2208、2209間の光路長差における1次の温度依存性が補償されている。

【0065】

図23は、本実施形態の光波長合分波回路 2200における温度依存型位相差生成カプラ 2207の構成を示す平面図である。温度依存型位相差生成カプラ 2207は、WINCで形成された第1の光カプラ 2212と、第3のアーム導波路 2213と、第4のアーム導波路 2214と、MMIで形成された第2の光カプラ 2215と、第3のアーム導波路 2214に4分割されて形成され、温度補償材料であるシリコン樹脂が挿入されている溝 2216とを備え、第1の光カプラ 2212は、方向性結合器 2217a、2217bと、2本のアーム導波路 2218a、2218bとを備える。ここで第3、第4のアーム導波路 2213、2214のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ 、第1の光カプラ 2212から第3、第4のアーム導波路 2213、2214のそれぞれへの光パワー分岐比を $6:94\%$ 、第2の光カプラ 2215の分岐比を $50:50\%$ 、第4のアーム導波路 2214に対する第3のアーム導波路 2213の長さの差 $2.0 \mu\text{m}$ 、分割された溝 2216が第3のアーム導波路 2213を分断する幅の和を $40.6 \mu\text{m}$ としている。この構成により、温度依存型位相差生成カプラ 2207全体は、ほぼ分岐比 $50:50\%$ のカプラとして動作する。

【0066】

図24は、上記の温度依存型位相差生成カプラ 2207において、第1の入出力導波路 2206から波長 1536.61 nm （1番目の波長チャネルの波長）、 1544.53 nm （中央21番目の波長チャネルの波長）、 1552.12 nm （40番目の波長チャネルの波長）の光波を入射したときに、第2の光カプラ 2215の2出力間に与えられる位相差の $-5 \sim 65$ における温度依存性を示したものである。ここで上記位相差は、第2のアーム導波路 2209に接続する出力に対する、第1のアーム導波路 2208に接続する出力の位相差とする。図24より、 $-5 \sim 65$ に温度範囲において、位相差は、 0.44π から 0.65π の間で変化し、また、位相差は、使用する波長チャネルの波長範囲ではほとんど波長に依存しない。

【 0 0 6 7 】

図 2 5 は、本実施形態の光波長合分波回路 2 2 0 0 において、温度依存型位相差生成カプラ 2 2 0 7 から方向性結合器 2 2 1 0 で構成される M Z I での光路長差の、 $-5 \sim 65$ における温度依存性（線 Z）を示した図である。ここで上記光路長差は、第 2 のアーム導波路 2 2 0 9 を経由する光路長に対する第 1 のアーム導波路 2 2 0 8 を経由する光路長の差とし、光波の波長は 1544.53 nm とする。比較として、同波長における、第 1、第 2 のアーム導波路 2 2 0 8、2 2 0 9 間の光路長差の温度依存性（線 X）、温度依存型位相差生成カプラ 2 2 0 7 の 2 出力間で生成される光路長差の温度依存性（線 Y）を併せて示す。図 2 5 より、線 X においては 2 次の温度依存性が残留しているが、上記 M Z I 全体としての光路長差（線 Z）は、線 X の光路長差と、温度依存型位相差生成カプラ 2 2 0 7 で与えられる光路長差（線 Y）の和となるので、ここでは線 X とは逆符号の 2 次的な温度依存性となる。

10

【 0 0 6 8 】

図 2 6 は、本実施形態の光波長合分波回路 2 2 0 0 において、M Z I 部分の透過波長の相対的な温度依存性、A W G 部分の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性、M Z I 同期 A W G 全体の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を示した図である。また、図 2 7 は、光波長合分波回路 2 2 0 0 における、温度 -5 、 30 、 65 での中央波長チャネルの透過波形を示した図である。図 2 6、2 7 より、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されており、また、A W G 部分において残留していた 2 次の温度依存性が、M Z I 部分における逆符号の 2 次的な温度依存性により補償されていることが分かる。従来技術によるアサermal M Z I 同期 A W G において使用温度領域 $T = -5 \sim 65$ の範囲で 0.02 nm 残留していた透過中心波長の温度依存性は、その変動量を 0.002 nm すなわち波長チャネル間隔の 0.5% にまで低減できている。

20

【 0 0 6 9 】

[第 3 の実施の形態]

本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路について説明する。図 2 8 は、本実施形態におけるアサermal M Z I 同期 A W G タイプの光波長合分波回路 2 8 0 0 の構成を示す平面図である。光波長合分波回路 2 8 0 0 は、第 1 のスラブ導波路 2 8 0 1 と、アレイ導波路 2 8 0 2 と、第 2 のスラブ導波路 2 8 0 3 と、第 2 の入出力導波路 2 8 0 4 と、金属板 2 8 0 5 と、第 1 の入出力導波路 2 8 0 6 と、温度依存型位相差生成カプラ 2 8 0 7 と、第 1 のアーム導波路 2 8 0 8 と、第 2 のアーム導波路 2 8 0 9 と、方向性結合器 2 8 1 0 と、第 1 のアーム導波路 2 8 0 8 に 8 分割されて形成され、温度補償材料が挿入されている溝 2 8 1 1 とを備える。本実施形態の光波長合分波回路 2 8 0 0 のチップは、第 1 のスラブ導波路 2 8 0 1 を分断するように 2 つのチップに切断されている。ここで金属板 2 8 0 5 は、切断された 2 つのチップのそれぞれに接合されている。また、金属の材質は本実施形態においてはアルミである。図 2 8 においてアレイ導波路 2 8 0 2 は一定量 ΔL ずつ順次長くなるよう設計されている。また、第 2 のアーム導波路 2 8 0 9 に対する第 1 のアーム導波路 2 8 0 8 の長さの差は ΔL に設計されており、第 1 のアーム導波路において分割された溝 2 8 1 1 により分断されている長さの和は、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ となるよう設計されている。

30

40

【 0 0 7 0 】

光波長合分波回路 2 8 0 0 は、導波路の Δ が 1.5% 、コア厚 $4.5 \mu\text{m}$ 、実効屈折率温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-8} \times T$ 、アレイ導波路 2 8 0 2、第 2 の入出力導波路 2 8 0 4、第 1 の入出力導波路 2 8 0 6、第 1 のアーム導波路 2 8 0 8、第 2 のアーム導波路 2 8 0 9 のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ であり、第 1 のスラブ導波路 2 8 0 1、第 2 のスラブ導波路 2 8 0 3 の長さは $8400 \mu\text{m}$ である。第 2 の入出力導波路 2 8 0 4 は第 2 のスラブ導波路 2 8 0 3 に接続する部分において $15 \mu\text{m}$ 間隔で波長チャネル数配置されており、その終端には開口幅 $11.0 \mu\text{m}$ の直線テーパ導波路が設けられている。方向性結合器 2 8 1 0 の 2 つの導波路のコア幅は $4.0 \mu\text{m}$ 、導波路間隔は $6.0 \mu\text{m}$ 、結合

50

率は50%、温度補償材料はシリコン樹脂（屈折率温度係数 $\alpha' = -3.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-7} \times T$ ）である。また、光波長合分波回路2800は、波長チャネル数40、波長チャネル間隔0.4nm（50GHz）、中央の波長チャネル（21番目の波長チャネル）の透過波長1544.53nm（194.1THz）と設計されている。このときアレイ導波路2802の本数は250本、 ΔL は62.5 μm 、 Δl は4040 μm である。

【0071】

ここで金属板2805は、材質の熱膨張係数に従い温度により伸縮する。このとき接合された2つのチップの相対位置が変化するが、アレイ導波路2802のあるチップを基準としてMZI部分のあるチップは、高温では伸張する金属板2805により図面上方に移動し、低温では収縮する金属板2805により図面下方に移動する。従って金属板の長さを適切に設定することにより、アレイ導波路2802における光路長差の温度変動を補償するように、このMZI部分のあるチップの位置変化を生じさせることが可能であり、この構造により、AWG部分における透過中心波長の1次の温度依存性が補償されている。また、MZI部分において溝311に充填された温度補償材料により与えられるべき $\Delta l'$ は、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで、光波長合分波回路2800の使用温度領域は、 $T = -5 \sim 65$ であるとする。このとき中央の $T = 30$ で上記条件を満足するように設計されるので、 $\Delta l' = 115.4 \mu\text{m}$ となる。この設計により、MZI部分の第1、第2のアーム導波路2808、2809間の光路長差における1次の温度依存性が補償されている。

【0072】

図29は、本実施形態の光波長合分波回路2800における温度依存型位相差生成カブラ2807の構成を示す平面図である。温度依存型位相差生成カブラ2807は、WINCで形成された第1の光カブラ2812と、第3のアーム導波路2813と、第4のアーム導波路2814と、MMIで形成された第2の光カブラ2815と、第3のアーム導波路2814に4分割されて形成され温度補償材料であるシリコン樹脂が挿入される溝2816とを備え、第1の光カブラ2812は、方向性結合器2817a、2817bと、2本のアーム導波路2818a、2818bとを備えている。ここで第3、第4のアーム導波路2813、2814のコア幅は4.5 μm 、第1の光カブラ2812から第3、第4のアーム導波路2813、2814のそれぞれへの光パワー分岐比を6:94%、第2の光カブラ2815の分岐比を50:50%、第4のアーム導波路2814に対する第3のアーム導波路2813の長さの差2.0 μm 、分割された溝2816が第3のアーム導波路2813を分断する幅の和を40.6 μm としている。温度依存型位相差生成カブラ2807全体は、ほぼ分岐比50:50%のカブラとして動作する。

