

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4768127号  
(P4768127)

(45) 発行日 平成23年9月7日(2011.9.7)

(24) 登録日 平成23年6月24日(2011.6.24)

(51) Int. Cl.	F I	
GO2F 1/313 (2006.01)	GO2F 1/313	
GO2B 6/12 (2006.01)	GO2B 6/12	H
GO2F 1/01 (2006.01)	GO2F 1/01	C
GO2F 1/061 (2006.01)	GO2F 1/01	F
GO2F 1/065 (2006.01)	GO2F 1/061	505
請求項の数 19 (全 24 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号	特願2000-581482 (P2000-581482)	(73) 特許権者	500030666
(86) (22) 出願日	平成11年11月10日 (1999.11.10)		ネオフォトニクス・コーポレーション
(65) 公表番号	特表2002-529782 (P2002-529782A)		Neophotonics Corporation
(43) 公表日	平成14年9月10日 (2002.9.10)		アメリカ合衆国95134カリフォルニア
(86) 国際出願番号	PCT/US1999/026732		州サンノゼ、ザンカー・ロード2911番
(87) 国際公開番号	W02000/028355	(74) 代理人	100078282
(87) 国際公開日	平成12年5月18日 (2000.5.18)		弁理士 山本 秀策
審査請求日	平成18年10月10日 (2006.10.10)	(74) 代理人	100062409
(31) 優先権主張番号	60/107,823		弁理士 安村 高明
(32) 優先日	平成10年11月10日 (1998.11.10)	(74) 代理人	100113413
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 森下 夏樹
最終頁に続く			

(54) 【発明の名称】 熱光学ポリマーを含むフォトニックデバイス

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光学周波数を有する光信号を伝送する光ファイバ通信ネットワークの光学構成要素として用いるのに適するように構成される集積フォトニックデバイスであって、該集積フォトニックデバイスは、単一のメカニカル基板であって、該基板の表面にある光薄膜アセンブリの複数のコプラナー領域を支持する単一のメカニカル基板を含み、

該複数の領域のうちの少なくとも1つは、コアおよびクラディングを有する少なくとも1つの光チャネル導波管を含むように構成される光コアおよびクラディング材料を含む低損失領域であり、該低損失領域を形成する該コアおよびクラディング材料の両方は、該集積フォトニックデバイスを介して伝送される光信号の該光学周波数で低光学損失を示す無機光化合物を含み、該無機光化合物は、シリカおよびドーパされたシリカを含む化合物の群から選択され、

該複数の領域のうちの他の少なくとも1つは、光チャネル導波管を形成するように構成される光コアおよびクラディング材料を含む活性領域であり、該活性領域の該コアおよびクラディング材料の両方は、少なくとも部分的に少なくとも1つの能動光化合物を含み、該少なくとも1つの能動光化合物は、熱変動にตอบสนองして熱伝導性および屈折変化率の一方または両方において該無機光化合物に対して実質的により大きな差を示し、該少なくとも1つの能動光化合物は、熱光学ポリマーを含む化合物の群から選択され、

該活性領域は、該低損失領域に物理的に隣接し、該活性領域の該光導波管は、該隣接する低損失領域の導波管に光学的にアライメントされる、集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 2】

前記活性領域の光コアは、前記能動光化合物の複数の短いセグメントを含み、該セグメントの各々は個々に、導波管コアの全てまたは一部にわたって挿入されるか、すぐ隣の導波管クラディングの全てまたは一部にわたって挿入されるか、あるいは、導波管コアの全てまたは一部にわたって、かつ、すぐ隣の導波管クラディングの全てまたは一部にわたって挿入される、請求項 1 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 3】

前記活性領域の導波管は、光軸を有し、該活性領域の該導波管の前記光コアは、該光軸に沿う溝であって、該光軸に沿う該溝の両側に低損失無機光コア材料の狭いリブがあり、該溝内に前記能動光化合物があるように配置された該光軸に沿う溝を有し、この光コアの 2 つのリブが該無機コア材料の屈折率より低い屈折率を有する能動材料を提供することを 10  
含む条件の下で該溝に及ぶ光モードの軸方向のガイドを提供するように全てが構成される、請求項 1 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 4】

前記能動化合物の十分近傍に位置する刺激源をさらに備え、該刺激源は、該刺激源の近傍において、前記コア材料に対する屈折率の局所的分布の変化か、クラディング材料に対する屈折率の局所的分布の変化か、または該コア材料および該クラディング材料に対する屈折率の局所的分布の変化をもたらす、請求項 1 または請求項 2 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 5】

前記能動化合物は、熱光学的であり、前記刺激源は、電氣的に駆動される熱源である、請求項 4 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 6】

前記集積フォトニックデバイスは、少なくとも 2 つのアームを有する干渉計を含み、該アームの少なくとも 1 つは、前記活性領域の少なくとも 1 つから構成される、請求項 4 または請求項 5 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 7】

前記集積フォトニックデバイスは、少なくとも 2 つの光学的に結合した導波管と、該導波管が光学的に結合される長さの少なくとも一部分に沿った能動化合物を含む領域とを含む、請求項 4 または請求項 5 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 8】

前記活性領域は、断熱性の Y 分岐、断熱性の X 分岐または放物面結合器から作製されるデジタル光スイッチであって、スイッチング機能を可能にする分岐している領域の近傍にわたって、通常、1 ミクロン当たり約  $10^{-4}$  以上である屈折率勾配を利用するデジタル光スイッチを含む、請求項 4 または請求項 5 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 9】

前記集積フォトニックデバイスは、2 つの導波管チャネルの見掛け導波管交差または接合を含み、前記能動化合物のバーは、該交差または接合に沿って位置し、該導波管は、ほぼ臨界角で該バーに対して位置し、該バーに沿って導かれる光信号の全反射を利用するスイッチまたは変調器を形成する、請求項 4 または請求項 5 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 10】

少なくとも 1 つの活性領域内で、前記チャネル導波管コアは、前記低損失無機化合物または前記能動化合物の一方であり、隣接クラディングの少なくとも 1 つは、該低損失無機化合物および該能動化合物の他方であり、さらに、該能動化合物の屈折率は、刺激に 40  
応答する該低損失無機化合物の屈折率に等しく、該屈折率が等しいことが確立される場合、該チャネルは、光を導波する能力を失う、請求項 1 に記載の集積フォトニックデバイス。

## 【請求項 11】

前記集積フォトニックデバイスは、光路を有する少なくとも 1 つの光学素子を含み、少なくとも 1 つの活性領域は、該光学素子の該光路の中に、または、該光路に沿って位置し 50

、該デバイスの刺激への応答の向上または抑制のいずれかを行なうように構成され、該デバイスは、

変調器と、

可変光減衰器と、

M × N 光スイッチであって、M および N は、個々に独立した 1 以上の整数の値を有する、M × N 光スイッチと、

アレイ状導波管格子であって、少なくとも 1 つの前記活性領域が導波管アレイに沿って配置される、アレイ状導波管格子と、

格子型フィルタと、

共鳴キャピティを有するファブリ - ペローフィルタであって、前記能動化合物が該共鳴キャピティ内に位置する、ファブリ - ペローフィルタと

からなる群から選択され、

該能動化合物は、

熱刺激に応答して屈折率を変化させる熱光学ポリマーと、

電界の刺激に応答して屈折率を変化させる電気光学ポリマーと、

歪み刺激に応答して屈折率を変化させる光弾性材料と、

歪み刺激に応答して屈折率を変化させる圧電光学材料と、

光フィールド刺激に応答して屈折率を変化させる光屈折材料と

からなる群から選択される、請求項 1、請求項 2、請求項 4、請求項 5 または請求項 10 に記載の集積フォトニックデバイス。

【請求項 1 2】

前記 2 つのリブおよび前記導波管の前記溝の内の能動光化合物は、該導波管を介して前記軸に沿って伝播する前記光信号のうち 1 つの光信号が横電界および横磁界光偏向の一方または両方に対する唯一の導光モードを有するようなジオメトリーで構成される、請求項 3 に記載の集積フォトニックデバイス。

【請求項 1 3】

前記集積フォトニックデバイスは、光フィールドの準モードを提供し、前記能動セグメントは個々に、第 1 の長さを有し、隣接する能動セグメント間のコアの部分は、第 2 の長さを有し、該第 2 の長さに対する該第 1 の長さの比は、該準モードに対する伝播定数の熱変動の大きさが、前記能動材料のみまたは前記無機光化合物のみにおける光信号に対する熱変動の大きさより実質的に小さく、該変動が、選択された公称動作温度で本質的にゼロとなるような比である、請求項 2 に記載の集積フォトニックデバイス。

【請求項 1 4】

前記導波管コアは、シリカから成り、該コアは、ゼロから約 3 ミクロンの範囲から選ばれた厚さを有するシリカクラディングのオーバーコートを含み、該シリカクラディングは、該シリカクラディングより実質的に高い熱光学係数を有する能動材料のコーティングを含み、前記導波管の一次モードの伝播定数の熱変動の大きさが、前記シリカクラディングの熱変動の大きさよりも実質的に小さく、該変動が、選択された公称動作温度で本質的にゼロである、請求項 1 に記載の集積フォトニックデバイス。

【請求項 1 5】

集積フォトニックデバイスを作製する方法であって、該方法は、

a) 単一の基板上で複数の無機受動導波管を形成する工程であって、該無機受動導波管は、低損失を有する無機誘電体材料を含む、工程と、

b) 該基板上に、コアおよびクラディングを備える少なくとも 1 つの能動導波管を形成する工程であって、該コアおよび該クラディングの両方は、高損失の能動材料を含む、工程と

を包含し、

該基板上に形成される導波管の大部分は、該無機誘電体材料を含み、該能動材料は、熱光学ポリマーを含み、該無機受動導波管および該少なくとも 1 つの能動導波管は、該能動導波管を介して伝播する光信号が該無機受動導波管を介して伝播するように、光学的に相

10

20

30

40

50

互連結されている、方法。

【請求項 16】

前記無機受動導波管および前記少なくとも1つの能動導波管は、活性領域を有する少なくとも1つの光デバイスを形成するように前記基板上で構成される、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 17】

