

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4457296号
(P4457296)

(45) 発行日 平成22年4月28日 (2010. 4. 28)

(24) 登録日 平成22年2月19日 (2010. 2. 19)

(51) Int. Cl. F 1
G 0 2 B 6/00 (2006. 01) G 0 2 B 6/00 3 2 1
G 0 2 B 6/12 (2006. 01) G 0 2 B 6/12 Z

請求項の数 17 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2004-215648 (P2004-215648)	(73) 特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(22) 出願日	平成16年7月23日 (2004. 7. 23)	(73) 特許権者	504132272 国立大学法人京都大学 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(65) 公開番号	特開2006-39018 (P2006-39018A)	(74) 代理人	100089118 弁理士 酒井 宏明
(43) 公開日	平成18年2月9日 (2006. 2. 9)	(72) 発明者	杉立 厚志 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内
審査請求日	平成19年6月13日 (2007. 6. 13)	(72) 発明者	八田 電夫 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光遅延回路、集積光素子および集積光素子の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

フォトニック結晶の周期的な屈折率分布構造に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、

前記複数の欠陥導波路は、前記欠陥導波路の経路上で、他の欠陥導波路中を伝送する光と互いに干渉しない距離に配置される光遅延部と、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をおいて互いに平行に配置され、いずれかの前記欠陥導波路に入力された時分割多重された光信号を多重分離し、前記欠陥導波路に入力された光信号を時分割多重する合分波部と、を有するとともに、前記フォトニック結晶の第1の端面と第2の端面との間を並列して結ぶように、前記周期的な屈折率分布構造に導入され、

前記欠陥導波路を構成する前記光遅延部の少なくとも一部の幅は、他の欠陥導波路を伝播する光とは異なる導波モードの光が伝播するように、それぞれの前記欠陥導波路で異なることを特徴とする光遅延回路。

【請求項2】

前記第1または第2の端面の複数の欠陥導波路のうちいずれかの欠陥導波路に入力された時分割多重化された光信号のタイムスロットの時間幅に対応する時間だけ遅延量を異ならせるように、前記各欠陥導波路の幅が設定されていることを特徴とする請求項1に記載の光遅延回路。

【請求項3】

前記フォトニック結晶は、周期的な空気穴構造が形成される薄膜スラブ構造を有し、上

下両面が前記フォトニック結晶よりも屈折率の低い誘電体で挟まれることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光遅延回路。

【請求項 4】

前記フォトニック結晶は、コア層の上下両面を前記コア層よりも屈折率の低いクラッド層で挟んだ構造を有することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光遅延回路。

【請求項 5】

厚さ方向に垂直な方向に貫通するように周期的な空気穴構造が形成されたフォトニック結晶に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、

前記複数の欠陥導波路は、前記欠陥導波路の経路上で、他の欠陥導波路中を伝送する光と互いに干渉しない距離に配置される光遅延部と、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をおいて互いに平行に配置され、いずれかの前記欠陥導波路に入力された時分割多重された光信号を多重分離し、前記欠陥導波路に入力された光信号を時分割多重する合分波部と、を有するとともに、前記フォトニック結晶の第 1 の端面と第 2 の端面との間を並列して結ぶように、前記周期的な屈折率分布構造に導入され、

前記欠陥導波路の前記光遅延部の少なくとも一部の周囲の領域に形成される空気穴構造の格子周期は、他の領域に形成される空気穴構造の格子周期とは異なる格子周期であり、該格子周期は、他の欠陥導波路を伝播する光とは異なる導波モードの光が伝播するように、それぞれの前記欠陥導波路で異なることを特徴とする光遅延回路。

【請求項 6】

厚さ方向に垂直な方向に貫通するように周期的な空気穴構造が形成されたフォトニック結晶に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、

前記複数の欠陥導波路は、前記欠陥導波路の経路上で、他の欠陥導波路中を伝送する光と互いに干渉しない距離に配置される光遅延部と、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をおいて互いに平行に配置され、いずれかの前記欠陥導波路に入力された時分割多重された光信号を多重分離し、前記欠陥導波路に入力された光信号を時分割多重する合分波部と、を有するとともに、前記フォトニック結晶の第 1 の端面と第 2 の端面との間を並列して結ぶように、前記周期的な屈折率分布構造に導入され、