【0073】

図30は、上記の温度依存型位相差生成カブラ2807において、第1の入出力導波路2806から波長1536.61nm（1番目の波長チャネルの波長）、1544.53nm（中央21番目の波長チャネルの波長）、1552.12nm（40番目の波長チャネルの波長）の光波を入射したときに、第2の光カブラ2815の2出力間に与えられる位相差の-5~65における温度依存性を示したものである。ここで上記位相差は、第2のアーム導波路2809に接続する出力に対する第1のアーム導波路2808に接続する出力の位相差とする。図30より、-5~65に温度範囲において、位相差は、0.44 π から0.65 π の間で変化し、また、位相差は、使用する波長チャネルの波長範囲ではほとんど波長に依存しない。

【0074】

図31は、本実施形態の光波長合分波回路2800において、温度依存型位相差生成カブラ2807から方向性結合器2810で構成されるMZIでの光路長差の-5~65における温度依存性（線Z）を示した図である。ここで、上記光路長差は、第2のアーム導波路2809を経由する光路長に対する第1のアーム導波路2808を経由する光路長の差とし、光波の波長は1544.53nmとする。比較として、同波長における、第1

、第2のアーム導波路2808、2809間の光路長差の温度依存性（線X）、温度依存型位相差生成能力プラ2807の2出力間で生成される光路長差の温度依存性（線Y）を併せて示す。図31より、線Xにおいては2次の温度依存性が残留しているが、上記MZI全体として光路長差（線Z）は、線Xの光路長差と、温度依存型位相差生成能力プラ2807で与えられる光路長差（線Y）の和となるので、ここでは線Xとは逆符号の2次的な温度依存性となる。

【0075】

図32は、本実施形態の光波長合分波回路2800において、MZI部分の透過波長の相対的な温度依存性、AWG部分の中央波長チャンネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性、MZI同期AWG全体の中央波長チャンネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を示した図である。また、図33は、光波長合分波回路2800における、温度-5、30、65での中央波長チャンネルの透過波形を示した図である。図32、33より、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されており、また、AWG部分において残留していた2次の温度依存性が、MZI部分における逆符号の2次的な温度依存性により補償されていることが分かる。従来技術によるアサーマルMZI同期AWGにおいて使用温度領域 $T = -5 \sim 65$ の範囲で0.02nm残留していた透過中心波長の温度依存性は、その変動量を0.002nmすなわち波長チャンネル間隔の0.5%にまで低減できている。

【0076】

[第4の実施の形態]

本発明の第4の実施形態に係る光波長合分波回路について説明する。本実施形態では、第1の実施形態に係る光波長合分波回路とほぼ同様の構成ながら波長チャンネル間隔が比較的広く、かつ使用温度範囲も比較的広い場合の一例を示す。図34は、本実施形態におけるアサーマルMZI同期AWGタイプの光波長合分波回路3400の構成を示す平面図である。光波長合分波回路3400は、第1のスラブ導波路3401と、アレイ導波路3402と、第2のスラブ導波路3403と、第2の入出力導波路3404と、第2のスラブ導波路3403に形成され、温度補償材料が充填されている溝3405と、第1の入出力導波路3406と、温度依存型位相差生成能力プラ3407と、第1のアーム導波路3408と、第2のアーム導波路3409と、方向性結合器3410と、第1のアーム導波路3408に4分割されて形成され温度補償材料が充填され溝3411とを備える。図34において、アレイ導波路3402は、一定量 ΔL ずつ順次長くなるよう設計されている。これに応じて、各アレイ導波路を通過し、中央の波長チャンネルを通過する光波が、第2のスラブ導波路3403において溝3405により分断される長さは、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ ずつ順次長くなるような形状をしている。また、第2のアーム導波路3409に対する第1のアーム導波路3408の長さの差は、 ΔL に設計されており、第1のアーム導波路において溝3411により分断されている長さは、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ となるよう設計されている。

【0077】

光波長合分波回路3400は、導波路の Δ が1.5%、コア厚 $4.5 \mu\text{m}$ 、実効屈折率温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-8} \times T$ 、アレイ導波路3402、第2の入出力導波路3404、第1の入出力導波路3406、第1のアーム導波路3408、第2のアーム導波路3409のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ であり、第1のスラブ導波路3401、第2のスラブ導波路3403の長さは $8100 \mu\text{m}$ である。第2の入出力導波路3404は、第2のスラブ導波路3403に接続する部分において $15 \mu\text{m}$ 間隔で波長チャンネル数配置されており、その終端には開口幅 $11.0 \mu\text{m}$ の直線テーパ導波路が設けられている。方向性結合器3410の2つの導波路のコア幅は $4.0 \mu\text{m}$ 、導波路間隔は $6.0 \mu\text{m}$ 、結合率は50%、温度補償材料はシリコーン樹脂（屈折率温度係数 $\alpha' = -3.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-7} \times T$ ）である。また、光波長合分波回路3400は、波長チャンネル数40、波長チャンネル間隔 0.8 nm （ 100 GHz ）、中央の波長チャンネル（21番目の波長チャンネル）の透過波長 1544.53 nm （ 194.1 THz ）と設計されている。こ

のときアレイ導波路 3402 の本数は 250 本、 ΔL は $31.8 \mu\text{m}$ 、 Δl は $2020 \mu\text{m}$ である。ここで溝 3405、3411 に充填された温度補償材料により与えられるべき $\Delta L'$ および $\Delta l'$ は、 $\Delta L' = \Delta L / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta L / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで光波長合分波回路 3400 の使用温度領域は、 $T = -40 \sim 80$ であるとする。このとき中央の $T = 20$ で上記条件を満足するように設計されるので、 $\Delta L' = 0.91 \mu\text{m}$ 、 $\Delta l' = 57.7 \mu\text{m}$ となる。この設計により、アレイ導波路 3402 の隣接する導波路間の光路長差における 1 次の温度依存性、および第 1、第 2 のアーム導波路 3408、3409 間の光路長差における 1 次の温度依存性が補償されている。

10

【0078】

図 35 は、本実施形態の光波長合分波回路 3400 における、温度依存型位相差生成カプラ 3407 の構成を示す平面図である。温度依存型位相差生成カプラ 3407 は、WINC で形成された第 1 の光カプラ 3412 と、第 3 のアーム導波路 3413 と、第 4 のアーム導波路 3414 と、MMI で形成された第 2 の光カプラ 3415 と、第 3 のアーム導波路 3413 に 4 分割されて形成され、温度補償材料であるシリコン樹脂が挿入されている溝 3416 とを備え、第 1 の光カプラ 3412 は、方向性結合器（結合率 85%、95%）3417a、3417b と、2 本のアーム導波路（光路長差 $0.65 \mu\text{m}$ ）3418a、3418b を備えている。ここで、第 3、第 4 のアーム導波路 3413、3414 のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ 、第 1 の光カプラ 3412 から第 3、第 4 のアーム導波路 3413、3414 のそれぞれへの光パワー分岐比を 10:90%、第 2 の光カプラ 3415 の分岐比を 50:50%、第 4 のアーム導波路 3414 に対する第 3 のアーム導波路 3413 の長さの差 $1.57 \mu\text{m}$ 、分割された溝 3416 が第 3 のアーム導波路 3413 を分断する幅の和を $31.0 \mu\text{m}$ としている。この構成により、温度依存型位相差生成カプラ 3407 全体は、ほぼ分岐比 50:50% のカプラとして動作する。

20

【0079】

図 36 は、上記の温度依存型位相差生成カプラ 3407 において、第 1 の入出力導波路 3406 から波長 1528.77 nm （1 番目の波長チャネルの波長）、 1544.53 nm （中央 21 番目の波長チャネルの波長）、 1559.79 nm （40 番目の波長チャネルの波長）の光波を入射したときに、第 2 の光カプラ 3415 の 2 出力間に与えられる位相差の、 $-40 \sim 80$ における温度依存性を示したものである。ここで上記位相差は、第 2 のアーム導波路 3409 に接続する出力に対する、第 1 のアーム導波路 3408 に接続する出力の位相差とする。図 36 より、 $-40 \sim 80$ の温度範囲において、位相差は、 0.33π から 0.7π の間で変化し、また、位相差は、使用する波長チャネルの波長範囲ではほとんど波長に依存しない。

30

【0080】

図 37 は、本実施形態の光波長合分波回路 3400 において、温度依存型位相差生成カプラ 3407 から方向性結合器 3410 で構成される MZI での光路長差の、 $-40 \sim 80$ における温度依存性（線 Z）を示した図である。ここで上記光路長差は、第 2 のアーム導波路 3409 を経由する光路長に対する第 1 のアーム導波路 3408 を経由する光路長の差とし、光波の波長は 1544.53 nm とする。比較として、同波長における、第 1、第 2 のアーム導波路 3408、3409 間の光路長差の温度依存性（線 X）、温度依存型位相差生成カプラ 3407 の 2 出力間で生成される光路長差の温度依存性（線 Y）を併せて示す。図 37 より、線 X においては 2 次の温度依存性が残留しているが、上記 MZI 全体としての光路長差（線 Z）は、線 X の光路長差と、温度依存型位相差生成カプラ 3407 で与えられる光路長差（線 Y）の和となるので、ここでは線 X とは逆符号の 2 次的な温度依存性となる。

40

【0081】

図 38 は、本実施形態の光波長合分波回路 3400 において、MZI 部分の透過波長の相対的な温度依存性、AWG 部分の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依

50

存性、MZI同期AWG全体の中央波長チャネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を示した図である。また、図39は、光波長合分波回路3400における、温度-40、20、80での中央波長チャネルの透過波形を示した図である。図38、39より、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されており、また、AWG部分において残留していた2次の温度依存性が、MZI部分における逆符号の2次的な温度依存性により補償されていることが分かる。従来技術によるアサermalMZI同期AWGにおいて使用温度領域 $T = -40 \sim 80$ の範囲で 0.07 nm 残留していた透過中心波長の温度依存性は、その変動量を 0.02 nm すなわち波長チャネル間隔の3%にまで低減できる。

【0082】

10

[第5の実施の形態]