前記無機受動導波管および前記少なくとも1つの能動導波管は、活性領域を有する少なくとも1つの光デバイスおよび活性領域を有さない少なくとも1つの受動光デバイスを形成し、該少なくとも1つの光デバイスと該少なくとも1つの受動光デバイスとを光学的に相互連結するように前記基板上で構成される、請求項 15 に記載の方法。

10

【請求項 18】

前記活性領域は、該活性領域が形成される前記基板上の領域に一時的な充填材を配置し、次に該一時的な充填材を除去することによりポイドを作成し、前記能動材料で該ポイドを充たすことにより形成される、請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

前記基板上に少なくとも1つの能動導波管を形成する工程は、前記無機受動導波管の少なくとも1つの少なくとも一部分を除去することと、少なくとも1つの能動材料で該一部分を置き換えることにより、前記能動導波管を形成することとを包含する、請求項 15 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

20

【0001】

(技術分野)

本発明は、光ファイバ通信ネットワークおよび1つの位置から次の位置へと移されるか、または他の光デバイスによる使用の前に変更されるかのいずれかである光データ信号を必要とする他のアプリケーションで使用するための集積フォトニックデバイスを提供する。

【0002】

(発明の背景および要旨)

光ネットワークマネジメント、波長マルチプレックスおよびデマルチプレックスアプリケーションのためのフォトニックデバイスは、長年にわたって広範囲に研究されてきた。このようなデバイスの重要なクラスは、一般に「プレーナー光波回路」、「プレーナー光波チップ」または単に PLC と呼ばれる。PLC は、複雑な光学素子および光ネットワークを、半導体またはガラスウェハのような共通の機械的基板によって支持される光学薄膜のスタック(単数または複数)内にモノリシックに配置する技術を含む。PLC は、光ファイバ通信ネットワーク内の使用のために特定の伝送機能、またはルーティング機能を提供するように設計される。これらのネットワークは、複数の地理的に分散した終端を介して配信され、通常単一モード光ファイバを介した終端間の伝送を含む。光信号のトランスペアレントなマネジメントを提供するようなこのようなネットワークのデバイスの場合、光信号の単一モードの特性を維持しなければならない。このようなものとして、PLC は、一般に、厳密ではないが、単一モード導波管の構成に基いている。光信号は反射経路を必要としないので、これらの導波管構成は、典型的には、「回路」の標準的定義に順じていない。しかし、電気回路との物理的および機能的な類似性のため、導波管システムもまた回路と呼ぶ場合が多い。

30

40

【0003】

PLC の実用的アプリケーションでの主な性能問題は、信号の光エネルギーを伝送する際の回路の効率である。この性能は、「損失」(デシベル(dB)単位)、または「損失率」(dB/cm単位)として表される、信号がデバイスを通る際の部分的なエネルギー損失に特徴付けられる。広く優れた損失特性を有することが示される、PLC 導波管材料の標準族は、一般にシリカと呼ばれる二酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )に基いている。シリカスタックは、ホウ素、リン、ゲルマニウム、他の元素もしくは材料のような他の元素をドーピングし得る層と同様に、純粋なシリカであり得る層を含む。ドーピングは、屈折率および層

50

の他の必要な物理的性質を制御するためになされる。ドーブされたシリカおよび一般にほとんど使用されない他の元素の酸化物を含むシリカは、通常、まとめて単に「酸化物」と呼ばれる。さらに、専門的に「ガラス」という用語は、材料の広域スペクトルにより達成され得る物質状態を指すが、通常、「ガラス」は、典型的には $\text{SiO}_2$ に基く透明な非結晶材料を意味するために用いられる。それゆえ、酸化物 $\text{PLC}$ が「ガラス」導波管と呼ばれるのを聞くこともよくある。結果として、「シリカ」という名前が、 $\text{PLC}$ 導波管または他の集積フォトニックデバイスを作製するのに適したこれらのシリコン酸化物材料を指すために使われる。

#### 【0004】

$\text{PLC}$ の有望な特徴の1つは、伝送を統合する能力、およびルーティング、スイッチング、減衰、並びにプログラム可能なフィルタリングのような動的に選択可能な機能を相互接続する能力である。これらの動的機能を用いなければ機械的な置換に基いたデバイスを使って別個の構成要素により実行される必要のあるこれら動的機能は、機能のための集積半導体の置換を提供するために、一般的に使われる。これらの機能は、導波管デバイスの活性領域に適用されたある刺激が、この領域において導波管でかつ導波管の近傍の屈折率の大きさを変える現象に基いて達成される。屈折率を変えるのに通常用いられる刺激は、電場（電気光学）、熱（熱光学）、または力学的応力（音響光学）である。一般的ではないが、圧電光学、静的応力、フォト屈折等のような他の効果が、導波管アプリケーションで用いられる。現在の最新技術では、熱光学が、広範囲のアプリケーションで受け入れられており、遠距離通信ネットワークによりもたらされる光信号のランダムに変化する偏光へのより予測可能な応答を提供し得る。このようなものとして、アプリケーションについての議論は、導波管デバイスの活性領域の近傍の熱源を用いて、温度を変化させ、従って屈折率変化を選択し、かつデバイスの動作をもたらす熱光学に集中している。このデバイスの光学的挙動は、生成した屈折率分布により容易に決定される。この本教示内容において記載されるデバイスおよび構造は、実質的に電気光学および適切な屈折率プロフィールをシミュレートする他の方法に適用され得ることは、これらの技術で経験を積んだ当業者には、十分明らかであると認識すべきである。

#### 【0005】

上記したように、シリカ導波管は、これらの通信ネットワークで用いられる光信号を伝送する優れた損失特性を有する。これらの性能も、局所的な環境の合理的な変化に関しては、極めて安定している。この挙動は、伝送および相互接続機能に対しては望ましいが、シミュレートされた機能のいずれを実行するのも困難になる。現在、シリカ導波管から作製されるこれらのアプリケーションには、少数の熱光学デバイスがある。命令され得る屈折率変化は、1ミクロン当たり約 $10^{-4}$ のみであり、幅2~3ミクロンの領域内に位置付けできないので、駆動条件の極めて複雑な制御を必要とする一方で、熱光学シリカデバイスは、わずかに受け入れられる性能を示す。

#### 【0006】

材料の他のクラスは、シミュレートされた機能に対し優れた応答を有する。しかし、それらは、関連する光導波管で良質なシリカの低損失伝送特性に匹敵し得ない。また、光学ポリマー導波管で作製されている熱光学デバイスおよび回路があり、それらは能動機能について合理的およびロバストな性能レベルを達成する。しかし、デバイス全体の損失は、かなり高く、通常 $2 \times 2$ スイッチのような単純な機能に対し2~3dBである。現在、光ファイバ遠距離通信ネットワークでのこのような半導体スイッチの幅広い構成への主な障害は、1dB未満のデバイス損失を有するロバストなスイッチの有効性の欠如である。

#### 【0007】

熱光学導波管スイッチを作製したい場合、光信号は駆動刺激に応答する入力ポートと出力ポートとの間の高い効率性と適切に結びつけて考えられ、この性能がいずれの非駆動刺激によっても大きく変わらないと予想される。つまり、熱光学スイッチに対して、次の2点を同時に達成することを所望する。(1)ユーザの指示により適用されるまたは除かれる熱信号がスイッチングをロバストに確立すべきである。(2)環境から生じる条件により

10

20

30

40

50

適用されるまたは除かれるいずれの熱も、スイッチングに影響すべきでない。この挙動を示すために、デバイスは、環境の変化からシールドされなければならない、および/またはスイッチは、自然に発生することのできない印加熱に敏感であり、自然に発生することのできる熱パターンに鈍感であるように設計されなければならない。前者の方法は、優れた性能を達成する他の方法がない場合に時々使われるが、安定化技術は、実現およびサポートするのにさらに費用がかかり、通常デバイス全体の信頼性を損うので、利用可能な場合、後者の方法はいつも好ましい。

#### 【0008】

前述した条件に関していくつかの極めて望ましい特性を示す、一般に「デジタル光スイッチ」と呼ばれる、デバイスのクラスがある。第1に、これらのデバイスの応答は、駆動温度が上がるにつれて飽和状態になり、デバイスは、その応答を駆動信号からは生じない任意の変化から孤立化する「オーバードライブ」になり得る。第2に、これらのデバイスは、一般に、1ミクロン当たり $10^{-4}$ のオーダー、またはそれより大きい強い熱屈折率分布のみに応答するように、構成される。このような勾配は、写真平板的にパターン化された抵抗ヒータを用いて行われ得る場合のような極めて局所的な加熱によってのみ達成されるが、自然に生じる熱現象またはノイズからは発生し得ない。第3に、これらのタイプのデバイスは、一般に、デバイス上のある位置のヒータの活性化は、デバイスのある状態に飽和し得、一方でデバイス上の別の位置のヒータの活性化はその応答を相補状態 (complementary state) に飽和し得るような相補型対称性を有した設計がされ得る。これは、さらにノイズ免疫を提供する。原型のデジタル-光学スイッチは、断熱性のY-接合器 (Burns, US 04070092, 1978) である。既存の基本的なY-接合器スイッチは、図1に示される。適切な電流がいずれのヒータを通っても、当然のことながら勾配のより高温側駆動ヒータ側がある状態で、接合領域全体にわたって、かつ基板の下側まで熱勾配を与える。

#### 【0009】

このデバイスが、温度の上昇に伴い屈折率の減少を示す光学ポリマーで作製される場合、第1の導波管101と駆動ヒータに対向して配置された導波管アームとの間で強い光学的結合が確立される。つまり、駆動ヒータ111は、101と104との間の光路を選択し、逆に駆動ヒータ112は導波管101と103との間の光路を選択する。しかし、全ポリマーデジタル光学スイッチは、高い光損失を受ける。結果として、全ポリマーデジタル光学スイッチの使用は、光学回路内に含まれるべき多くの光学振幅を要求し得る。