前記欠陥導波路の前記光遅延部の少なくとも一部の周囲の領域に形成される空気穴構造の空気穴径は、他の領域に形成される空気穴構造の空気穴径とは異なる格子周期であり、該空気穴径は、他の欠陥導波路を伝播する光とは異なる導波モードの光が伝播するように、それぞれの前記欠陥導波路で異なることを特徴とする光遅延回路。

【請求項 7】

前記複数の欠陥導波路は、互いに異なる屈折率を有することを特徴とする請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路。

【請求項 8】

一方の欠陥導波路は、この欠陥導波路に近接して 1 つ以上の点欠陥を有することを特徴とする請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路。

【請求項 9】

前記フォトニック結晶は、上下両面が前記フォトニック結晶よりも屈折率の低い誘電体で挟まれることを特徴とする請求項 5 ~ 8 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路。

【請求項 10】

光遅延回路の端部に形成される前記合分波部の導波路幅は、外部の結合光学系からの光の入射効率を高めるように広げて形成されることを特徴とする請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路。

【請求項 11】

前記複数の欠陥導波路の合分波部は、外部の結合光学系からの光が前記複数の欠陥導波路に同時に入射するように近接して、光遅延回路の端部に配置されることを特徴とする請求項 1 ~ 10 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路。

10

20

30

40

50

【請求項 1 2】

フォトリック結晶の周期的な屈折率分布構造に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、

前記複数の欠陥導波路は、前記フォトリック結晶の第 1 の端面と第 2 の端面との間に、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をおいて互いに平行に配置され、

前記欠陥導波路の幅は、他の欠陥導波路を伝播する光とは異なる導波モードの光が伝播するように、それぞれの前記欠陥導波路で異なるとともに、

前記欠陥導波路の伝播長は、前記各欠陥導波路を伝播する光を分岐または合波する長さに設定されることを特徴とする光遅延回路。

【請求項 1 3】

フォトリック結晶の周期的な屈折率分布構造に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、

前記複数の欠陥導波路は、前記欠陥導波路の経路上で、他の欠陥導波路中を伝送する光と互いに干渉しない距離に配置される光遅延部と、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をおいて互いに平行に配置され、いずれかの前記欠陥導波路に入力された時分割多重された光信号を多重分離し、前記欠陥導波路に入力された光信号を時分割多重する合分波部と、を有するとともに、前記フォトリック結晶の第 1 の端面と第 2 の端面との間を並列して結ぶように、前記周期的な屈折率分布構造に導入され、

前記各欠陥導波路の屈折率は、それぞれ異なることを特徴とする光遅延回路。

【請求項 1 4】

2 つの欠陥導波路間に 1 b i t の遅延が生じるように前記光遅延部を形成した請求項 1 ~ 1 2 のいずれか 1 つに記載の光遅延回路と、

前記光遅延回路の前記欠陥導波路と接続され、前記欠陥導波路からの光を伝播させる導波路と、該導波路を伝播してきた光を検出するフォトディテクタとを含んで構成される導波路型フォトディテクタを有する光検出部と、

を備え、

前記光遅延回路は、

前記欠陥導波路の延在方向の両側に、前記光遅延部の両側を挟むように 2 つの前記合分波部を有し、

一方の前記合分波部は、外部から入射した光信号を複数の光信号に分波し、

他方の前記合分波部は、前記光遅延部で遅延が生じた前記複数の光信号を合波して干渉波とすることを特徴とする集積光素子。

【請求項 1 5】

前記光遅延回路と前記光検出部は、同一基板上に一括形成されることを特徴とする請求項 1 4 に記載の集積光素子。

【請求項 1 6】

前記光検出部の導波路は、p - i - n 構造を有することを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 に記載の集積光素子。

【請求項 1 7】

前記光検出部の導波路は、上下に厚みのあるバルク構造を有することを特徴とする請求項 1 4 ~ 1 6 のいずれか 1 つに記載の集積光素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、光通信や光情報処理に用いる光デバイスにおいて、フォトリック結晶を用いて、時間位相差を生じさせる光導波路を有する光遅延回路、この光遅延回路と受光器を組み合わせる光信号の感度を高める集積光素子、およびこの集積光素子の製造方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