本発明の第5の実施形態に係る光波長合分波回路について説明する。本実施形態では、特許文献6に開示される低損失かつ平坦な透過スペクトルを有するAWGであって、透過波長の主要な温度依存性が補償されたアサermalAWGにおいて、本発明の課題解決手段を適用したものである。

【0083】

図45は、本実施形態における光波長合分波回路4500の構成を示す平面図である。光波長合分波回路4500は、第1のスラブ導波路4501と、アレイ導波路4502と、第2のスラブ導波路4503と、第2の入出力導波路4504と、第2のスラブ導波路4503に形成され、温度補償材料が充填されている溝4505と、第1の入出力導波路4506と、温度依存型位相差生成コブラ4507と、第1のアーム導波路4508と、第2のアーム導波路4509と、光モード合成コブラ4510と、第1のアーム導波路4508に形成され、温度補償材料が充填されている溝4511とを備える。図45において、 i 番目のアレイ導波路の長さ L_i は、 $L_i = L_1 + (i - 1) \cdot \Delta L$ と表され、一定量 ΔL ずつ順次長くなるように設計されている。これに応じて、各アレイ導波路を通過し、中央の波長チャネルを通過する光波が、第2のスラブ導波路4503において溝4505により分断される長さ L_i' は $L_i' = (i - 1) \Delta L'$ と表され、 ΔL に比例した量 $\Delta L'$ ずつ順次長くなるような形状をしている。また第2のアーム導波路4509に対する第1のアーム導波路4508の長さの差は Δl に設計されており、第1のアーム導波路において溝4511により分断される長さは、 Δl に比例した量 $\Delta l'$ となるよう設計されている。

20

30

【0084】

光波長合分波回路4500は、導波路の Δ が1.5%、コア厚 $4.5 \mu\text{m}$ 、実効屈折率温度係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-8} \times T$ 、アレイ導波路4502、第2の入出力導波路4504、第1の入出力導波路4506、第1のアーム導波路4508、第2のアーム導波路4509のコア幅は $4.5 \mu\text{m}$ であり、第1のスラブ導波路4501、第2のスラブ導波路4503の長さは $8200 \mu\text{m}$ である。第2の入出力導波路4504は第2のスラブ導波路4503に接続する部分において $15 \mu\text{m}$ 間隔で波長チャネル数配置されており、その終端には開口幅 $11.0 \mu\text{m}$ の直線テーパ導波路が設けられている。温度補償材料はシリコン樹脂（屈折率温度係数 $\alpha' = -3.5 \times 10^{-4} + -1.5 \times 10^{-7} \times T$ ）である。また、光波長合分波回路4500は、波長チャネル数40、波長チャネル間隔 0.4 nm （ 50 GHz ）、中央の波長チャネル（21番目の波長チャネル）の透過波長 1544.53 nm （ 194.1 THz ）と設計されている。このときアレイ導波路4502の本数は250本、 ΔL は $62.6 \mu\text{m}$ 、 Δl は $4040 \mu\text{m}$ である。ここで溝4505、4511に充填された温度補償材料により与えられるべき $\Delta L'$ および $\Delta l'$ は、 $\Delta L' = \Delta L / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta L / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、 $\Delta l' = \Delta l / (1 - \alpha' / \alpha) = \Delta l / (1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2 T) / (\alpha_1 + \alpha_2 T))$ 、となる。ここで光波長合分波回路4500の使用温度領域は、 $T = -5 \sim 65$ であるとする。このとき中央の $T = 30$ で上記条件を満足するよう設計されるので、 $\Delta L' = 1.79 \mu\text{m}$ 、 $\Delta l' = 115.4 \mu\text{m}$ となる。この設計により、アレ

40

50

イ導波路４５０２の隣接する導波路間の光波長差における１次の温度依存性、および第１、第２のアーム導波路４５０８、４５０９間の光路長差における１次の温度依存性が補償されている。

【００８５】

図４６は、光モード合成カブラ４５１０を実現する構成の一例を示したものである。本実施形態において、光モード合成カブラとは、一方の入力導波路から入力された基本モード光を出力導波路の基本モードに結合させ、他方の入力導波路から入力した基本モード光を変換して出力導波路の１次モードに結合させるカブラである。ここで光モード合成カブラ４５１０は導波路幅が非対称な方向性結合器であり、第１のアーム導波路４５０８に接続する導波路４６０１ａの幅を $2.5\mu\text{m}$ 、第２のアーム導波路４５０９に接続する導波路４６０１ｂの幅を $8\mu\text{m}$ とし、導波路４６０１ａ、４６０１ｂの長さは $500\mu\text{m}$ としている。また、第２のアーム導波路４５０９から導波路４６０１ｂへは、直線テーパにより滑らかに導波路幅が変換されている。このとき導波路４６０１ａの基底モード実効屈折率と、導波路４６０１ｂの１次モード実効屈折率はほぼ等しくなっており、第１のアーム導波路４５０８から導波路４６０１ａに入力する基底モード光は、導波路４６０１ｂの１次モードに結合する。また、第２のアーム導波路４５０９から入力する基底モード光は、そのまま導波路４６０１ｂを基底モードで伝播するので、出力導波路であるマルチモード導波路４６０２へは基底モードと１次モードが合成されて伝播し、第１のスラブ導波路４５０１に入力する。ただし、マルチモード導波路４６０２は必ずしも必要ではなく、導波路４６０１ｂが第１のスラブ導波路４５０１に直接接続してもよい。また、光モード合成カブラ４５１０において完全に合成できなかった光波が、漏光として光波長合分波回路の特性を劣化させないため、導波路４６０１ａにつながる導波路を、遮光材料が充填された溝４６０３等により終端するのが好ましい。このとき溝の端面は導波路に垂直でなく８度程度傾斜していると、更に光波の反射を抑制できるので好ましい。

【００８６】

第１のスラブ導波路４５０１に入力する基底モード光と１次モード光の合成フィールドは、光の波長にしたがって上記モード間の位相差が周期的に変化することにより、周期的に振動をする。本実施形態においてその振動周期波長は 0.4nm である。ここで、上記合成フィールドが変化することにより第１のスラブ導波路４５０１への光波の入射位置が変化し、各アレイ導波路までの光路長が変化する。そうすると、光波長合分波回路全体での光路長差が変化し、第２のスラブ導波路４５０３の終端で集光する光の位置が変化する。いま、光波の入射位置変化の周期波長は 0.4nm であり、これはＡＷＧでの波長チャンネル間隔に一致している。すなわちある波長領域において、ＡＷＧの第１のスラブ導波路４５０１に入射する光の位置変化と、ＡＷＧ単体において第２のスラブ導波路４５０３の終端で集光する光の位置変化はほぼ同期している。これにより、その波長領域において波長合分波回路全体では、第２のスラブ導波路４５０３の終端で集光する光の位置はほとんど変化せず、従って、平坦な透過スペクトル特性を得ることができる。

【００８７】

図４７は、光モード合成カブラ４５１０を実現する構成の別の例を示したものである。図４７の構成においては、図４６と同様に非対称な方向性結合器ではあるが、導波路４７０１ａはその幅が徐々に狭くなり、幅が無くなって終端する構造になっている。このとき、導波路４７０１ａ、４７０１ｂの長さは $1500\mu\text{m}$ に設計されている。図４７の構成により、図４６の構成に比較して、導波路４７０１ａから導波路４７０１ｂへの光波の結合率をほぼ１００％にすることができるため、損失特性の面で有利である。また、図４８は光モード合成カブラ４５１０を実現する構成の更に別の例を示したものである。図４８の構成においては、光モード合成カブラ４５１０は２つのマルチモード干渉回路（ＭＭＩ）からなる。この構成については詳しくは、非特許文献５に詳しく記載されている。ここで、図４８に示す光モード合成カブラ４５１０は、第１のＭＭＩ４８０１ａと、第２のＭＭＩ４８０１ｂと、中間導波路４８０２ａ、４８０２ｂおよび４８０２ｃとを備える。第１のＭＭＩ４８０１ａは、幅 $20\mu\text{m}$ 、長さ $754\mu\text{m}$ 、第２のＭＭＩ４８０１ｂは、幅

20 μm 、長さ377 μm であり、中間導波路4802aは幅4.5 μm 、長さ50 μm であり、中間導波路4802bは幅4.5 μm 、長さ51.5 μm であり、中間導波路4802cは幅4.5 μm 、長さ53 μm である。一般に、MMIは方向性結合器に比較して、導波路幅の変化に対する分岐特性の変化が小さい。従って図48の構成により、図46の構成に比較して、より作製トレランスに優れた光波長合分波回路が実現可能である。

【0088】

図49は、本実施形態の光波長合分波回路4500における、温度依存型位相差生成カブラ4507の構成を示す平面図である。ここで温度依存型位相差生成カブラ4507は、方向性結合器で形成された第1の光カブラ4901と、第3のアーム導波路4902と、第4のアーム導波路4903と、方向性結合器で形成された第2の光カブラ4904と、第3のアーム導波路4902に4分割されて形成され、温度補償材料であるシリコン樹脂が挿入された溝4905とを備える。ここで第3、第4のアーム導波路4902、4903のコア幅を4.5 μm とし、第1の光カブラ4901から第3、第4のアーム導波路4902、4903それぞれへの光パワー分岐比を6:94%とし、第2の光カブラ4905の分岐比を15:85%、第4のアーム導波路4903に対する第3のアーム導波路4902の長さの差は2.5 μm 、溝4905が第3のアーム導波路4902を分断する幅は52.5 μm としている。この構成により、温度依存型位相差生成カブラ4507は、全体でほぼ分岐比15:85%のカブラとして動作する。