#### 【0010】

デジタル光学スイッチをシリカで作製するのは、実用的でない。シリカは、温度による屈折率の変化をほとんど示さず、適度に高温伝導性を有する。結果として、スイッチングが起きるのに十分なシリカの温度を上げるための十分な熱を提供することは、極めて困難である。

#### 【0011】

デジタル光学スイッチの別の構成は、図2 (Syahriarら、1998) に示された放物面指向性結合器である。ここで、ヒータが駆動されていない場合、基板の熱的性質は、接合器全体にわたって熱勾配がなく、従って屈折率分布がないことを保証する。導波管201は、導波管204と強く結合し、導波管202は、導波管203と強く結合する「バー (bar)」状態で、デバイスは安定である。ヒータ211が駆動する場合、結合領域全体にわたって屈折率分布は確立し、デバイスは、導波管201が導波管203に強く結合し、導波管202が導波管204に強く結合する「クロス」状態に飽和する。

#### 【0012】

導波管の他の材料と比べると、シリカは、1当たり約 $2 \times 10^{-5}$ のかなり低い熱光学係数を有する。ここで熱光学係数は、温度の逐次変化に対する屈折率の変化として定義され、一般に $(\text{K})^{-1}$ の単位で測定される。シリカもまた、約15 W/m<sup>2</sup>の適度に高い熱伝導性を有する。屈折率を変えるために、大きな温度増加が必要とされるが、シリカに付与される熱のほとんどは、急速にシリカによって伝達されて逃げていく。結果

10

20

30

40

50

として、デジタル - 光スイッチ構造に必要な屈折率分布を作ることは、シリカでは実用的でない。同様の問題は、熱光学応答はより大きいオーダーであるが、熱伝導性は同じである、半導体材料系で作製される導波管でも見受けられ、デジタル光学スイッチに必要とされる急な屈折率分布は、単一のヒータを用いて確立することに等しいかまたはそれより難しい。強い屈折率分布が達成され得ない場合、一般にデバイスは干渉に依存するに違いない。光信号は、別の光路に沿って伝播する2つ以上の光信号に分けられる。経路は、何十ミクロンまたはそれより多くの分離へと分ける必要があるので、熱光学屈折率変化は、他方の経路とは独立な1経路に適用され得る。信号は、次いで再結合されなければならず、各々別の経路での光信号により蓄積された相対位相によって、それらの信号が再構成領域を通る手順が決定される。得られたデバイス、典型的に「Mach-Zehnder」-

10

#### 【0013】

無機的な導波管材料とは対照に、多くの光学ポリマーは、シリカより10~20倍大きい(またはもっと大きい)熱光学応答の大きさを有し、その熱伝導率はシリカの約10分の1である。さらに急な熱屈折率分布が、光学ポリマーで達成され得、デジタル光学スイッチデバイスは、容易に実現し得る。しかし、ポリマーで作製された導波管は、良好なシリカ導波管より極めて高い光損失率を有する。結果として、一般に、光学ポリマーは小型能動フォトニック構造を作製するための優れた材料であるが、デバイス間のフォトニック相互接続として使用される場合、損失として性能損失を取り入れ、チップの光学I/O端末を提供する。逆に、シリカは、低品質能動デバイスを作製する以外は、フォトニック回路で理想的な相互接続媒体である。

20

#### 【0014】

(本発明によるデバイスおよび方法の要旨)

本発明は、光ファイバ通信ネットワークに静的分布、伝送、インターフェース、ならびにフォトニック損失のほとんど無い光学システムの相互連結のための、シリカまたは同様の無機誘電体材料を用いて製造されるハイブリッド能動フォトニックデバイスを提供する。良質のシリカ導波管は、典型的なPLCのスケールでは本質的に検出不可能な0.01 dB/cm以下の損失率を示し得る。相互接続するシリカ導波管に加え、デバイス内に選択的に配置される1つ以上の他の材料系があり、これによりこの選択的に配置された他の材料を通して、または近傍を通る光信号の刺激応答を促進する。この他の材料は、大きな屈折率変化の動的な適用を促すので、能動材料と呼ばれており、能動デバイスに対する導波管構造の実現を可能にする。能動材料は、熱光学、電気光学、圧電光学、フォト屈折、ならびに弾性光学(光弾性の)材料のうち任意の材料であるか、または複数であり得、または他の場合には適用された刺激に応答して屈折率を変化させやすい材料であり得る。能動材料の導波管は動的機能に極めて適するが、通常、それが組込まれた無機誘電体材料に関して高い伝播損失を示す。その伝播損失は、例えば、このようなデバイスの主なアプリケーションが生じる遠距離通信に関して、導波管領域0.2~1.0 dB/cmまたはそれより大きい伝播損失を有する。公知のデバイスの場合のように、典型的なPLCは、光路長の数cm~数十cmへとわたっており、従って光路全体をポリマーで作製されたデバイスは、大きな光損失を有する。

30

40

#### 【0015】

現存するほとんどのPLCでは、配信、伝達、および相互接続は光路の重要な部分を備え、そして能動光機能を必要とするデバイスにおける光路長の一部は、かなり小さく、20%未満の場合が多い。本発明の典型的な実施形態では、集積フォトニックデバイスおよび関連する光路の多くは、無機誘電体材料のコアおよびクラディング(例えば、シリカ)を含み、少数のフォトニックデバイスは、能動材料からなる少なくとも1つの領域(例え

50

ば、熱光学ポリマー)を含む。この領域内では、能動材料は、コア材料または1つ以上のクラディング材料のいずれか、またはこれらの任意の組み合わせあるいはこれらの一部を含む。これらの領域に能動材料を配置することにより、最小の両軸損失(c o l l a t e r a l l o s s)を示す一方で、所望の機能を効率良く実行し得るように設計される。ポリマーの熱伝導率と比較すると、シリカは高い熱伝導率を有し、容易に熱を伝えて加熱された熱光学領域の界面から熱を逃がす。関連する屈折率の勾配を光路全体に渡るようにするために必要な熱勾配は、ポリマーまたはポリマーに埋め込まれたシリカトポロジと接する単一のヒータ構造を発動することにより、ポリマー領域内ですぐに成立し得るか、または消える。ヒータは、シリカまたはポリマーで全て作製された熱光学デバイスを用いてちょうど用いられるような単純な堆積型抵抗電極であり得る。このように配置された熱光学ポリマーを用いて、屈折率プロファイルにおける所望の関係が熱的に刺激され得る。熱光学ポリマーは、これらの屈折率プロファイルに必要な最小の浸入(i n c u r s i o n)を伴ってデバイス上に位置し、光信号の変化に影響し、それにより変調、減衰、スイッチングする。そうでない場合は、意図した信号またはその部分へ意図した影響を提供する。これは、低損失のシリカで過半数の光路を残す。

#### 【0016】

本発明はまた、光路に沿って、または近傍での急な屈折率の変化の大きさを動的に制御するため、能動材料とシリカとの間の応答性光学係数の差が利用されるハイブリッド材料の集積光デバイスまたはフォトニック導波管デバイスも提供する。集積フォトニックデバイスは、基板の表面の(フィルタ、減衰器、および変調器のような)光学薄膜アセンブリの多重領域を支持する単一の機械的基板を含む。少なくとも1つの領域は、受動デバイス(例えば、意図されたアプリケーションの光学周波数で低い光学損失を示し、熱のような選択された刺激の下で屈折率の変化をほとんど、または全く示さない無機光学化合物で形成されるフィルタ、または波長分割マルチプレクサ)のような非活性領域を含む。このような無機光学化合物は、シリカ、ドーパされたシリカ、およびリチウムニオベートを含む。少なくとも1つの他の領域は、光学コアおよびクラディングを有する活性領域を含み、コアの少なくとも一部および/またはクラディングが、刺激(例えば、ポリマーの温度の変化で屈折率の変化を示す熱光学ポリマー)の付与によって屈折率の変化を示す能動材料から形成される。通常、このような能動材料は、受動材料より刺激に対する屈折率におけるずっと大きな変化を有し(通常、能動材料は、受動材料が選択されたレベルの刺激に対して受ける屈折率の変化の少なくとも10倍を有する)、および/または受動材料よりずっと低い熱伝導率を有する(通常、能動材料は、シリカのような無機材料の熱伝導率より少なくとも10倍低い熱伝導率を有する)。しかし、能動材料はまた、一般に、受動材料が光信号の強度を減少させるよりもはるかに多くの光信号の強度を減少させる(通常、能動材料の損失率は、約0.5~1dB/cmであり、シリカのような無機光学化合物は0.01dB/cm未満の損失率を有する)。光信号のエネルギーをほとんど散逸せずに領域を相互連結する導波管または他のレンズのような光学的伝送媒体により導かれ、光信号が効率よく多重領域間を通るように、多重領域は物理的および光学的に結合される。

#### 【0017】

このような屈折率工程を利用する方法は、導波管を横切るシリカから能動材料への境界を浅い角度で位置付けることになる。この方法を利用することにより能動材料の屈折率が実質的にシリカより低くなる場合、入来の導波管の光信号は、境界で偏向して、もとの導波管に対して斜めに配置された導波管の中へ入っていくことができる。逆に、能動材料の屈折率をシリカの屈折率の近傍またはそれ以上にする場合、光信号は境界を通過して、もとの導波管の軸に沿って導波管に入り続ける。図4に示した全てポリマーのTIRスイッチのような「内部全反射」、すなわちTIRスイッチは、公知である。本発明の重要な特徴は、シリカと能動材料の物理的境界により、屈折界面は規定され、この界面は公知のTIRスイッチで利用されるフィールドベースの境界よりはるかに急にであり得ることである。この急激性は、公知のTIRスイッチの実施形態と比較すると、スイッチング効率およびクロストークの点で優れた性能を生成するために使用され得る。このスイッチは、以下で

10

20

30

40

50



さらに詳しく議論される。再度、能動材料は、温度による能動材料の大きな屈折率変化を利用するために、リフレクターおよび導波管を構成することにより、機能を実行するために必要な光信号との最小相互作用を有するように配置され得るので、光路の大部分は、依然としてシリカのままである。