10

20

30

40

50

従来、光信号時分割多重伝送の伝送容量の増大化を図る方法として光遅延線を用いた光信号時分割多重伝送方法が提案されている（たとえば、特許文献1参照）。図19は、この光遅延線を用いた光信号時分割多重伝送系の構成の従来例を示す図である。送信側において、 n チャンネルの電気信号を電気・光変換回路111に同時並列に入力して n チャンネルの光信号が生成され、時分割多重における各チャンネルのタイムスロットの時間幅に対応する基準遅延時間ずつ順次に遅延量が異なる n 本の光遅延線群112および各光遅延線の出力光信号を合波する合波器113に同時並列に入力し、その合波出力として基準遅延時間ずつ遅延した n チャンネルの光信号からなる時系列光信号が光伝送路104に出力される。また、受信側において、光伝送路104から入力される n チャンネルの時系列光信号を分波器115によって n チャンネルの光信号に分波し、 n 本の光遅延線群116に分波した n チャンネルの光信号を同時並列に入力し、その出力光を光・電気変換回路117によって n チャンネルの電気信号に変換する。

10

【0003】

この特許文献1に記載の光信号時分割多重伝送方法で用いられる光遅延線(112, 116)は、ファイバを用いて構成されている。この従来の光遅延線(112, 116)において、たとえば2つに分岐したファイバ間で40Gbpsの信号の送受信で1bit分の遅延 t ($= 25 \text{ psec}$)を生じさせるためには、 $t \times c / n = 25 [\text{psec}] \times 3 \times 10^8 [\text{m/sec}] / 1.5 \text{ [mm]}$ のファイバ長差をつける必要がある。

【0004】

このような光遅延線は、マッハツェンダ干渉計を構成する際などにも用いられる。図20は、差動位相変調(Differential Phase Shift Keying、以下、DPSKという)受信デバイスの構造の従来例を模式的に示す図である。この図に示されるように、DPSK受信デバイス150は、2個の合分波器131とファイバ132で構成される1ビット遅延線からなるマッハツェンダ干渉計130と2個のフォトディテクタ141からなるフォトディテクタモジュール140とが外付けファイバ151を用いて接続された構成を有しており、時間遅延光回路を構成している(たとえば、非特許文献1)。

20

【0005】

【特許文献1】特開平6-53936号公報

【非特許文献1】E. A. Swanson, et al., "High Sensitivity Optically Pre-amplified Direct Detection DPSK Receiver with Active Delay-Line Stabilization", IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6, p.263

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、特許文献1に記載の従来の光遅延線を含む光遅延回路装置は、上述したように光遅延線をファイバで構成し、複数のファイバ間で長さに差を設けるように構成しなければならないので、装置構成が非常に大きくなり、取り扱いが面倒となるという問題点があった。また、この光遅延回路装置の温度安定化を図るためには、大容量の温度調節機構が必要となり、小さいデバイスへの組み込みが困難になってしまうという問題点もあった。

40

【0007】

さらに、非特許文献1に記載のDPSK受信デバイスは、フォトディテクタモジュールにマッハツェンダ干渉計と接続されるファイバが外付けされるために取り扱いが面倒となるという問題点があった。またこのDPSK受信デバイスの温度安定化を図るためには、DPSK受信デバイス全体の温度調整を図る必要があり、上記特許文献1と同様にデバイスの小型化が困難になるという問題点もあった。さらに、デバイスとファイバとの組み合わせも高価になってしまうという問題点もあった。

【0008】

この発明は、上記に鑑みてなされたもので、小型で、環境変動に対し安定で制御しやすい光遅延回路と、この遅延回路を用いた集積光素子を得ることを目的とする。また、この

50

集積光素子に適した製造方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するため、この発明にかかる光遅延回路は、フォトニック結晶の周期的な屈折率分布構造に対して導入される線状の欠陥によって形成される欠陥導波路が複数並列に配置されてなる光遅延回路であって、前記複数の欠陥導波路は、前記欠陥導波路の経路上で、他の欠陥導波路中を伝送する光と互いに干渉しない距離に配置される光遅延部と、前記他の欠陥導波路中の光と互いに干渉する距離をにおいて互いに平行に配置され、いずれかの前記欠陥導波路に入力された時分割多重された光信号を多重分離し、前記欠陥導波路に入力された光信号を時分割多重する合分波部と、を有するとともに、前記フォトニック結晶の第1の端面と第2の端面との間を並列して結ぶように、前記周期的な屈折率分布構造に導入され、前記欠陥導波路を構成する前記光遅延部の少なくとも一部の幅は、他の欠陥導波路を伝播する光とは異なる導波モードの光が伝播するように、それぞれの前記欠陥導波路で異なることを特徴とする。

10

【発明の効果】

【0010】

この発明によれば、光遅延回路が、異なる幅を有する線状欠陥を並列に配置したフォトニック結晶によって構成され、その結果として小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能になるという効果を有する。また、小型であるので、環境変動に対し安定で制御しやすいという効果も有する。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0011】

以下に添付図面を参照して、この発明にかかる光遅延回路および集積光素子の好適な実施の形態を詳細に説明する。

【0012】

実施の形態1.