【0089】

図50は、上記の温度依存型位相差生成カブラ4507において、第1の入出力導波路4506から波長1536.61 nm(1番目の波長チャンネルの波長)、1544.53 nm(中央21番目の波長チャンネルの波長)、1552.12 nm(40番目の波長チャンネルの波長)の光波を入射したときに、第2の光カブラ4504の2出力間に与えられる位相差の、-5~65における温度依存性を示したものである。ここで上記位相差は、第2のアーム導波路4509に接続する出力に対する、第1のアーム導波路4508に接続する出力の位相差とする。図より、-5~65の温度範囲で、-1.62 π から-1.35 π の間で位相差が変化し、また位相差は、使用する波長チャンネルの波長範囲では殆ど波長に依存しない。

【0090】

図51は、本実施形態の光波長合分波回路4500において、温度依存型位相差生成カブラ4507から光モード合成カブラ4510の入力までで生成される光路長差の、-5~65における温度依存性(線Z)を示した図である。ここで上記光路長差は、第2のアーム導波路4509を経由する光路長に対する、第1のアーム導波路4508を経由する光路長の差とし、光波の波長は1544.53 nmとする。比較として、同波長における、第1、第2のアーム導波路4508、4509間の光路長差の温度依存性(線X)、温度依存型位相差生成カブラ4507の2出力間で生成される光路長差の温度依存性(線Y)を併せて示す。図より、線Xにおいては2次の温度依存性が残留しているが、上記MMI全体としての光路長差(線Z)は、線Xの光路長差と、温度依存型位相差生成カブラ307で与えられる光路長差(線Y)の和となるので、ここでは線Xとは逆符号の2次の温度依存性となる。

【0091】

図52は、本実施形態の光波長合分波回路4500において、AWG部分の中央波長チャンネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性と、光波長合分波回路全体の中央波長チャンネルでの透過中心波長の相対的な温度依存性を示した図である。また、図53は、光波長合分波回路4500における、温度-5、30、65での中央波長チャンネルの透過波形を示した図である。図52、53より、低損失、かつスペクトルの平坦性の高い透過波形が実現されており、また、AWG部分において残留していた2次の温度依存性が、温度依存型位相差生成カブラ4507から光モード合成カブラ4510の入力までで生成される光路長差における逆符号の2次の温度依存性によって補償されていることが分かる。従来技術によるアサermal AWGにおいて使用温度領域 $T = -5 \sim 65$ の範囲で0.0

10

20

30

40

50

3 nm 残留していた透過中心波長の温度依存性は、その変動量を 0.007 nm すなわち波長チャンネル間隔の 2 % にまで低減できている。

【0092】

以上のように本発明の 5 つの実施形態による光波長合分波回路によれば、従来技術のアサermal AWG および MZI 同期アサermal AWG において残留していた透過中心波長の 2 次の温度依存性が補償され、従来に比較して透過中心波長精度に優れた光波長合分波回路を得ることができる。

【0093】

なお、上記の全ての実施形態では、導波路の比屈折率差、コア幅及びコア厚を特定の値に限定して説明したが、本発明の適用範囲はこの値に限定されるものではない。

10

【0094】

また、上記全ての実施形態では、MZI 同期 AWG の設計パラメーターを特定の値に限定して説明したが、本発明の適用範囲はこのパラメーターに限定されるものではない。

【0095】

また、上記全ての実施形態では、使用温度領域を特定の値に限定して説明したが、本発明の適用範囲はこの値に限定されるものではない。

【0096】

また、上記全ての実施形態では、温度依存位相差生成カブラにおける光路長差に温度依存性を与える機構として、アーム導波路またはその近傍に溝を形成し、温度補償材料を挿入する構成を適用したが、本発明の適用範囲は、この構成に限定されるものではなく、光路長差の所定の温度依存性を与えるいかなる構成も適用することができる。例えば、アーム導波路を形成する導波路とは違う媒質で形成された導波路によって、アーム導波路の一部を置換する等の構成も適用可能である。

20

【0097】

また、上記全ての実施形態では、分割する溝の個数を特定の値に限定して説明したが、本発明の適用範囲は、この数値に限定されるものではない。

【0098】

また、上記全ての実施形態では、温度補償材料としてシリコン樹脂を使用したか、本発明の適用範囲は、この材料に限定されるものではなく、シリコン樹脂、エポキシ樹脂、フッ素樹脂等の光学樹脂などの、導波路の実効屈折率温度係数と異なる屈折率温度係数を有するいかなる材料にも適用することができる。

30

【0099】

また、第 1、第 4 および第 5 の実施形態では、1 次の温度依存性を補償する構成として、第 2 のスラブ導波路に溝を形成し温度補償材料を挿入したが、本発明の適用範囲はこの位置に限定されるものではなく、溝は第 1 のスラブ導波路からアレイ導波路を経て第 2 のスラブ導波路に至る光経路上のいかなる位置に設置し、また、異なる複数の位置に分散して設置しても、1 次の温度依存性を補償することができる。

【図面の簡単な説明】

【0100】

【図 1】本発明の一実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カブラの構成図である。

40

【図 2】図 1 の温度依存型位相差生成カブラにおいて与えられる出力導波路 104 b に対する 104 a の位相差の温度変化の例を示す図である。

【図 3】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路の構成図である。

【図 4】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カブラ 307 の構成図である。

【図 5】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カブラ 307 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 6】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における MZI での光路長差の温度依存性を示す図である。

50

【図 7】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過中心波長の温度依存性を示す図である。

【図 8】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過スペクトルの温度依存性を示す図である。

【図 9】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 307 の別構成を示す図である。

【図 10】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における図 9 の構成の温度依存型位相差生成カプラ 307 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 11】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 307 の別構成を示す図である。

【図 12】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 307 の別構成を示す図である。

【図 13】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 307 の別構成を示す図である。

【図 14】図 13 において、線 B B' 部分の断面構造を示す図である。

【図 15】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 307 の別構成を示す図である。

【図 16】図 15 において、線 C C' 部分の断面構造を示す図である。

【図 17】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における第 1、第 2 のアーム導波路 308、309、および溝 311 の別構成を示す図である。

【図 18】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における第 1、第 2 のアーム導波路 308、309、および溝 311 の別構成を示す図である。

【図 19】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における第 2 の光カプラ 315 の別構成を示す図である。

【図 20】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における第 1 の光カプラ 312 の別構成を示す図である。

【図 21】本発明の第 1 の実施形態に係る光波長合分波回路における第 1 の光カプラ 312 の別構成を示す図である。

【図 22】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路の構成図である。

【図 23】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 2207 の構成図である。

【図 24】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 2207 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 25】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路における M Z I での光路長差の温度依存性を示す図である。

【図 26】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過中心波長の温度依存性を示す図である。

【図 27】本発明の第 2 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過スペクトルの温度依存性を示す図である。

【図 28】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路の構成図である。

【図 29】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 2807 の構成図である。

【図 30】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 2807 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 31】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路における M Z I での光路長差の温度依存性を示す図である。

【図 32】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過中心波長の温度依存性を示す図である。

【図 33】本発明の第 3 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過スペクトルの温度依存性を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 3 4】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路の構成図である。

【図 3 5】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 3 4 0 7 の構成図である。

【図 3 6】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 3 4 0 7 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 3 7】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路における M Z I での光路長差の温度依存性を示す図である。

【図 3 8】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過中心波長の温度依存性を示す図である。

【図 3 9】本発明の第 4 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過スペクトルの温度依存性を示す図である。

【図 4 0】従来技術によるスラブ導波路に溝を形成するタイプのアサermal A W G の構成を示す平面図である。

【図 4 1】図 4 0 のアサermal A W G において線 A A ' 部分の断面構造を示した図である。

【図 4 2】従来技術によるアサermal M Z I 同期 A W G の構成を示す平面図である。

【図 4 3】従来技術によるアサermal M Z I 同期 A W G における透過中心波長の温度変動を示す図である。

【図 4 4】従来技術によるアサermal M Z I 同期 A W G における透過スペクトルの温度変動を示す図である。

【図 4 5】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路の構成図である。

【図 4 6】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における光モード合成カプラ 4 5 1 0 の構成の例を示した図である。

【図 4 7】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における光モード合成カプラ 4 5 1 0 の構成の別の例を示した図である。

【図 4 8】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における光モード合成カプラ 4 5 1 0 の構成の更に別の例を示した図である。

【図 4 9】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 4 5 0 7 の構成の例を示す図である。

【図 5 0】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 4 5 0 7 で生成される位相差の温度依存性を示す図である。

【図 5 1】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における温度依存型位相差生成カプラ 4 5 0 7 から光モード合成カプラ 4 5 1 0 の入力までで生成される光路長差の温度依存性を示す図である。

【図 5 2】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過中心波長の温度依存性を示す図である。

【図 5 3】本発明の第 5 の実施形態に係る光波長合分波回路における透過スペクトルの温度依存性を示す図である。

【符号の説明】

【 0 1 0 1 】

1 0 0、3 0 7、2 2 0 7、2 8 0 7、3 4 0 7、4 2 0 7、4 5 0 7 温度依存型位相差生成カプラ

1 0 1、3 1 2、2 2 1 2、2 8 1 2、3 4 1 2、4 9 0 1 第 1 の光カプラ

1 0 1 a 入力導波路

1 0 2、3 1 3、2 2 1 3、2 8 1 3、3 4 1 3、4 9 0 2 第 3 のアーム導波路

1 0 3、3 1 4、2 2 1 4、2 8 1 4、3 4 1 4、4 9 0 3 第 4 のアーム導波路

1 0 4、3 1 5、2 2 1 5、2 8 1 5、3 4 1 5、4 9 0 4 第 2 の光カプラ

1 0 4 a、1 0 4 b 出力導波路

1 0 5、3 0 5、3 1 1、3 1 6、2 2 1 1、2 2 1 6、2 8 1 1、2 8 1 6、3 4 0 5、3 4 1 6、4 0 0 6、4 2 0 5、4 2 1 1、4 5 0 5、4 5 1 1、4 9 0 5 温度補