【0018】

光学ポリマーは能動材料の優れた候補であり、特に熱光学アプリケーションの高品質クラスである。熱光学ポリマーは、ポリマーを加熱することにより達成される温度での屈折率の所望の変化および動的 - 配置屈折率分布を提供するように任意のアプリケーションにおいて選択される。適切なポリマー材料は、能動光学グレードのポリシリコン、ポリイミド、エポキシ、ウレタン、ポリオレフィン、および他のポリマーまたはハイドロカルビル (hydrocarbonyl) 環状エーテルで形成される五員環を有するテトラフルオロエチレンおよびトリフルオロエチレンのコポリマーのような、コポリマーを含む。本発明の目的のために、熱光学導波管材料として多くの他のポリマーおよび関連する材料もまた立証されており、極めて類似した挙動を示す。

10

【0019】

他の要因の中でとりわけ、本発明は次の技術的発見に基く。

【0020】

>ほとんどがシリカまたは類似した低損失無機誘電体であるハイブリッド材料集積フォトニクスデバイス、

>その一部は、熱光学ポリマーまたは他の適切な能動材料であり、従ってシリカより望ましい損失特性を有す。

20

同時に、

>効率の良い減衰、変調、スイッチング、フィルタリング、または他の能動能力を伴った光信号のルーティング、

>強い刺激を必要としない、

>光信号のパワーをほとんど失わない。

【0021】

さらに、本発明は、周囲の材料よりポリマー材料が、付与された刺激に伴う屈折率のより大きな変化率を有する場合、変調、減衰、スイッチング、および/または増幅といった導波管デバイスの性能における大きな向上を提供するために使用され得る。別の低損失シリカの小さいが重要な領域における熱光学ポリマー材料の使用により、熱光学ポリマーシステムの効率の良い能動性能を支持しつつ、光信号データの所望の減衰を有する導波管デバイスを提供する。逆に、スイッチ配列および他の構造は、極めて短い距離内で傾けられ得、モノリシックスイッチ配列または単一基板に製造された他の構造はコンパクトである。これらおよび他の技術的発見、ならびに利点は、本明細書中で議論される。

30

【0022】

(好適な実施形態の詳細な説明)

以下で説明する例は上記および本明細書中で説明される本発明の特定の原理を実現するが、本明細書中で説明する特定の例に特許請求の範囲を限定するように解釈されるべきでない。代わりに、特許請求の範囲は、本明細書中の説明、従来技術、この分野の当業者の知識を鑑みると、最も広く合理的な解釈をされるべきである。

40

【0023】

シリカの処理は、シリカの処理の間に特に冷却されない光学ポリマーがおそらく耐えるより高い温度を必要とするので、光ポリマー構造に適用する前に、全シリカ構造が作製される。部分的に、これが本発明によって提供される工程手順を決定する。

【0024】

本発明の1実施形態において、シリカ導波管は、光学入力/出力ポートおよびシリカ導波管ネットワーク内で選択的に配置されたポリマー導波管を備えた1つ以上の能動光学素子を相互連結するために用いられる。このような構造が断熱性Y接合器スイッチを示す図5に示される。アセンブリ全体(すなわち、スイッチおよびスイッチ前後の導波管)は、シ

50

リコンウェハのような機械的基板500により支えられてる。シリコンから導波された光学フィールドを隔離するのに適切な厚さのより低い光学クラディング501が、一様な膜として直接基板の上にある。シリカチャンネル導波管502は、低損失コア層に形成され、上部シリカ光学クラディング503に覆われる。能動機能が望ましい箇所では、典型的には、より低いクラディングの上部表面へまたはちょうど上部表面内へとシリカ構造は移動される。ポリマークラディング(任意の熱光学)は、作られたボイドに堆積され、ポリマー導波管505は、写真平板が界面にてシリカコアと整列した状態で製造される。上部ポリマークラディングの上部平面の上に、熱光学機能を能動化するヒータ506が製造される。

#### 【0025】

この構造を実現する1つの可能なアプローチを図6に要約する。リアクティブイオンエッチング(RIE)を用いたプラズマ強化化学蒸着(PECVD)のような適切な工程により作製されるシリカPLCから開始する(a)。シリカ構造は、基板500、下部クラッド501、シリカ導波管コア502、およびシリカコーティング503を含むPLCを生産する標準的方法で構築される。本発明に従って、シリカ内に15~20ミクロンの選択的エッチの深さを(RIE)により可能にするのに適切な上部のエッチマスク601は、PLCの上部に形成される。例えば、エッチマスクは数ミクロンのアモルファスシリコンであり得る。次いで意図された能動領域が形成されるPLC領域を露出するために、エッチマスクはパターン化される(b)。次いで露出された領域にあるシリカが下部クラディングまでエッチングされて除去される(c)。コアポリマーは、必要なコアの厚さに相当する厚さの膜を形成するためにエッチングされた領域に堆積される(d)。一般的に、この堆積は、その領域を完全に埋め、次いで所望の厚さまでポリマー表面を選択的に腐食するタイミングエッチングを付与するコーティングを用いて行なわれる。次に、ポリマーコアパターンを保護するためにフォトレジストエッチマスクが付与され、パターン化される(e)。残りのポリマーは、ポリマー導波管コア505を規定するためにエッチングされて除去される(f)。最後に、クラディングポリマーオーバーコートが、図5の領域504を埋めるように付与されて、ポリマーコアの側部および上部クラディングを提供する。ヒータ電極は、図5に示されるように能動領域504を有する構造を実現するために適用される。本発明のこの実施形態において、これらの説明からわかり得るように、能動領域504内の元のシリカすべてが、下部クラッドと置換される。それゆえ、このアプリケーションにおいて、この実施形態の構造および領域は、「完全に置換される」と呼ばれる。なぜなら、領域の無機光学材料を置換するためにポリマーコアおよびポリマークラディング材料の両方が用いられるからである。

#### 【0026】

完全に置換されたクラスの実施形態は、本発明の中で最も汎用であり、一般的に高度な能動性能を提供する。

#### 【0027】

複雑でない処理を用いることが重要であり、光学ポリマーが、シリカの約0.01以内の屈折率で提供され得る場合、部分置換を用いた実施形態の別のクラスもまた実現され得る。適切に構成される場合、部分的に置換された実施形態は、完全に置換した実施形態の応答性の半分以上を保持し得、合理化された処理により極めて有効な能動デバイスが作製され得る。部分置換の方法のたいていの実施形態の鍵は、シリカコア層内の特徴部がパターン化される場合、能動領域であるべき特徴部もまたパターン化されて保護的な、犠牲コーティングで覆われる。その後シリカ処理が完了した後に、保護コーティングを露出し、取り除いて能動領域における元の特徴部のトポロジーを露出したままにする。次いで、光学ポリマーは、能動導波管デバイスを規定するようにこのトポロジー上にコーティングされ得る。

#### 【0028】

断面を切断した代表的構造を図7に示す。ここでは、シリカ導波管に配列される溝が、能動領域の下のシリカコア層に形成され、露出され、溝で導波管として機能するようにコア

10

20

30

40

50

のシリカより少し大きい屈折率を有するポリマー 505 で再度埋められる。次いで上部クラディングを提供するためにポリマーコーティング 507 が付与され、電極ヒータ 506 が加えられる。

#### 【0029】

この実施形態の 1 つの可能な製造手順が、図 8 に示される。PLC のシリカ領域に導波管リブ 801、802、および 803 を規定し、同時に能動コアとなるコアシリカ内に溝 806 を生成するために、シリコン基板 805 上のクラディングシリカ層 804 の上のコア層はパターン化される (a)。能動領域の溝は、アモルファスシリコンのような後で選択的に取り除かれ得る犠牲材料 808 で満たされる (b)。次いで上部シリカクラディング 809 を付与して、PLC のシリカプロセスである溝 807 の充填および上部クラディングの形成を終了する (c)。次に溝に付与された犠牲層を露出するために、パターン化エッチングが能動領域全体に行なわれる (d)。次いで元の溝を露出するために、犠牲層は選択的に取り除かれる (e)。例えば、犠牲層がアモルファスシリコンである場合、キセノンジフルオライド化学エッチングで選択的に取り除かれ得る。次いでコア光学ポリマー 810 で、溝は再度満たされ、必要であれば、溝の上部まで平坦化される (f)。ここから、上部ポリマークラディング (能動または受動) は、コーティングされ、電極を付与して PLC を完成する。ポリマー 810 の屈折率は、コアポリマー 801 および 802 の屈折率より高いので、ポリマー部分 801 および 802 は効果的にコア 810 のクラディングとして機能する。

#### 【0030】

犠牲材料または一時的な充填材は、融点および化学反応性のような物理的および化学的性質を有し、これによりスパッタリングまたは無機層の堆積 (例えば、シリカ堆積) のような他の処理が生じ得るが、また選択的エッチャントまたは他の除去方法を用いて容易に取り除かれるので、周囲の無機および/または有機材料にダメージを与えずに充填材は取り除かれる。

#### 【0031】

本発明のさらなる 2 つの実施形態は、ポリマーがクラディングとして付与されるのみを必要とし、従って、単一の正確でないコーティング工程のみを必要とする場合の構成を提供する。シリカ単一モードリブ導波管のポリマーのオーバーコーティングは、シリカに基づいた PLC (例えば、Leonard の米国特許第 5,553,151 号、1996 年、Bosc の米国特許第 5,857,039 号、1999 年を参照されたい) の増大した能動機能性を得る公知の方法である。この公知のアプローチでは、全ての導波管コアがシリカからなるので、コアポリマーは必要とされず、ポリマーは光学クラディングを提供するだけである。コーティングは単一スピン-コーター、またはスプレーを用いて付与され得、パターンングまたは余分な平面化を必要とせず極めて単純な処理を提供する。しかし、これらの方法の重要な欠点は、能動機能の実際の増大はかなり小さく、一般に全ポリマー構成からの利用可能な向上の約 10% に過ぎないことである。以下で説明される本発明の 2 つの実施形態は、能動性能強化を全ポリマー構成の 50% の範囲で与え、従って上記の公知の方法を用いて得られる応答より約 5 ~ 10 倍の大きさの熱光学応答を有する。