図1は、この発明にかかる光遅延回路の構成を模式的に示す斜視図である。この光遅延回路1は、図示しない基板上に形成した周期的な屈折率分布構造を有するフォトニック結晶構造に、前記周期的な屈折率分布構造に対する互いに幅の異なる線状の欠陥を複数導入することによって構成される。図1の例では周期的な屈折率分布構造として、空気穴2を形成している。後述するように、この線状欠陥がレーザ光の導波路3a, 3bとなる。この導波路3a, 3bは、周期的な屈折率分布構造に対する欠陥によって形成されるので、この明細書中で欠陥導波路ともいう。図1では、フォトニック結晶構造の光遅延回路1に、2本の欠陥導波路3a, 3bが形成されており、一方の欠陥導波路3aは、周期的な屈折率分布構造を直線状に崩したものであり、他方の欠陥導波路3bは、直線状の欠陥導波路3aと所定の光路長差となるように幅を変えて周期的な屈折率分布構造を崩すとともに、直線状の欠陥導波路3aの伸長方向にほぼ並行して配置される。これらの2本の欠陥導波路3a, 3bには、外部から入力される光信号を分波するカブラ4が形成されている。なお、欠陥導波路3a, 3bにおけるカブラ4間の幅を変えて並列に配置された部分が、特許請求の範囲における光遅延部に相当する。

30

40

【0013】

ここでは、光遅延回路が、フォトニック結晶構造として2次元スラブフォトニック結晶構造(薄膜スラブ構造)を有する場合を例に挙げて説明する。2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路1は、図示しない基板上に、コア層よりも屈折率の低い下クラッド層、コア層、コア層よりも屈折率の低い上クラッド層が順に積層して構成されるサブミクロンオーダの厚さのスラブ層5の2次元面内に、積層方向にスラブ層5を貫通するように周期的な屈折率分布構造を有して構成される。そして、この2次元周期構造に対する欠陥によって欠陥導波路3a, 3bが形成されている。周期的な屈折率分布構造は、たとえば空気穴2を三角格子状に配置した三角格子周期穴構造などによって構成される。このようなスラブ層5は、化合物半導体材料によって形成することができる。

50

【0014】

図2-1～図2-5は、2次元スラブフォトリック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である。まず、図2-1に示されるように、基板6上に、下クラッド層5b、コア層5aおよび上クラッド層5cからなるスラブ層5の薄膜を有機金属化学気相成長装置(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)や分子線成長装置(Molecular Beam Epitaxy)などの結晶成長装置を用いてエピタキシャル成長させて形成する。

【0015】

ついで、図2-2に示されるように、上記の工程で基板6上にエピタキシャル成長して形成された上クラッド層5c上に、有機材料からなる電子ビーム(Electron Beam(以下、EBという))露光用レジスト7を塗布する。その後、図2-3に示されるように、EB露光機によって、線状欠陥構造も含めた2次元周期的空気穴構造形成用のパターンを描画し、2次元周期的空気穴構造を形成する領域以外のEB露光用レジスト7を残して、2次元周期的空気穴構造を形成する領域のEB露光用レジスト7を除去する。

【0016】

つぎに、図2-4に示されるように、反応性イオンエッチング装置(Reactive Ion Etching)や誘導プラズマエッチング装置(Induced Coupled Plasma Etching)などのエッチング装置によって、上記パターンにしたがって、上クラッド層5cから下クラッド層5bを貫き、基板6の上層部まで届くようにエッチング加工して、空気穴構造を形成する。その後、エッチングを行わなかった領域に塗布されているEB露光用レジスト7を除去する。

【0017】

そして、図2-5に示されるように、ウエットエッチングによって、2次元周期的空気穴構造の下部の基板6部分のみを選択的に除去することによって、2次元スラブフォトリック結晶構造を有する光遅延回路1aが得られる。このとき、基板6は内部が空洞の状態となっており、シート状のスラブ層5の周縁部が基板6によって支持される構造となっている。そのために、図1では基板部分を省略して図示している。このような構造によって、スラブ層の上下両面が空気と接触し、スラブ層を構成する化合物半導体材料と空気との屈折率差によって光の閉じ込めが可能となる。