10

20

30

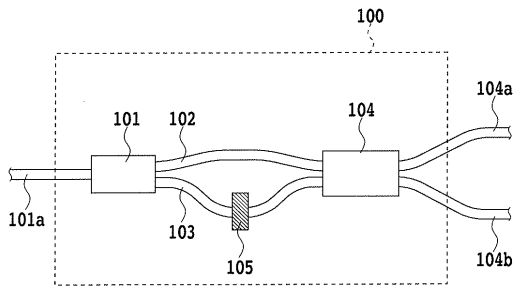
40

50

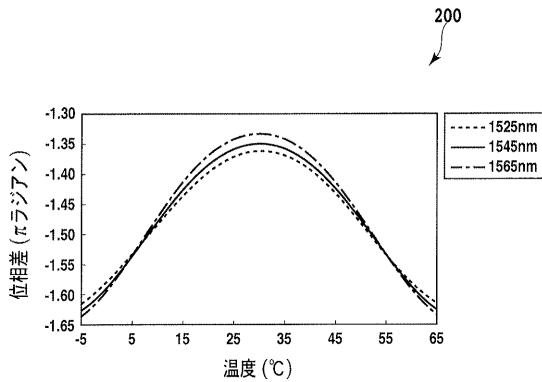
償材料挿入溝

3 0 0、2 2 0 0、2 8 0 0、3 4 0 0、4 0 0 0、4 2 0 0、4 5 0 0	光波長合分	
波回路		
3 0 1、2 2 0 1、2 8 0 1、3 4 0 1、4 0 0 2、4 2 0 1、4 5 0 1	第 1 のスラ	
ブ導波路		
3 0 2、2 2 0 2、2 8 0 2、3 4 0 2、4 0 0 3、4 2 0 2、4 5 0 2	アレイ導波	
路		
3 0 3、2 2 0 3、2 8 0 3、3 4 0 3、4 0 0 4、4 2 0 3、4 5 0 3	第 2 のスラ	
ブ導波路		
3 0 4、2 2 0 4、2 8 0 4、3 4 0 4、4 0 0 5、4 2 0 4、4 5 0 4	第 2 の入出	10
力導波路		
3 0 6、2 2 0 6、2 8 0 6、3 4 0 6、4 0 0 1、4 2 0 6、4 5 0 6	第 1 の入出	
力導波路		
3 0 8、2 2 0 8、2 8 0 8、3 4 0 8、4 2 0 8、4 5 0 8	第 1 のアーム導波路	
3 0 9、2 2 0 9、2 8 0 9、3 4 0 9、4 2 0 9、4 5 0 9	第 2 のアーム導波路	
3 1 0、3 2 0 a、3 2 0 b、2 2 1 0、2 2 1 7 a、2 2 1 7 b、2 8 1 0、2 8 1		
7 a、2 8 1 7 b、3 4 1 0、3 4 1 7 a、3 4 1 7 b、4 2 1 0	方向性結合器	
3 1 7、4 0 0 7	シリコン基板	
3 1 8、4 0 0 8	導波路コア	
3 1 9、4 0 0 9	クラッド	20
3 2 1 a、3 2 1 b、2 2 1 8 a、2 2 1 8 b、2 8 1 8 a、2 8 1 8 b、3 4 1 8 a		
、3 4 1 8 b	アーム導波路	
2 2 0 5	金属棒	
2 8 0 5	金属板	
4 2 0 0 a	A W G	
4 2 0 0 b	M Z I	
4 5 1 0	光モード合成カブラ	
4 6 0 1 a、4 6 0 1 b、4 7 0 1 a、4 7 0 1 b、4 8 0 2 a、4 8 0 2 b、4 8 0		
2 c	導波路	
4 6 0 2	マルチモード導波路	30
4 6 0 3	遮光材料挿入溝	