#### 【0032】

図 9 は、能動領域における 1 つ以上のシリカ導波管コアが、コアの深さまで、そしてこれらの中心に沿って (すなわち導波管の光学軸に沿って) 長軸方向に部分的にまたは完全に、溝状にパターン化されポリマーがコーティング材料としてのみ付与される本発明の 1 つの実施形態を示す。クラディングポリマーが溝状の導波管上にコーティングされる場合、得られる導波管は、中心のチャネル (そのチャネルはクラディングを提供する同じポリマーで満たされる) を側方から囲むシリカコアの 2 つの狭いリッジを有する構造内で光学モードを伝える。シリカ内に PLC の全領域を構築し、溝および結合器ギャップをシリカ上部のクラディングまでエッチングし、そしてクラディングポリマーで再度これらのウェルを満たすことにより、等価な構造が達成され得ることに留意されたい。この構成

が実質的に向上した性能を与える基本的理由は、外側のクラディングのみにおける光学フィールドよりも溝を横切る光学フィールドがずっと高いためである。溝における熱光学クラディング屈折率がシリカコアの屈折率より小さい場合でさえ、光学フィールドの実質的部分は溝の中に存在する。逆に、そのモードの屈折率は、ポリマークラディングの全シリカコアを有する構成の中より、クラディングポリマー屈折率により強く影響される。

#### 【0033】

図10は、溝を有さない単一シリカリブ上にポリマークラディングを備える公知の単一モード導波管における光学フィールドの典型的な分布を示す。ここで、電界は、コア導波管の近くで、コア導波管の断面にわたって横方向距離の関数としてプロットされる。(光強度は、電界の2乗である。)導波管モードの全2次元フィールドに対して、光学エネルギーの約80%がコアにあり、約20%がクラディングにある。下部クラディングはシリカであるので、光学エネルギーの約85%がシリカにあり、約15%がポリマーにある。シリカの熱光学係数の大きさが、ポリマーの熱光学係数の $1/10 \sim 1/20$ であり、典型的に逆符号の場合も同じである場合には、ポリマークラッド導波管におけるあるモードの熱光学係数は、ポリマーの約6%~12%のみである。

10

#### 【0034】

溝状の導波管の断面の電界プロットが、図11に示される。この場合、ほぼ光閉じ込めと同じレベルで、光学エネルギーの50~60%がポリマーにあり得、従ってポリマーの熱光学係数の45~55%が利用可能である。

20

#### 【0035】

シリカコアの溝の長さ、幅、および深さならびに熱光学ポリマーの屈折率における変化が、そのコアの光フィールドの分布の所望の変化を提供するために選択される。好ましくは、一時的な結合区間で、溝が導波管コアの深さおよび長さ全体にわたって延びる。コアの溝の幅は、一般にコアの幅の約20%~約80%の間であり、好ましくは溝はコアの中心に位置し、コアの約50%の幅を有する。

#### 【0036】

本発明のさらなる実施形態において、活性領域の1以上のシリカ導波管コアは、複数の位置で長軸に沿って全面的または部分的に取り除かれる短いセクションを有する。クラディングが望まれるいずれの他の領域をも加えた取り除かれた領域は、単一の光学ポリマーでコーティングされる。これにより、シリカ導波管コアと非導波ポリマーとのセクションが交替する導波管に沿ってのセグメント化した経路が生じる。典型的に設計されたセグメント化は、2、3ミリメートルの導波管に沿って間隔の空いた数百のコアセグメントを有し、個々のセグメントは光路に沿って長さ2、3ミクロンであり、隣接したセグメントは2、3ミクロンごとの間隔である。ポリマーおよびシリカセグメントのより長い周期性(ブラッグ格子と比較した場合)によりデバイスは、光信号の波長レンジ外の波長を除去するブラッグ反射を利用し得る。光信号は、ポリマーの非導波セクションで少し発散し、シリカコアセグメントでそれを補うように収束する弱い波動性を有するこのセグメント化された構造に沿って導かれる。

30

#### 【0037】

2、3周期分のセグメントを横切るこの振動の光学的位相フロントが、(誇張された形式で)図12に示されている。セグメント化されたデバイスの光フィールドは、導波管セグメントにより導かれる準モードを有する。光信号は、真の導波モードを有せず、光学的パワーの大部分は、ほとんど損失なし(一般に0.1dB/cm未満)にデバイス軸に沿って伝播する。

40

#### 【0038】

ポリマーオーバーコーティングに適した各アームのセグメント化を備えたMach-Zehnder干渉計が、図13に示される。実際のデバイスでは、セグメントの数が数百以上であることに注意せよ。溝を備えた導波管と同様に、クラディングおよびセグメント化においてモード部分を考慮すると、モードの光路の50~60%はポリマーにあり、大

50

部分のポリマー熱光学係数が得られる。これにより、光信号をほとんど損失せず付与された刺激（例えば、熱）への高い応答を有するデバイスを構成することを可能にする。この実施形態は、全シリカPLCを構築し、上部クラディングおよびコア中のセグメントをエッチングし、結果として生じた井戸をポリマーで再度満たすことにより等しく実現され得る。

#### 【0039】

セグメント化した導波管のシリカおよびポリマーセグメントの長さは、準モードの温度に対する伝達定数の変化が、熱光学ポリマー（または、他の能動材料）またはシリカ（または、他の無機光学材料）のどちらかで形成された導波管の導波モードの伝達定数の変化より小さいように選択され得る。本発明の導波管のポリマーセグメントの長さとしりかコアセグメントの長さの比は、全ポリマーおよび全シリカ導波管のモードより導波管を伝わる光信号の準モードの方が、より小さな変化を受けるように選択される。その変化は、本質的にかなり広い範囲の温度にわたってゼロになり得る（一般に、その変化は、シリカの変化の10分の1より小さな1 当たり $10^{-6}$ のオーダーである）。

#### 【0040】

図14は、フルモデル分析から3つのタイプの導波管（ポリマーで満たされた溝を有しない現存する単一連続ポリマークラッドシリカリブ、溝を有するポリマークラッド導波管、セグメント化されたポリマークラッド導波管）の温度に対する実効屈折率変化をプロットする。現存するクラッドリブの比較的浅い勾配から、同じレベルの閉込め（すなわち、最初の高次モードについてのカットオフ）で、溝を有するまたはセグメント化された導波管と比較すると、ずっと少ない屈折率変化がこのような構成の温度を変えることにより達成されることがわかる。ポリマークラッドリブは、通常、コアのクラッドに対する屈折率は比較的小さな差で始まるので、周囲よりも約50 低いと一般に非効率な導波管になる。だから、ポリマークラッドリブのプロットは-20 未満で書かれてない。より高い屈折率の差は、この構造の温度レンジを拡張するために用いられるが、曲線を幾分フラットにし、利用可能な全屈折率変化を減らす。図14からわかるように、溝のある導波管およびセグメント化された導波管は、温度の変化に対する明確な応答を有し、現存する単純なポリマークラッドシリカリブは温度の変化に対してずっと小さな応答を有する。

#### 【0041】

（発明および好適な実施形態のさらなる説明）

利用されるシリカの特性のほとんどは、多くの様々な他の無機誘電体導波管材料（例えば、集積フォトニックデバイスの製造に適したリチウムニオブおよび他の結晶光構造を含む）に応用されることが明らかに理解されるべきである。従って、シリカが好ましいが、これらの光材料を用いて製造された構造も本発明の範囲内にある。

#### 【0042】

能動材料は、熱刺激に応答して屈折率を変える熱光学ポリマー、例えば電極で生じる電界刺激に応答して屈折率を変える電気光学ポリマー、例えば圧電マイクロメータドライバー、ソレノイド、または材料に歪みを誘発する短い道程を有する水圧ラムによって付与されるような歪み刺激に応答して屈折率を変えるフォト弾性材料、変形刺激に応答して屈折率を変えるピエゾ光学材料、およびレーザーまたは適切な波長の光を放出する他のデバイスのような光フィールド刺激に応答して屈折率を変えるフォト屈折材料を含む。

#### 【0043】

本発明の熱光学構造での好ましい熱源は、例えば、熱光学ポリマーの上または近くに適当な材料をスパッタリングすることにより堆積する薄膜または電極ヒータである。他の熱源は、もちろん、使用し得る。これらは、熱光学ポリマーの上または近くに位置する輻射ヒータと同様にレーザーまたは赤外線を放出する発光ダイオードを含む。ヒータは集積デバイスの一部として形成されのが好ましいが、ヒータは集積フォトニックデバイスから分離され得る。

#### 【0044】

可能な限り光信号の損失は少ないのが望ましいので、本発明の好適な集積光デバイスは、

10

20

30

40

50

導波管の大部分を無機誘電体材料で形成し、導波管の少しの部分は、熱光学ポリマーのような能動光学材料を1つ以上包含する。一般に、活性領域の多くの構造が製造されると同時に、集積フォトニックデバイスの非活性領域は製造され、集積フォトニックデバイスを構築する過程を単純化する。能動および非活性領域の両方で用いられるいかなる無機コアおよび/またはクラディングも同時に形成される。このように、例えば、集積フォトニックデバイスが、図13で示されるように本発明のMach-Zehnder干渉計にシリカ導波管を介して結合されるシリカで形成される完全に受動的なMach-Zehnder干渉計を両方含む場合、各々のシリカコアはそれぞれ同じマスクおよびエッチング工程を用いてパターンニングおよびエッチングされ得、ポリマーを各MZIのリブコアにスピニングすることにより同じ熱光学ポリマークラディングで同時にコーティングされ得る

10

#### 【0045】

このアプリケーションに説明されるように非活性領域および活性領域およびデバイスは、光信号が単一モードにあるか、またはマルチモード信号であるように構成され得る。能動材料は、コア部分、クラディング部分、またはその両方を置換するために用いられ得る。活性領域は、一般に本発明の集積フォトニックデバイスの物理的レイアウトの小さな部分を占めており、集積フォトニックデバイスの大部分は、非活性領域およびシリカ導波管のような相互連結する光路によって占められる。