【0018】

ここで、この発明による光遅延の原理について説明する。図3は、2次元スラブフォトリック結晶構造における欠陥導波路の規格化したバンド構造を示す図である。横軸は規格化波数ベクトルを示し、縦軸は光の規格化周波数を示している。このバンド構造図において、白抜きの三角で示される記号を結んで構成される曲線L0は、三角格子周期穴構造によるモードを示している。このバンド構造図の上部と下部に存在する曲線L0の間にはモードが存在しないため、光の禁制帯(Photonic Band Gap、以下、フォトリックバンドギャップという)として光が存在し得ない周波数帯域となる。このとき、三角格子周期穴構造をスラブ層5内に形成した2次元スラブフォトリック結晶において、空気穴構造を1列取り除く(周期的な空気穴構造を直線状に崩す)ことによって欠陥導波路3aを形成すると、黒丸で示される記号を結んで構成される曲線L1のように導波モードが生じる。この曲線L1は、規格化波数ベクトル k_y が $0.15 \sim 0.325$ の範囲では、その傾き d/dk はほぼ 0.24 となっている(ただし、 d/dk の値は、光速度 c で規格化されている)。バンド構造図では、導波モードを示す曲線の傾きがその光の群速度を表すため、上記規格化波数ベクトル k_y の範囲における群速度は約 0.24 となる。

【0019】

一方、欠陥導波路3a外の三角格子周期穴構造とその格子周期 a を所定の値のままとして、欠陥導波路幅のみを変化させることで、導波モードを変化させることができる。たとえば、三角格子周期が a であるので、上記曲線L1の場合の線欠陥導波路幅(欠陥導波路3aの幅)は $3^{1/2} \cdot a$ であるが、この線欠陥導波路幅(欠陥導波路3bの幅)を $1.51a$ に変化させた場合には、その導波モードは、白抜きの四角で示される記号を結んで構成される曲線L2に示されるものとなる。ここで、規格化周波数 $0.286 \sim 0.296$

10

20

30

40

50

の帯域に注目すると曲線 L 2 によって示される導波モードの群速度 (d / dk) は、約 0.12 となっており、曲線 L 1 によって示される導波モードの群速度 0.24 と比較してかなり遅い値となっている。

【0020】

なお、上述した説明では、図 4 に示されるように、光遅延回路の三角格子周期穴構造が形成される面内において、直線状の欠陥導波路 3 の伸長方向を y 方向とし、この y 方向に垂直な方向を x 方向としている。また、線欠陥導波路幅は、欠陥導波路 3 の両側に近接して x 方向に形成される空気穴 2 の中心間距離として定義している。さらに、図 1 において、曲げを有する欠陥導波路 3 b の幅が場所によって異なっているが、この場合の線欠陥導波路幅とは、欠陥中で最も狭い値を有する部分のことをいう。つまり、図 1 の欠陥導波路 3 b の導波路幅は領域 R 1 の導波路幅 d_1 のことをいう。これは、幅の狭い導波路で存在することができる光は、その幅よりも広い導波路でも存在することができるが、逆に、幅の広い導波路で存在することができる光のうちの一部の光は、その幅よりも狭い導波路で存在することができない場合が存在するからである。

10

【0021】

以上で説明したように、2 本の線欠陥導波路幅をわずかに異ならせることによって、2 本の欠陥導波路 3 a , 3 b 間で、光信号の速度を変えることが可能となる。すなわち、欠陥導波路幅の異なる欠陥導波路 3 a , 3 b を並列に形成することで、それぞれの欠陥導波路 3 a , 3 b を伝送する光信号の群速度を変えることができる。その結果、フォトニック結晶を用いることによって光遅延線を構築することができる。

20

【0022】

つぎに、光遅延回路の動作について説明する。この光遅延回路 1 の端部 A には、たとえば時分割多重化された光信号を伝送する光ファイバなどの結合光学系と接続されており、その光ファイバからの光信号が欠陥導波路 3 a または欠陥導波路 3 b に入力されると、光信号はカプラ 4 で分波される。分波された光信号は、それぞれ対応する欠陥導波路 3 a , 3 b に入力される。欠陥導波路 3 a , 3 b 内では、上述したようにそれぞれの欠陥導波路幅によって定まる群速度で光信号は伝播する。たとえば、時分割多重された光信号を多重分離する場合には、各光信号のタイムスロットの時間幅に対応する時間だけ遅延量を異ならせるように、具体的には複数の光信号間での遅延量がなくなるように欠陥導波路幅を変化させて、光遅延回路 1 の他の端部 B 側の欠陥導波路 3 a , 3 b からは、設定された遅延量を持った光信号が出力される。なお、上述した説明では、時分割多重された光を分波する場合であるが、入力される光信号を時分割多重する場合には、各光信号間でのタイムスロットの時間幅に対応する時間だけ遅延が生じるように欠陥導波路 3 a , 3 b の幅を設定して、それぞれの光信号を光遅延回路 1 の端部 B から入力することで、時分割多重された光信号が光遅延回路 1 の端部 A から出力される。