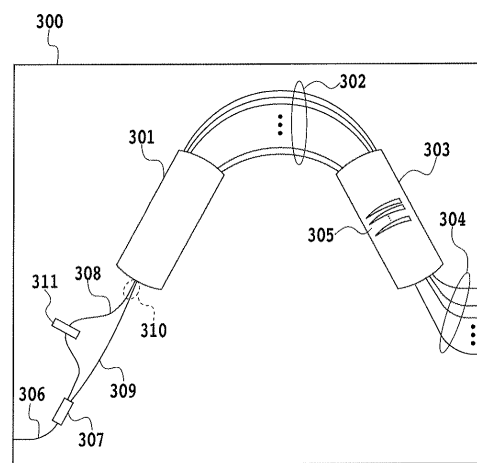
【図 1】



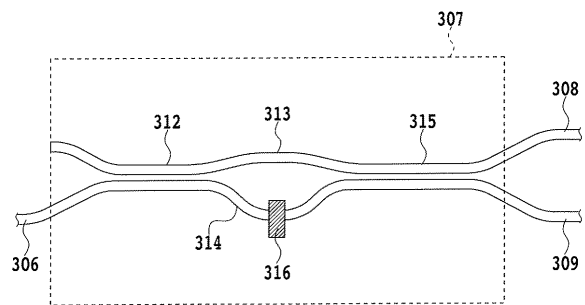
【図 2】



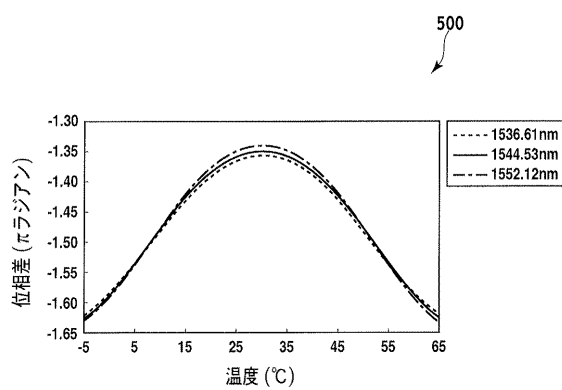
【図 3】



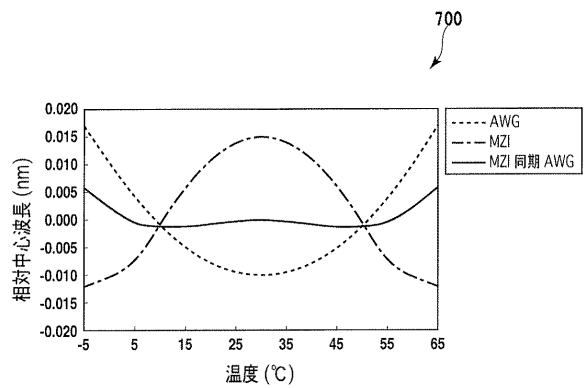
【図 4】



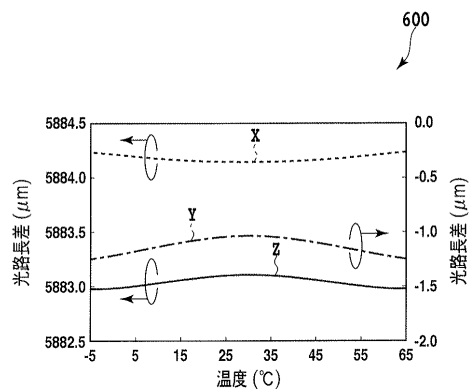
【図 5】



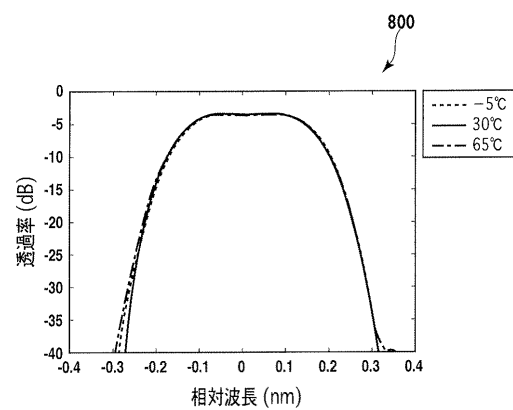
【図 7】



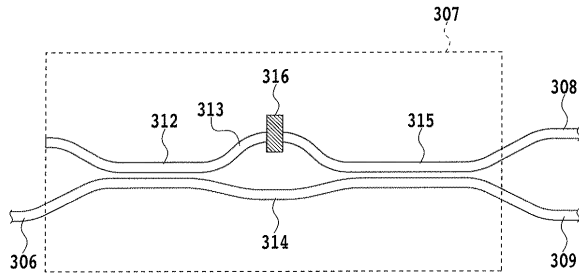
【図 6】



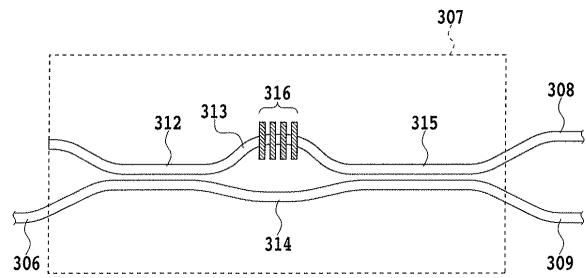
【図 8】



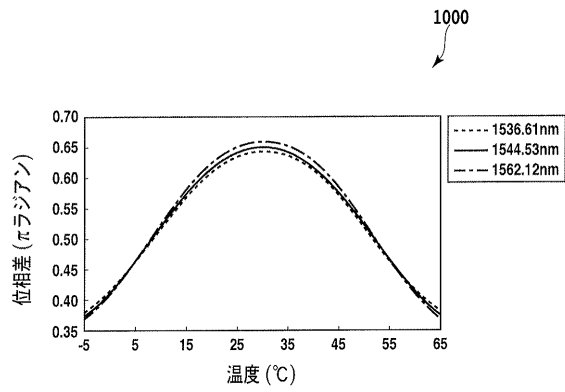
【図 9】



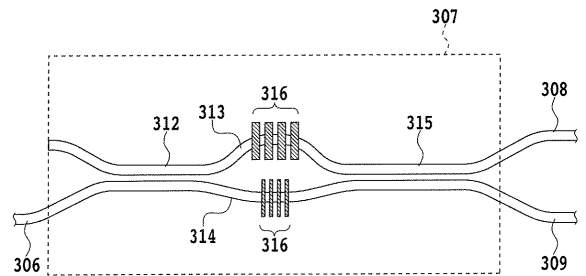
【図 11】



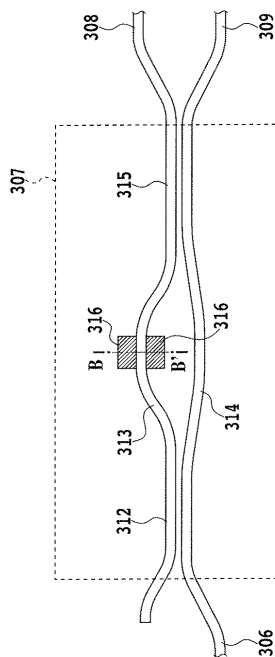
【図 10】



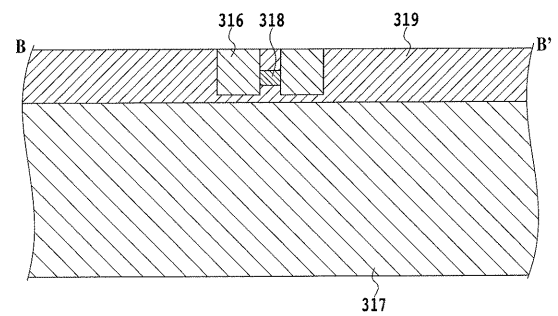
【図 12】



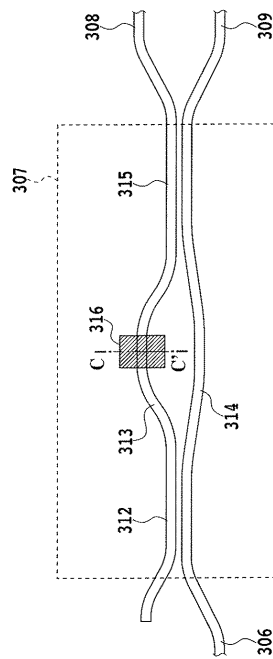
【図 13】



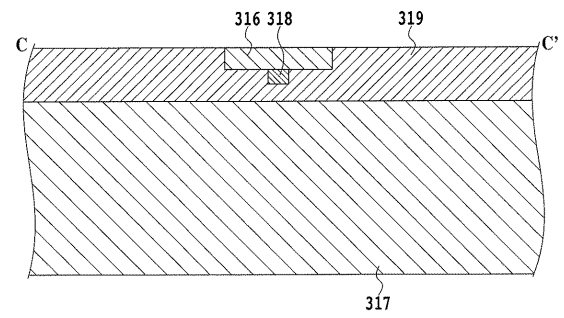
【図 14】



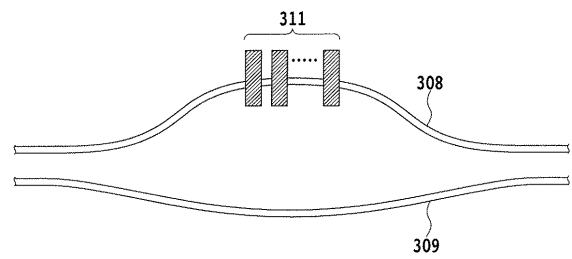
【図 15】



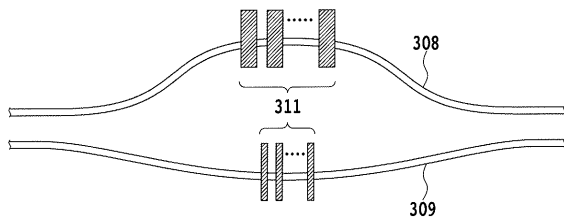
【図 16】



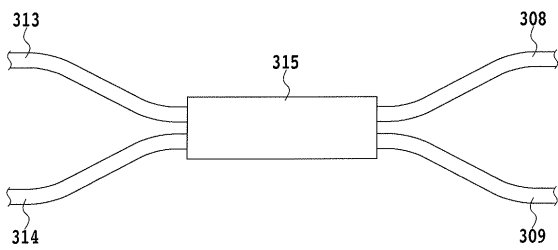
【図 17】



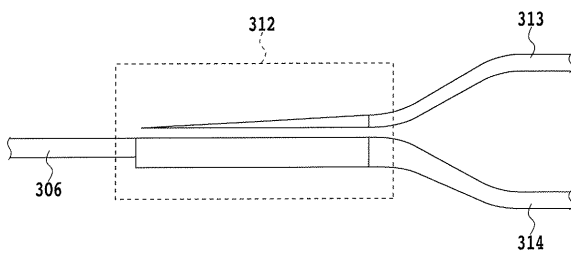
【図 18】



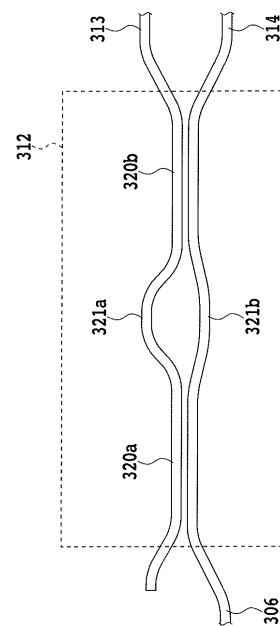
【図 19】



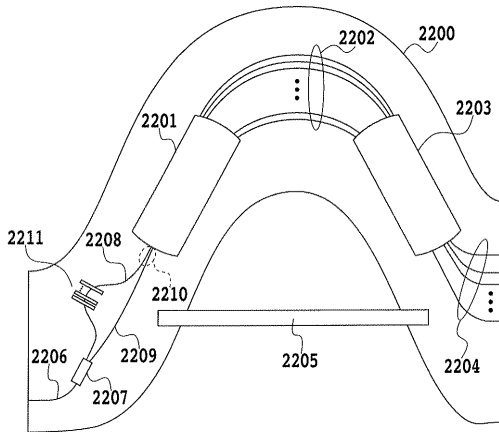
【図 20】