#### 【0046】

前述のいずれかの実施形態に従ってシリカ導波管回路上の活性領域を製造することにより、能動導波管はこれらの領域で作られる。これらの導波管は、局所的に付与された加熱のような、意図した刺激を受けた場合に、2つの基本応答のうち一方または他方、および一般にはその両方を示すという点で、能動的である。1つの応答は、モード実効屈折率、すなわち、導波管の「ベータ」の変化である。これにより、光信号が一定光路長を横切の場合に蓄積する全ての位相において変化が生じる。これは、Mach-Zehnder干渉計のような干渉計タイプのデバイスの機能性を提供する応答である。

20

#### 【0047】

他の応答は、マルチモードの、連結した導波管のスーパーモードの空間的プロファイルの相対的变化の誘発である。これは、領域に入ってくる光信号のエネルギーがスーパーモードの間にどのように分布するかおよび領域からどこへ方向付けられるかについての変化を生み出す。これは、デジタル光スイッチのようなデバイスの機能性を提供する応答である。両方の応答が本発明によって提供され得るので、屈折の変化を利用する本質的に任意の公知の導波管デバイスが、達成され得る。

30

#### 【0048】

さらなる公知の導波管デバイスへの本発明の典型的アプリケーションが、次に述べられる。述べられるデバイスのほとんどは、詳細の実施形態多くの異なった構成に適しており、可能な組み合わせがかなり多い。次の例は、使用し得るいくつかの組み合わせの少量のサンプリングに過ぎない。個々のデバイスが説明されるが、活性領域内で複数の要素を配置することおよび/または単一の基板に複数の活性領域を用いることにより、同じアプリケーションがマルチデバイス回路およびアレイになされ得ることは明らかである。

40

#### 【0049】

これらの光デバイスは透明で、逆にできることが注意されるべきである。これが意味するのは、図面の左から右へまたは図面の右から左へと伝播する光信号に対して機能を実行し得ることである。しかし、左から右へ移動する信号に作用するようにデバイスの機能を特定するのが通例である。信号を左からデバイスへ伝える導波管は、「入力」導波管と呼ばれ、一方で信号をデバイスから右へ伝える導波管は「出力」導波管と呼ばれる。次の説明はこの習慣に合わせるが、実際の動作では、どちらかまたは両方の向きに光信号がデバイスを横切るように意図され得ることを覚えておくべきである。

#### 【0050】

(Mach-Zehnderスイッチ/減衰器/変調器)

50

Mach-Zehnder 導波管干渉計は、標準的能動導波管デバイスである。それは様々な形態であるが、その能動導波管デバイスの全ては、本質的に同じことを操作する。入力信号は2つの光路の間でほぼ等しく分割される。信号の半分ずつがそれぞれその光路を移動し、その2つの信号は、デバイス出力で再結合される。半分の信号2つが再結合される場合、2つの光路の間の相対的位相蓄積は、光エネルギーが出力領域のモードでどのように分布されるかに深い影響をもたらす。1つの経路に沿って蓄積された位相を他方の経路に関して調整することにより、任意に選択可能な比で再結合した光信号を2つのモードに分け得る。1つの出力がある場合、一般に最低次のモードで光エネルギーを運び去ることが設計され、デバイスはプログラム可能な減衰器または変調器として用いられ、より高次のモードの光はPLCの使われていない領域に分散され得る。デバイスはまだ、干渉計

10

#### 【0051】

図3は、1入力2出力Mach-Zehnder干渉計を示す。これは干渉計のスイッチング機能を提供する。ここで入力信号は、光路の一方における相対的位相蓄積を調整することにより、中間比に関してと同様に2つの出力導波管の間を往復して切り換えられ得る。さらに、2つの入力信号の重ね合わせをスイッチングする適切な入力プリッタを有する2つの入力導波管を使用することも可能である。これにより、例えば2×2光スイッチング機能を可能にする。

#### 【0052】

20

そのようなMach-Zehnder干渉計の1つが以前説明したように図13に示される。他の構成は、干渉計を構成する結合した導波管部分または結合しない導波管部分の1つ以上が、少なくとも1つの導波管にポリマーで満たした溝を有するMach-Zehnder干渉計と、1つのコアの一部が熱光学ポリマーで形成されるMZIと、コアの周囲のクラディングの一部が熱光学ポリマーで形成されるMZIとを含む。

#### 【0053】

(方向性結合器スイッチ/減衰器/変調器)

方向性結合器は、一般に、2つの入力導波管が一定の長軸方向の長さにならって極めて接近して配置されるので、1つの導波管に沿って移動する光信号が、他の導波管が維持し得るモードに強く結合するデバイスである。次いで、2つの導波管は分岐し、2つの出力導波管となる。2つの導波管が結合領域で極めてよく適合する場合、光信号は極めて効率よく1つの導波管から他の導波管へ伝わる。この効率は個々の導波管の相対ベータの微妙なバランスおよび1つの導波管のモードが他の導波管のモードの空間的分布に重なる度合いに依存する。これらの特徴のいずれかを定格の静的設定点から変えることによって、結合が損われ得、スイッチング、減衰、または変調が達成され得る。図9は、結合コアは溝があり、熱光学クラディングで満たされており、オーバーレイされる本発明の基本的な指向性結合器の一般的なレイアウトを示す。

30

#### 【0054】

溝のあるコアの代わりに、少なくとも1つの結合したコアがセグメント化され得るか、または少なくとも1つの結合されるコアが熱光学ポリマーで形成され得る。代替的に、または追加的に、結合されるコアの周りのクラディングの一部が熱光学ポリマーであり得る。

40

#### 【0055】

(熱的に導波される/熱的に抑制される導波管)

例えば結合器の非結合領域で、コアの一部もまた熱光学ポリマーであり得る。シリカとポリマー間で熱光学係数に非常に大きな差異があるので、実際、導波管が現れるようにも現れないようにも駆動することが可能である。例えば、図7で示されるような構成を有する導波管を考える。シリカクラディング内のポリマーコアは、例えば、室温で機能的な導波管を規定する。その領域の温度が上がる場合、ポリマーコアの屈折率は急に下がり、シリカクラディングの屈折率はゆっくりと上がる。その屈折率が等しい値に近づくとつれ

50

て、導波管は非効率になる。コアの屈折率がクラディングの屈折率より下がる場合、実際コアから離れる光の回折は強化される。

【 0 0 5 6 】

この機構により他のタイプのスイッチのクロストーク性能を高めるのに有用であることが証明され得る。例えば、図 4 に示されるような現存する T I R スイッチは、ポリマーの屈折率が低い場合（すなわち、ポリマーが高温にある場合）、リフレクタは、ポリマークラディングおよびシリカコアから作製されるフラッキング出力導波管、ならびにポリマーコアおよびシリカクラディングから作製されるインライン出力導波管を実現するように構成され得る。

【 0 0 5 7 】

本発明に従うこのような構成が図 1 5 に示される。このデバイスは上記した能動化合物のバーがその交差または接合に沿って位置付けられている 2 つの導波管チャンネルの明白な導波管交差または接合を含み、導波管はバーに対してほぼ臨界角で配置され、バーに沿う導波される光信号の全内部反射を利用するスイッチまたは変調器を形成する。温度が作動レンジの低い方の端にある場合、ポリマー領域 1 5 0 1 の屈折率はより高く、光信号はポリマーチャンネル 1 5 0 2 の境界を通り過ぎる。より高い屈折率を有するポリマーコア導波管は良質の導波管であり、伝送信号を出力シリカ導波管 1 5 0 5 に運ぶ。シリカコア 1 5 0 6 の周りの高い屈折率のポリマークラディングを有するフランキング出力導波管は、それに向かう迷光を導波せず、それゆえ、より高いクロストーク性能のための高いチャンネル阻止を示す。駆動温度が上昇する場合、ポリマーの屈折率は減少し、シリカの屈折率は少し増加する。ミラー 1 5 0 1 は光信号を反射し、クラッキングの屈折率が減少するにつれて、フランキング出力導波管がオンになる。その間、インライン出力 1 5 0 2 でコアの屈折率を減少することにより、その導波管は消失し、そのミラーを通してリークする光は出力されず、その状態のクロストークが改善される。

【 0 0 5 8 】

( ファブリ - ペローフィルタ )

本発明は、さらに図 1 6 にあるような波長チューナブルファブリ - ペローフィルタを提供する。シリカ導波管は、部分反射のある境界のギャップにより断絶される。その図は、図の明確さを高めるように導波管に向かう誇張された角度でギャップを示す。ギャップはエタロンを形成し、熱光学ポリマーで満たされる。通常、2 つのミラー、ほとんど第 1 のミラーは、大半の光信号を入力導波管へ反射するか、または反射角にあるもう一方の導波管に反射する。しかし、ファブリ - ペローキャビティの往復する推移で正確に整数の位相の波数を蓄積する特定の選択波長は、キャビティで共振し、比較的効率良く通過し得、出力導波管で再収集され導波される。キャビティで共振する波長はポリマーの屈折率、それゆえ往復位相蓄積を熱的に変えることにより変化され得る。単純な T I R スイッチと同様に、ポリマーは導波管のためのコアまたはクラディング機能性を提供する必要がなく、より広いレンジの屈折率を有する材料から選択され得る。

【 0 0 5 9 】

( 非熱的波長フィルタ )

このアプリケーションで以前議論されたように、コアとクラディング間の光強度の部分的な分割のため、ならびにシリカおよびポリマーの熱光学係数の符号が逆なので、ポリマークラッドシリカリブの熱光学応答は減少する。ポリマーがシリカコアから少し離れて位置している場合、例えば、ポリマーでコーティングする前にコアの周りに 0 . 2 ~ 0 . 3 ミクロンのシリカクラッドを形成することによって導波管の熱光学応答をゼロに下げ得る。

【 0 0 6 0 】

図 1 7 は、ドープされたシリカコア 1 7 0 5 の周りの純シリカの薄膜 1 7 0 2 および熱光学ポリマー 1 7 0 3 を含む側面および上部クラディングの残りを備える本発明の構成を示す。ここで、クラディングのようなシリカ膜の厚さが、他の材料の性質およびシリカコアの寸法の関数として選択される。その膜はシリカにおけるモードの部分エネルギーを増やすように用いられるので、そのモードに対するシリカの熱的応答は正確にそのモード