30

【0023】

ここで、具体的な数値を挙げて光遅延回路の構造について説明する。図 1 に示される 2 次元スラブフォトニック結晶の三角格子周期 a を $0.453 \mu\text{m}$ とすると、上記規格化周波数が $0.286 \sim 0.296$ の帯域は波長 $1.530 \sim 1.584 \mu\text{m}$ に相当するので、光通信における C 帯と一致する。つまり、光通信における C 帯で一律にこの光遅延線を適用することが可能となる。たとえば、2 つに分岐した 40 Gbps の光信号において 1 bit の遅延 (すなわち 25 psec の時間遅れ) が生じるように設計するためには、導波モード L 1 , L 2 に対応した 2 つの線欠陥導波路間の時間差を利用すると、 $(1.73a - 1.51a) \times c \times 25 [\text{psec}] = 0.9 [\text{mm}]$ の長さで並列に形成した線欠陥導波路により実現することができる。この発明による光遅延回路は、特許文献 1 に示される従来のファイバを用いた光遅延線の場合と比較すると約 $1/5$ の長さにすることができる。また、 40 Gbps を超える高速信号の場合にはより単尺化することができる。

40

【0024】

光遅延回路としてこの 1 bit 遅延フォトニック結晶導波路を、マッハツェンダ干渉計の各導波路とすることによって、 1 bit 光遅延機能マッハツェンダ干渉計を備えたフォ

50

トニック結晶スラブ導波路回路を作成することができる。

【0025】

また、この1bit光遅延機能マッハツェンダ干渉計に、2連のフォトディテクタを有する光検出部を組み合わせることで、DPSK受信デバイスである集積光素子をコンパクトに構築することができる。この集積光素子の構成については、実施の形態12以降で説明する。

【0026】

この実施の形態1によれば、光遅延回路を、異なる幅を有する線状欠陥を並列に配置したフォトニック結晶によって構成するようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。また、光遅延回路1は小型であるので、取り扱いが容易であり、温度安定化を容易に図ることができるという効果も有する。

10

【0027】

実施の形態2.

実施の形態1の図1では、フォトニック結晶構造として2次元スラブフォトニック結晶構造を有する場合を例に挙げて説明した。上述したように、光遅延回路1は、基板上に作製されるが、薄膜のスラブ層5の面内に2次元の周期的な空気穴構造を形成した後に、その空気穴2から基板を除去するために2次元スラブフォトニック結晶構造を有する基板を溶液中に浸して、スラブ層5下部の基板を除去する処理が行われる。その結果、光遅延回路1において、基板の周縁部を除く中央付近は除去されて空洞状態となり、薄膜の周縁部のみが基板で支持された構造となっている。

20

【0028】

このようなシート状の構造のみでは、衝撃などに対して弱くなる。そこで、スラブ層5の上下をポリマーなどのスラブ層5に比較して屈折率の低い誘電体層で挟むような構造としてもよい。図5は、この発明にかかる光遅延回路の実施の形態2の構成を模式的に示す断面図である。この図に示されるように、光遅延回路1aは、実施の形態1の光遅延回路1において、スラブ層5下部の基板6が除去された空洞部とスラブ層5の上部にそれぞれ誘電体層7a, 7bが形成されることを特徴とする。

【0029】

たとえば、誘電体層7a, 7bとしてポリマーを用いてスラブ層5の上下をポリマーで挟む場合には、スラブ層5の下部には、基板6の側壁に開けた図示しない穴または空気穴2に液状のポリマーを流し込み、スラブ層5上にはスピコートによってポリマーを塗布後に熱処理する方法によって、誘電体層7a, 7bを形成することができる。このような構成により、シート状の光遅延回路1aの機械強度を上げることができる。また、誘電体層7a, 7bの屈折率はスラブ層5に比して低いので、スラブ層5内を伝播する光の屈折率閉じ込めを行なうことができる。