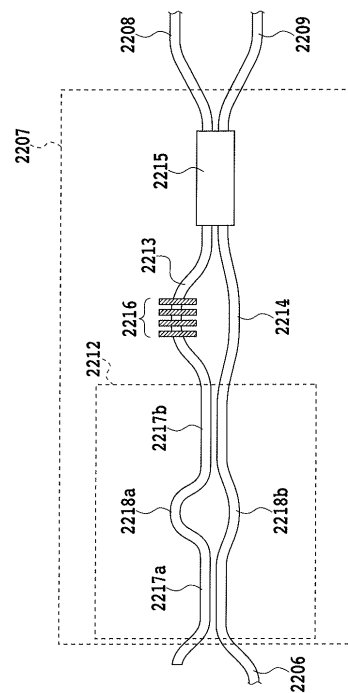
【図 21】



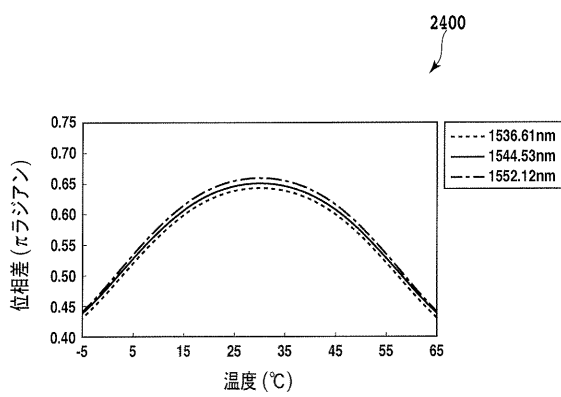
【図 2 2】



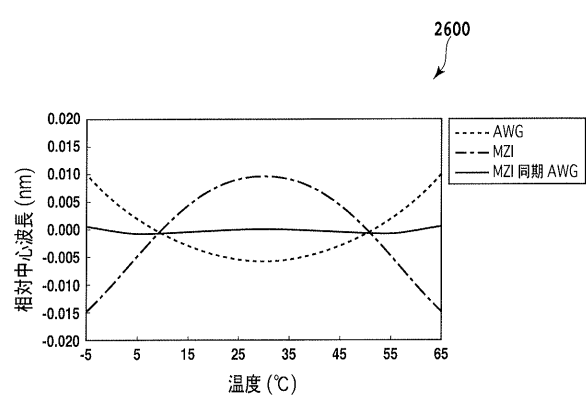
【図 2 3】



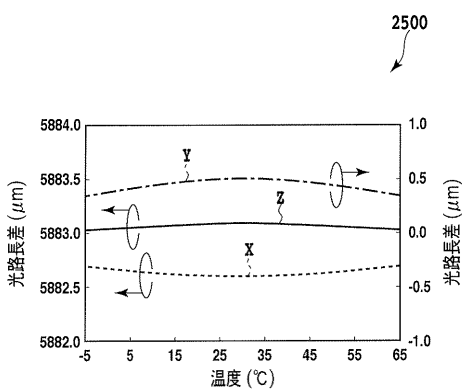
【図 2 4】



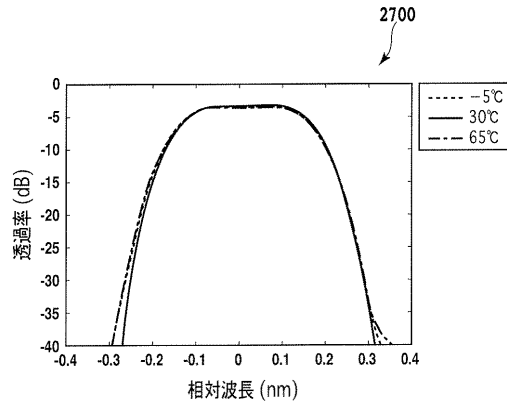
【図 2 6】



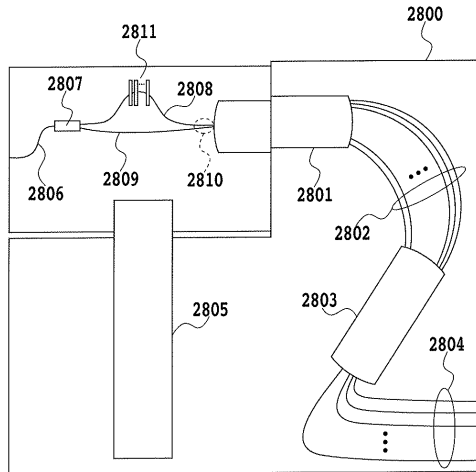
【図 2 5】



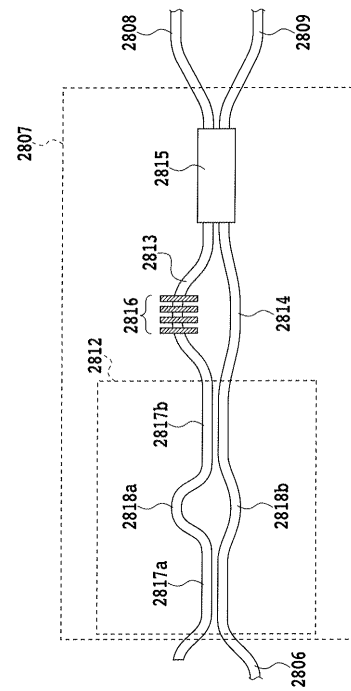
【図 2 7】



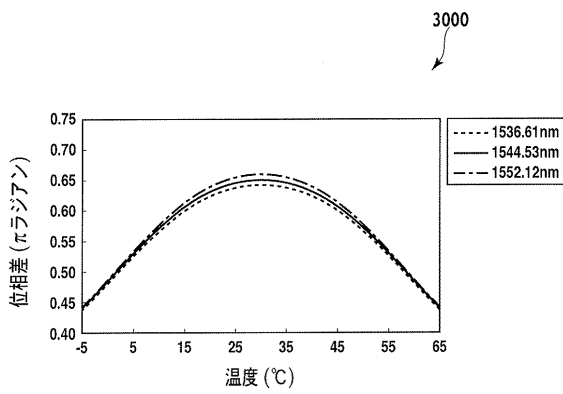
【図 28】



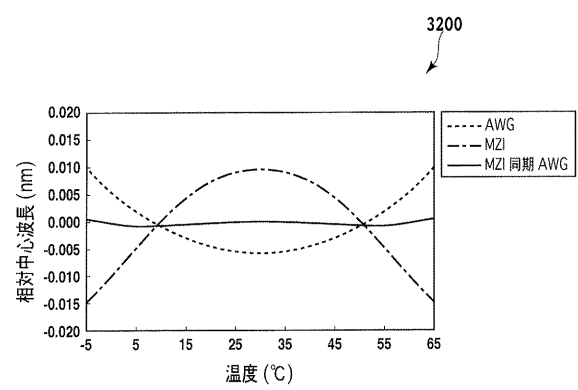
【図 29】



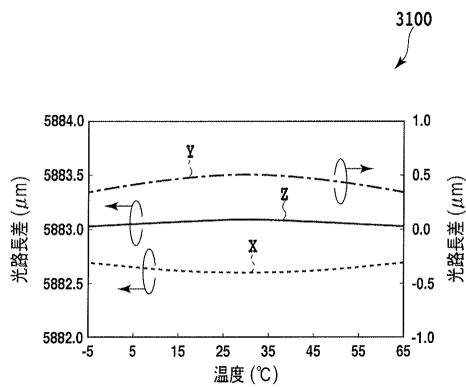
【図 30】



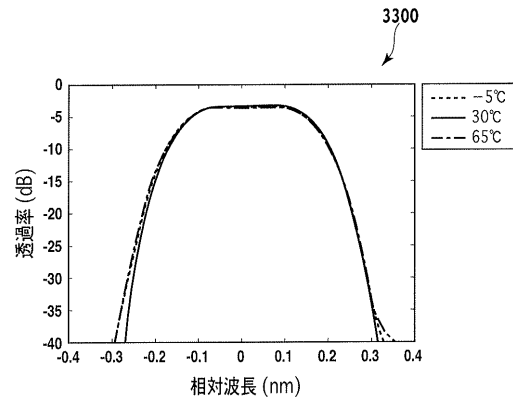
【図 32】



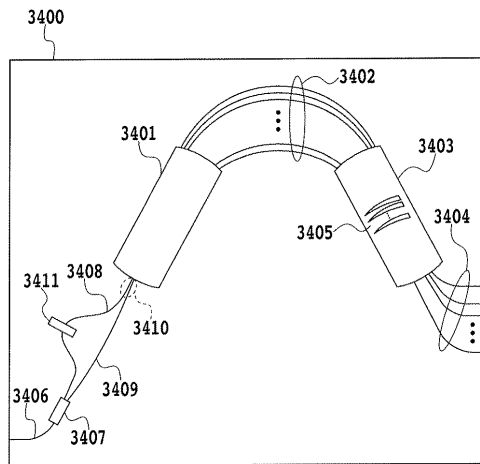
【図 31】



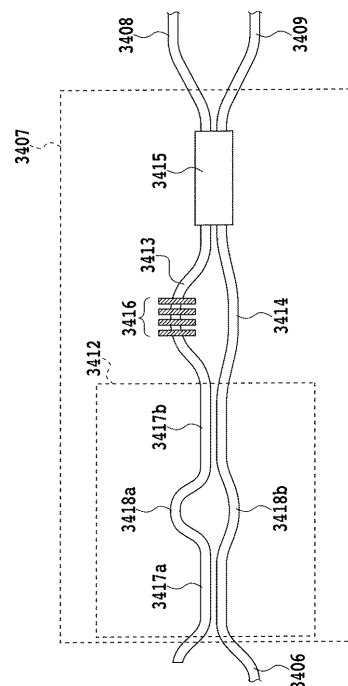
【図 33】



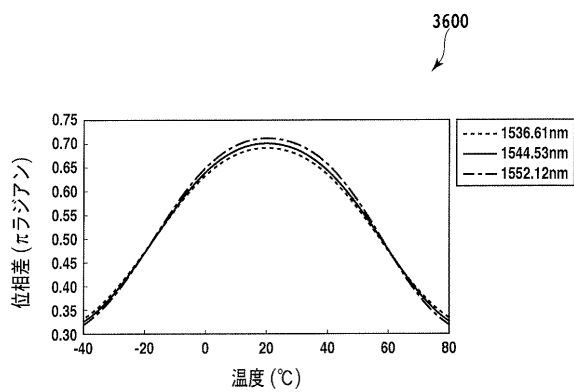
【図 3 4】



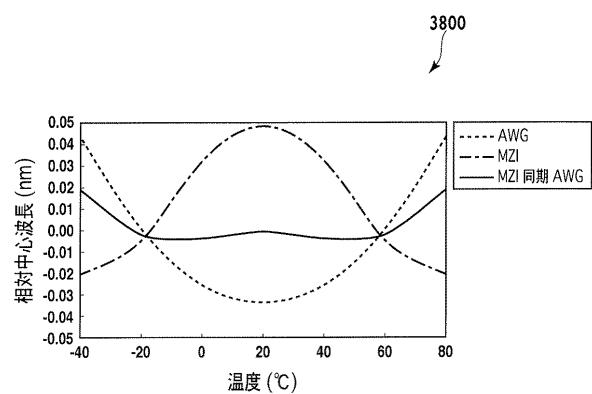
【図 3 5】



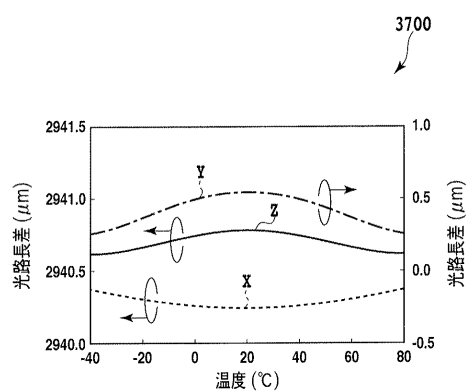
【図 3 6】



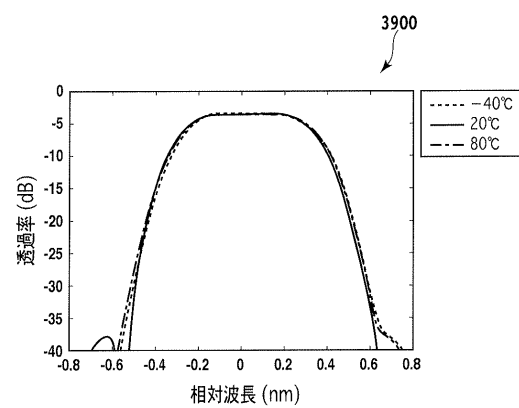
【図 3 8】



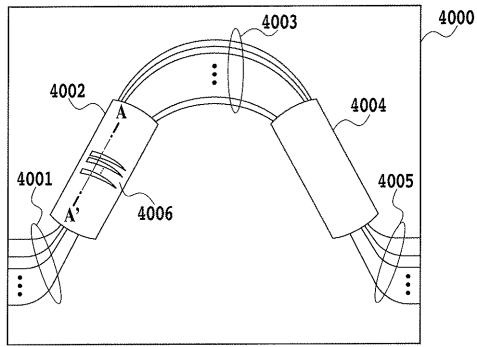
【図 3 7】



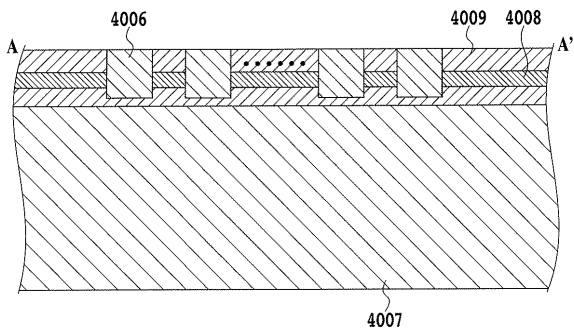
【図 3 9】



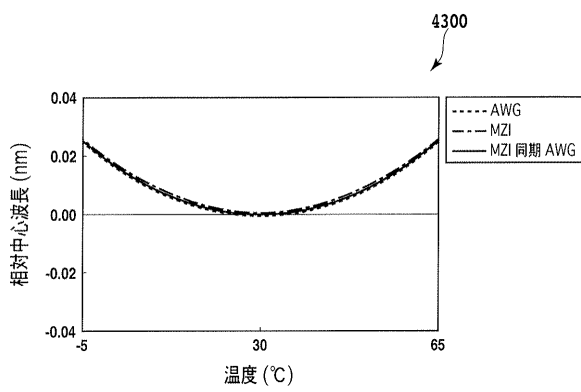