10

20

30

40

50



に対するポリマーオーバーコート熱的応答を相殺する。典型的アプリケーションで、その膜の適切な厚さはゼロまたは1ミクロン未満から約2ミクロンの範囲である。単一モードより大きな導波管にとって、要求された膜の厚さはゼロに減って、マルチモード導波管を補うことがいつも可能だとは限らない。適切な膜の厚さは、モード屈折率の消えてしまいそうな小さな熱的係数（通常、1 当たり約  $10^{-6}$  未満、シリカの熱的係数の10分の1未満）を備えた導波管を提供する。これは、能動デバイスの必要性に反するが、このような構成は自然の熱的安定化を受動デバイスに提供することに有用であり得、そうでなければそのデバイスは能動熱的安定化を必要とする。

【0061】

例えば、稠密波長分割多重（DWDM）信号のマルチプレクス化またはデマルチプレクス化のためのアレー導波管格子（AWG）フィルタは、特定の波長に対しフィルタピーク的位置あわせを維持しなければならず、これは、格子内の光路の非常に精密なバランスに依存する。このバランスは温度変化によって崩れ得るので、現存するAWGは、通常、周囲の環境温度の変化に応答してデバイスの温度の大きな変化がないように、デバイスを加熱することによって、およびいくつかの場合にはデバイスを冷却することによっても、特定の温度で能動的に安定化される。温度に鈍感なフィルタピークを作製する方法を提供することが、能動的な温度制御の必要性をなくし得、それによって動作複雑性を減少し、信頼性を増加する。導波管デバイスの熱的感度を低減する公知の方法は、熱光学ポリマーのくさびと交差する導波管を分離することを伴う。（Kanekoら、1999年）。これは、フィルタ波長の熱的依存性を減らす望ましい効果を有し得るが、光学損失およびクロストークに損失を課し、第1に、目的とする波長を達成する困難さが増える。

【0062】

このアプリケーションで説明された部分置き換えの方法で実現される本発明の構成をAWGの格子に用いることにより、数十にわたってフィルタに対する非熱的性質が実現され得る。さらに、この構成は自然の熱的变化に鈍感であるばかりでなく、加熱の詳細なパターンまたは勾配が付与される人工的な熱刺激への予測可能な応答を有し得る。それによって、製造されたAWGは、熱的に全シリカAWGを安定化するのに必要な熱出力が少しでよい所望の波長グリッドに能動的に調整され得、同じ低熱出力で、周囲の環境温度が変化する間に所望の波長グリッドを提供するように維持され得る。

【0063】

薄いシリカクラディング「膜」および熱光学ポリマークラディングは、AWGの2つのレンズ間に延びる格子の各コアの全長に延びるのが好ましい。しかし、膜およびポリマーが各導波管の全長にわたって延びる必要はない。非熱的性質が導波管に達成され得るように、一部はコーティングされ得、その部分の寸法および屈折率の変化が選択される。

【0064】

ブラッグ格子導波管構成で作製される波長フィルタの熱的感度を減らすために、同一または類似した方法が等しく用いられ得る。ブラッグ格子導波管構成において、格子周期性およびポリマーで満たされる格子要素間のギャップは、通常1/4から1ミクロンのオーダーであるので、格子は光信号の波長レンジ内の波長を反射する。非熱的効果を提供するために、図18に示されるようにポリマーが部分的にだけシリカコアに広がる。あるいは、ポリマーは完全に、シリカセグメントの長さがシリカコア区間の間のギャップの長さのほぼ4倍かそれ以上である導波管のシリカコア区間中に広がり得る。

【0065】

そうでない場合、チューナブルブラッグフィルタが望まれる場合、ブラッグ格子により反射される波長がブラッグ格子を所望の量を加熱することにより選ばれ得るように、要素のサイズおよびそれらの間のギャップの深さおよびサイズが選ばれ得る。シリカセグメント間のポリマーセグメントの屈折率における変化は、ブラッグ格子が反射する波長の変化をもたらす。

【図面の簡単な説明】

【図1】 図1は、断熱性Y-接合導波管回路に基く既存のデジタル光スイッチ構成を示

10

20

30

40

50

す。

【図2】 図2は、結合領域に沿って変化するギャップおよび幅を有する結合された導波管に基く公知のデジタル光スイッチ構成を示す。

【図3】 図3は、アナログ変調およびスイッチングのための既存の1×2チャンネルMach-Zehnder干渉計の図面である。

【図4】 図4は、TIR導波管スイッチの公知の、基本的レイアウトを示す。

【図5】 図5は、シリカ導波管回路領域内にポリマークラディングを有するポリマーコアが埋め込まれた完全に置換された領域内の断熱性Y分岐スイッチの図である。

【図6】 図6は、完全に置換される実施形態の好適な製造方法の模式図である。

【図7】 図7は、シリカコア層のシリカトポロジーがポリマー下に位置する部分的に置換した領域を有する結合器を示し、導波管の定義に役立つ。

10

【図8】 図8は、本発明の部分的に置換した実施形態の1つの可能性のある製造模式図である。

【図9】 図9は、溝付き導波管を有する方向性結合器を示す。

【図10】 図10は、ポリマー膜を有する公知のシリカリブ構成に対する典型的なEフィールド分布を示す。

【図11】 図11は、ポリマー膜を有する溝付きシリカ導波管に対する典型的なEフィールド分布を示す。

【図12】 図12は、セグメント化した導波管で安定状態波面振動を示す。

【図13】 図13は、セグメント化した導波管を備えた干渉計を示す。

20

【図14】 図14は、チャンネル、溝付きチャンネルおよびセグメントのポリマー-クラッドシリカの相対的熱応答グラフである。

【図15】 図15は、導波管チャンネル熱的抑制により強化したTIRスイッチを示す。

。

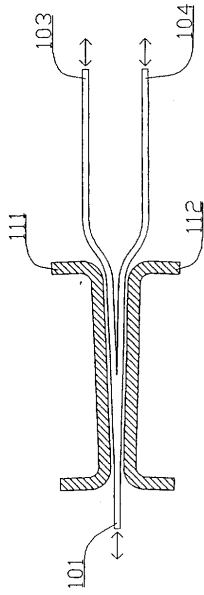
【図16】 図16は、熱光学ポリマーキャビティファブリ-ペローフィルタを示す。

【図17】 図17は、熱漂流を減らすために、細かいクラッド上の熱光学ポリマーを示す。

。

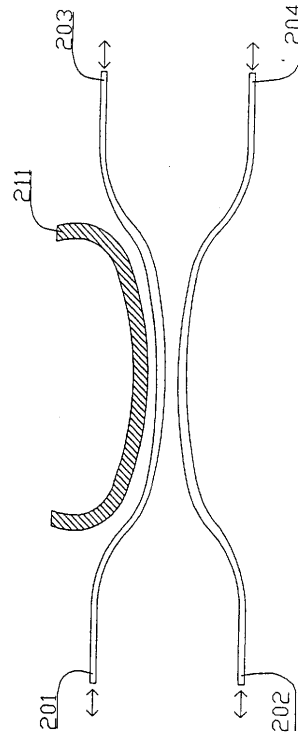
【図18】 図18は、熱光学ポリマークラディングが部分的にシリカコアに広がり、ブラッグ格子の熱感受性を減少するブラッグ格子を示す。

【 図 1 】



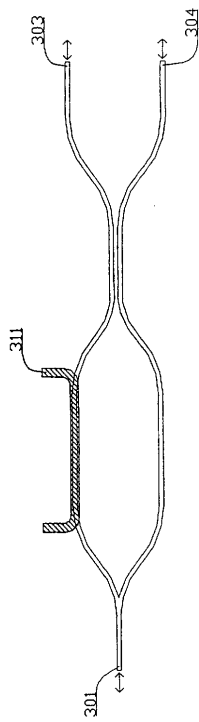
(公知のデバイス)

【 図 2 】



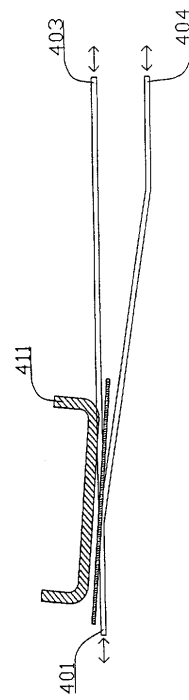
(公知のデバイス)

【 図 3 】



(公知のデバイス)

【 図 4 】



(公知のデバイス)