30

【0030】

この実施の形態2によれば、2次元スラブフォトニック結晶構造において、スラブ層5の上下にポリマーなどの誘電体層7a, 7bで挟む構造としたので、機械強度の十分に強い光遅延回路1aを構成することができ、その結果、外部からの衝撃に強い光遅延回路1aが得られる。特に、2次元スラブフォトニック結晶が化合物半導体で形成され、誘電体層7a, 7bをポリマーとする場合には、化合物半導体とポリマーという屈折率差の大きい構造でスラブ層5の上下方向の光の閉じ込めを強めて、光の漏れの少ない構造とすることができる。

40

【0031】

実施の形態3.

上述した実施の形態1, 2では、光遅延回路が2次元スラブフォトニック結晶構造、すなわちサブミクロンオーダの厚さを有する構造の場合を例に挙げて説明した。たとえば、実施の形態1では、サブミクロンオーダの厚さのスラブ層5の上下を空気層として、化合物半導体材料からなるスラブ層5と空気層との屈折率差で、スラブ層5内を導波する光の閉じ込めを行っていた。しかし、スラブ層5を厚くしてスラブ層5自身で光の閉じ込め

50

を行うようにしてもよい。

【0032】

図6は、この発明にかかる光遅延回路の実施の形態3の構成を模式的に示す断面図である。この図に示されるように、この光遅延回路1bは、基板6上にコア層5aよりも屈折率の低い下クラッド層5b、レーザ光を発生して伝播させるコア層5aおよびコア層5aよりも屈折率の低い上クラッド層5cが積層して構成され、積層方向に上クラッド層5cから下クラッド層5bまでを貫通するように空気穴2が2次元面内に周期的に形成される。そして、この周期的な空気穴構造に対して線状の欠陥を導入して、欠陥導波路3a, 3bを形成している。ここで、下クラッド層5bから上クラッド層5cまでの厚さは数ミクロンから数十ミクロンの厚さを有するように形成される点の実施の形態1のものとは異なる。すなわち、この実施の形態3における光遅延回路1bでは、コア層5aで発生した光の上下方向の閉じ込めを、コア層5aよりも屈折率が低い上下クラッド層5b, 5cによって行い、欠陥導波路3a, 3b中をレーザ光が伝播するようにしている。また、上下クラッド層5b, 5cによって光の閉じ込めを行なうので、周期的な空気穴構造が形成される下クラッド層5bの下部の基板部分を除去する必要がない。なお、光遅延回路1bの上面の形態は実施の形態1の図1と同様であるので、その図示を省略している。

10

【0033】

コア層5aと上下クラッド層5b, 5cは、たとえば化合物半導体材料によって形成することができる。化合物半導体材料として $In_{(1-x)}Ga_{(x)}As_{(y)}P_{(1-y)}$ を用いる場合には、xとyを0~1で変化させると屈折率も1~2割程度変化させることができるので、適当なx, yを設定することで、コア層5の屈折率よりも低くなるようなコア層5の組成とわずかに異なる組成の上下クラッド層5b, 5cを得ることが可能となる。

20

【0034】

この構成によれば、上下クラッド層5b, 5cも化合物半導体で形成し、化合物の組成比を適当に設定することで、コア層5aと上下クラッド層5b, 5cの比屈折率差が小さいながらも、屈折率による光の閉じ込めができる。また、このような組成の化合物半導体は結晶構造も同様であるので、薄膜作製が容易となる。さらに、下クラッド層5bの下部の基板部分を除去する必要がない。

【0035】

この実施の形態3によれば、コア層5aと上下クラッド層5b, 5cとを、組成のわずかに異なる結晶構造の類似する化合物半導体で作製するようにしたので、光遅延回路1bの薄膜作製工程の簡素化を図ることができる。

30

【0036】

実施の形態4.

フォトニック結晶導波路部の設計として、相対的に幅の広いフォトニック結晶導波路と幅の狭いフォトニック結晶導波路の群速度差を光遅延に用いるが、上述した実施の形態では、群速度の速い(基準となる)フォトニック結晶の欠陥導波路幅を2次元周期的空気穴構造において、単に1列の空気穴構造を取り除いた $3^{1/2} \cdot a$ とした。しかし、欠陥導波路幅はこの値に限られることなく、たとえば、さらにこの値を大きくして、両欠陥導波路幅を広げることにも可能である。欠陥導波路幅を広げることによって、外部のファイバなどの光伝送路との接続も容易となる。

40

【0037】

この実施の形態4によれば、フォトニック結晶に形成する欠陥導波路幅を任意に設定するようにしたので、たとえば、欠陥導波路幅を広げた場合には、導波路伝播損失を低減し、また外部の結合光学系から導波路への入射光効率の高い光遅延回路を形成することができる。

【0038】

実施の形態5.