【図 40】



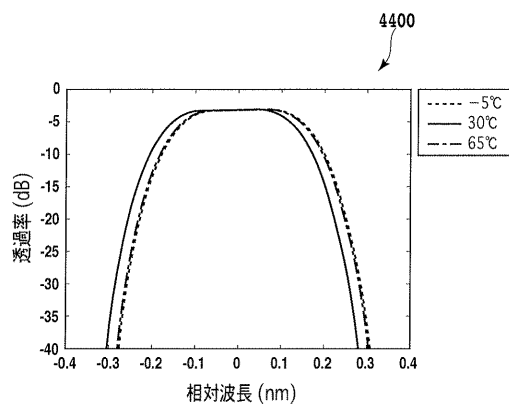
【図 41】



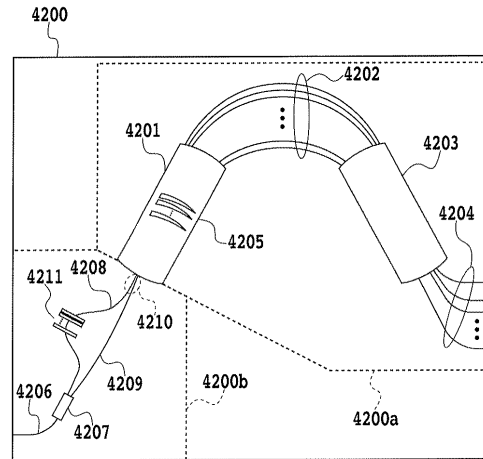
【図 43】



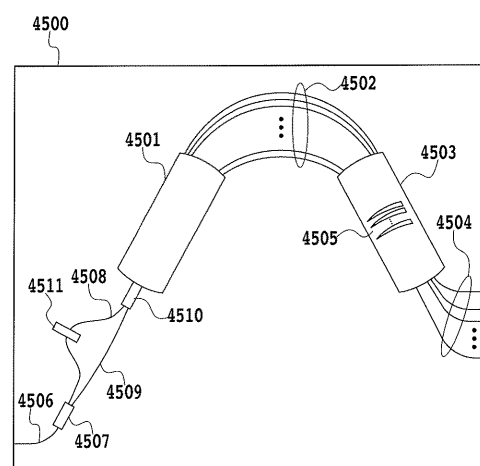
【図 44】



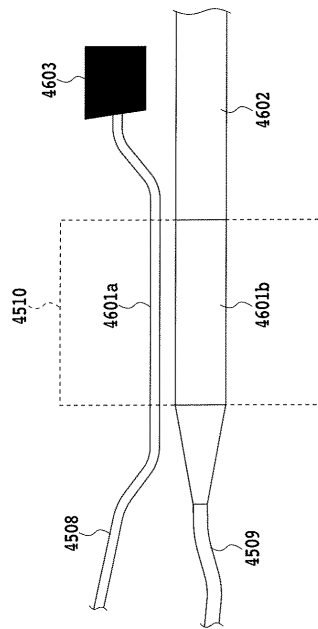
【図 42】



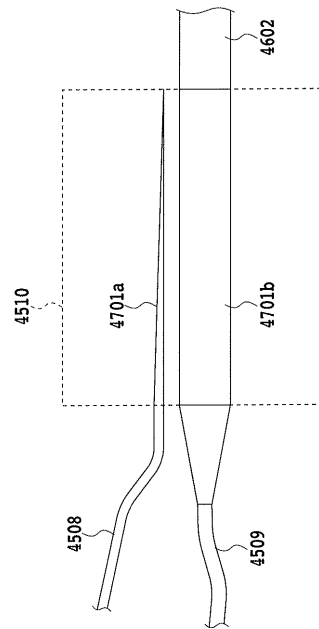
【図 45】



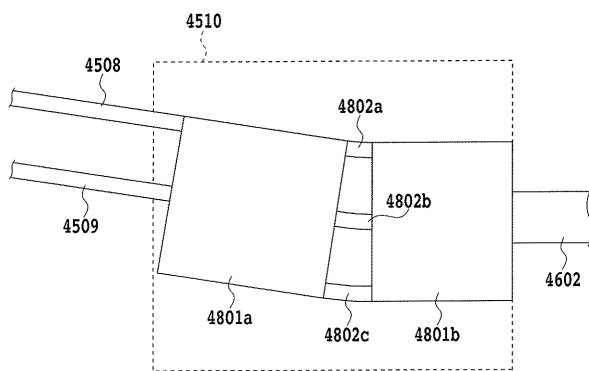
【図 46】



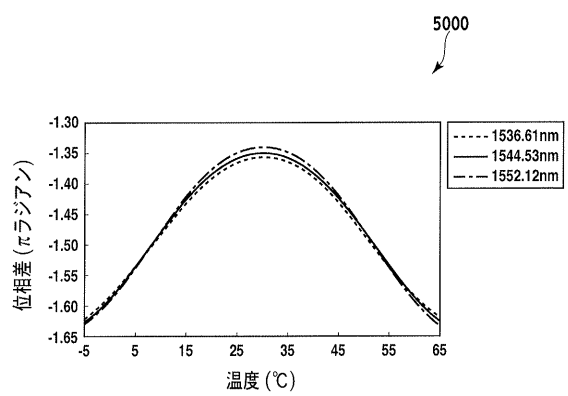
【図 47】



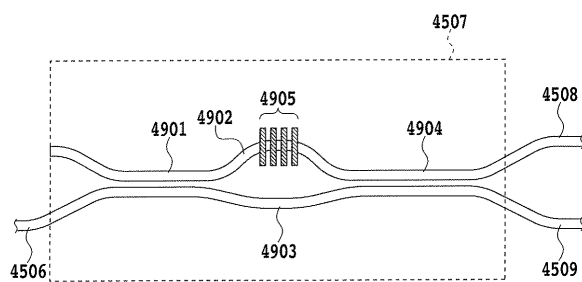
【図 48】



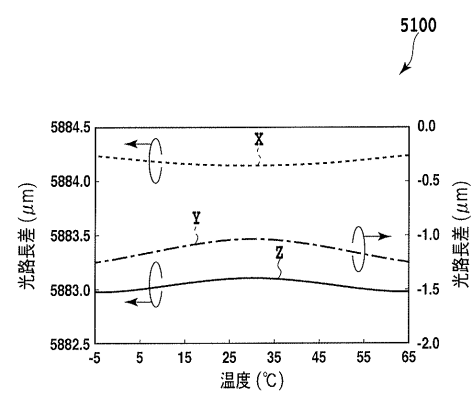
【図 50】



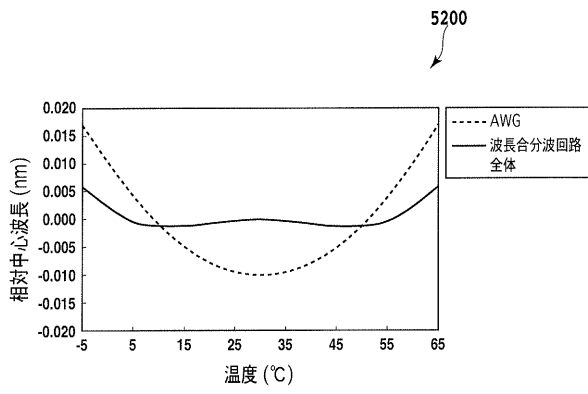
【図 49】



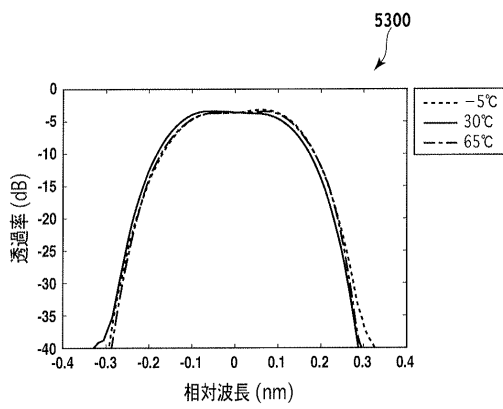
【図 51】



【図 5 2】



【図 5 3】



フロントページの続き

- (72)発明者 神徳 正樹
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 柴田 知尋
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 田中 拓也
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 井上 靖之
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 井藤 幹隆
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

Fターム(参考) 2H147 AB17 BB02 BE03 BE04 BE13 BE15 BE22 BG08 EA13C EA18D
EA20D GA01 GA02 GA19 GA23