【 図 5 】

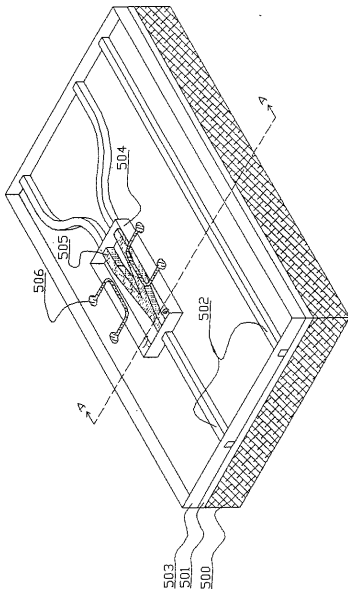


Figure 5

【 図 6 】

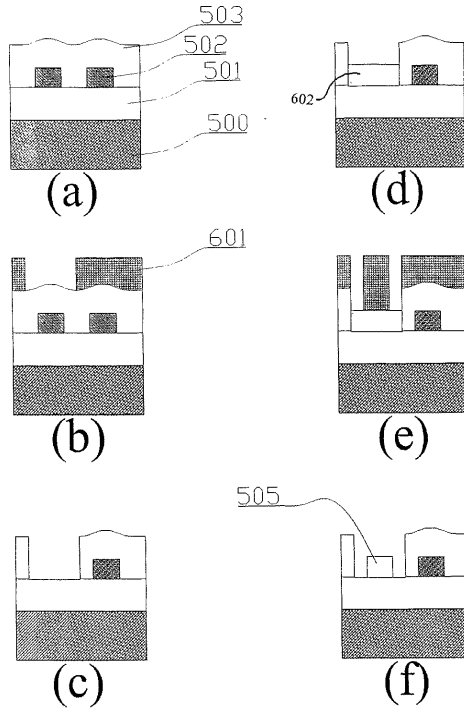


Figure 6

【 図 7 】

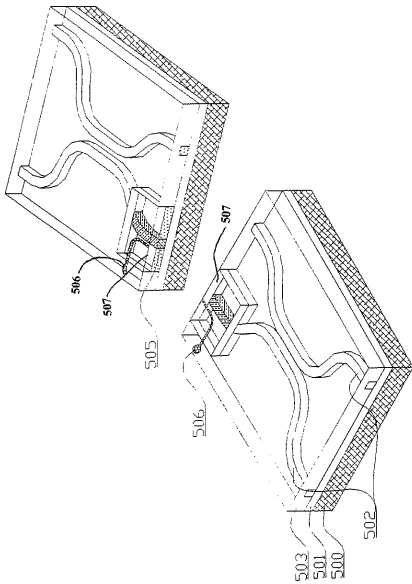


Figure 7

【 図 8 】

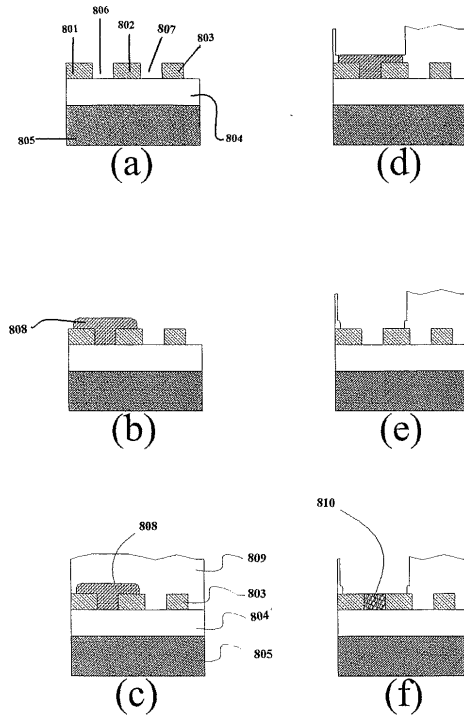


Figure 8

【図 9】

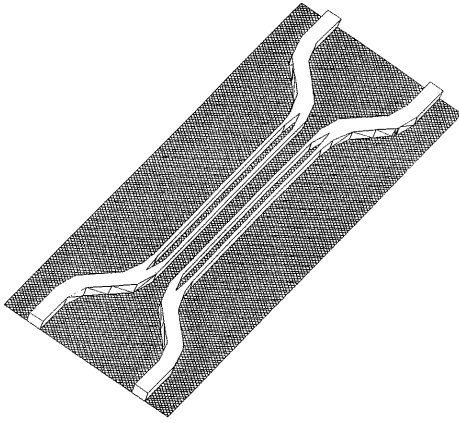
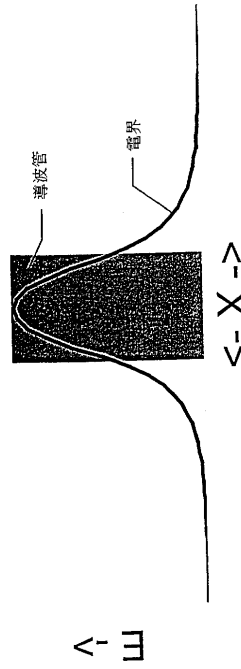
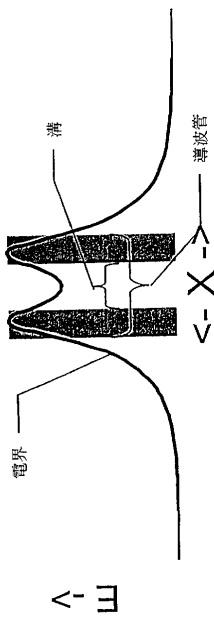


Figure 9

【図 10】



【図 11】



【図 12】

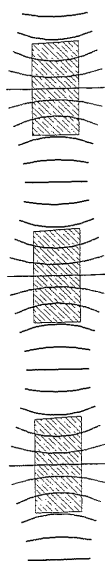


Figure 12

【 図 13 】

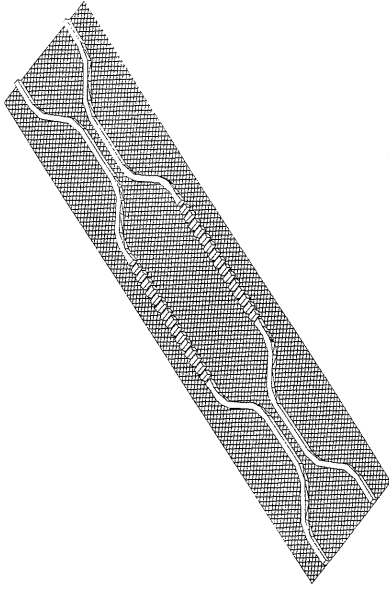
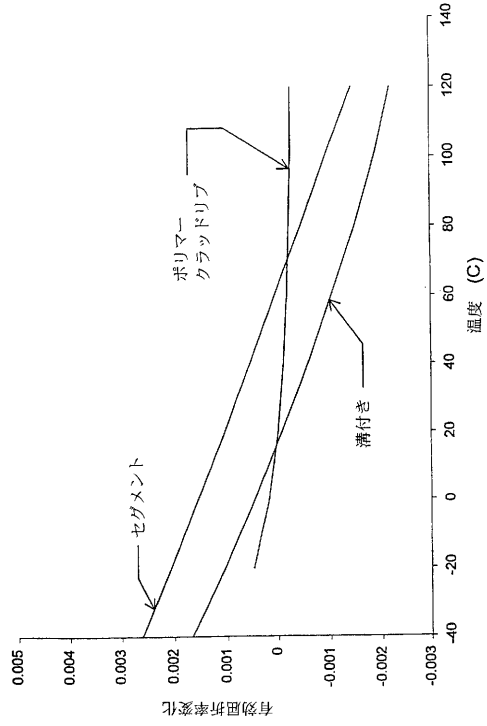


Figure 13

【 図 14 】



【 図 15 】

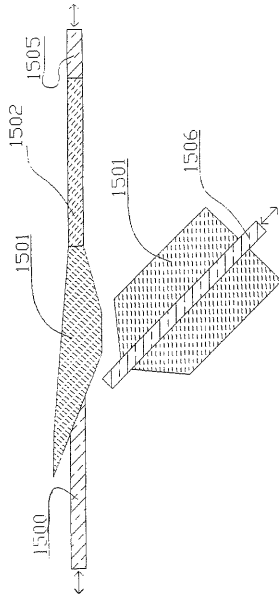
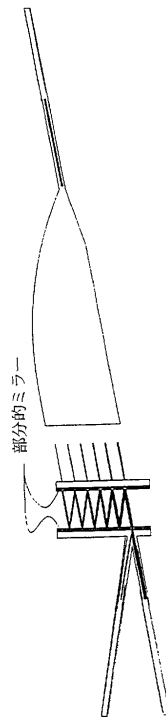
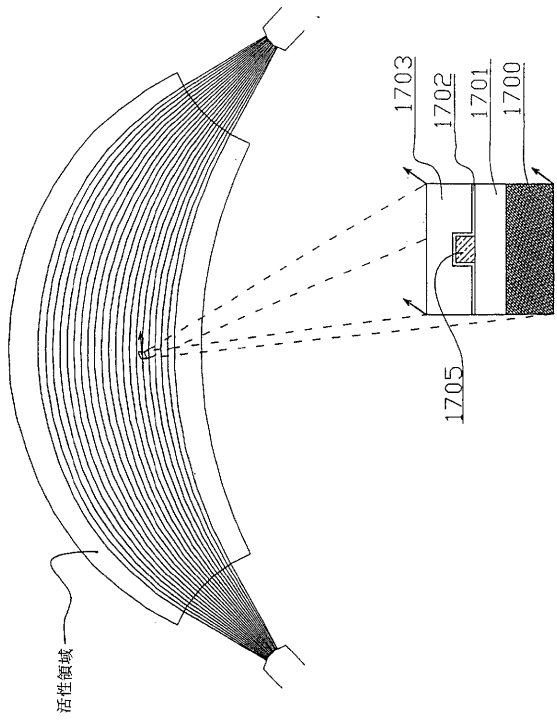


Figure 15

【 図 16 】



【図17】



## フロントページの続き

- (51)Int.Cl. F I  
G 0 2 F 1/065
- (72)発明者 ケニー, ジョン ティー.  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 4 3 0 3, パロ アルト, ウェバリー ブレイス 6 6  
1
- (72)発明者 ミッドグレイ, ジョン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 4 0 7 0, サン カルロス, グレースランド アベニ  
ュー 2 6 0 8
- (72)発明者 モロゾフ, バレンタイン エヌ.  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 1 1 1, サン ノゼ, チルトン コート 3 7 7 7
- (72)発明者 パーチェイス, ケン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 4 0 4 3, マウンテン ビュー, シェーランド アベ  
ニュー 1 7 9
- (72)発明者 スティラー, マーク  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 0 0 6, ボールダー クリーク, ハイランド ドライ  
ブ 1 2 5 1
- (72)発明者 ティックノー, アンソニー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 0 1 4, カパーチノ, バランカ ドライブ 1 0 9 5  
2
- (72)発明者 バーグ, ジェイムズ  
アメリカ合衆国 アリゾナ 8 5 7 1 8, トゥーソン, ピア セレニダッド 4 8 5 0
- (72)発明者 ラブ, ジョン  
オーストラリア国 エイシーティー 2 6 1 5, フリン, バーバー クレセント 5 5

審査官 林 祥恵

- (56)参考文献 特開平06-242335(JP,A)  
特開平09-145942(JP,A)  
特開平09-318978(JP,A)  
特開平08-262504(JP,A)  
特開平05-224245(JP,A)  
特開平05-107577(JP,A)

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00-1/125

G02F 1/29-1/39

G02B 6/12-6/14