上述した実施の形態では、光遅延回路に、相対的に幅の広い欠陥導波路と幅の狭い欠陥導波路を設計して光遅延回路を実現していた。しかし、各欠陥導波路の幅を異ならせる代

50

わりに、フォトニック結晶構造を構成する2次元の周期的空気穴構造の格子周期をわずかに異ならせることによって、複数の欠陥導波路を伝送する光信号の群速度の間に遅延を生じさせることができる。

【0039】

図7は、光遅延回路の実施の形態5の構成の一例を示す一部平面図である。この図に示されるように、光遅延回路1の2次元周期的空気穴構造における格子周期をわずかに変えた領域R3、R4がスラブ層の平面内に形成されている。すなわち、欠陥導波路3bが欠陥導波路3aから最も離れる位置の周囲における領域をR4とし、その他の領域をR3とすると、領域R4の格子周期 a_4 を領域R3の格子周期 a_3 と異ならせるようにしている。この例では、領域R3の格子周期 a_3 を $0.42\mu\text{m}$ とし、領域R2の格子周期 a_4 を $0.44\mu\text{m}$ としている。

10

【0040】

図8は、図7に示される2次元周期的空気穴構造を有する光遅延回路において、格子周期をわずかに異ならせた場合のバンド構造図である。横軸は規格化波数ベクトルを示し、縦軸は光の波長を示している。また、白抜きの四角の記号を結んで得られる曲線L3が格子周期 $a_3 = 0.42\mu\text{m}$ の導波モードを示しており、黒丸の記号を結んで得られる曲線L4が格子周期 $a_4 = 0.44\mu\text{m}$ の導波モードを示している。

【0041】

この図8に示されるように、縦軸の波長の値が $1.51 \sim 1.55\mu\text{m}$ の帯域を参照すると、格子周期 $a = 0.44\mu\text{m}$ の2次元スラブフォトニック結晶では、群速度(すなわち曲線L4の傾き)は $d/dk = 0.24$ であり、格子周期 $a = 0.42\mu\text{m}$ の2次元スラブフォトニック結晶では、群速度(すなわち曲線L3の傾き)は $d/dk = 0.13$ となっている。つまり、格子周期を変えて形成したそれぞれの導波路には、異なる群速度の光信号が伝播することになり、実施の形態1~4で説明した、導波路幅を変化させた場合と同様の結果を得ることができる。

20

【0042】

この実施の形態5によれば、光遅延回路を、格子周期の異なる複数の領域を配置した2次元スラブフォトニック結晶を用いて構成するようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。

【0043】

実施の形態6

30

上述した実施の形態1~4では、光遅延回路に、相対的に幅の広い欠陥導波路と幅の狭い欠陥導波路を設計して光遅延回路を実現していた。しかし、各欠陥導波路の幅を異ならせる代わりに、フォトニック結晶構造を構成する2次元の周期的空気穴構造の格子穴の半径をわずかに異ならせることによって、複数の欠陥導波路を伝送する光信号の群速度の間に遅延を生じさせることができる。

【0044】

図9は、光遅延回路の実施の形態6の構成の一例を示す平面図である。この図に示されるように、光遅延回路1の2次元周期的空気穴構造における格子穴半径をわずかに変えた領域R5、R6がスラブ層5の平面内に形成されている。すなわち、欠陥導波路3bが欠陥導波路3aから最も離れる位置の周囲における領域をR6とし、その他の領域をR5とすると、領域R6の格子穴半径 r_6 を領域R5の格子穴半径 r_5 と異ならせるようにしている。この例では、領域R5の格子穴半径 r_5 を $0.31a$ とし、領域R6の格子穴半径 r_6 を $0.27a$ としている。

40

【0045】

図10は、図9に示される2次元周期的空気穴構造を有する光遅延回路において、格子穴半径をわずかに異ならせた場合のバンド構造図である。横軸は規格化波数ベクトルを示し、縦軸は光の規格化周波数を示している。また、白抜きの三角の記号を結んで得られる曲線L5が格子穴半径 $r_5 = 0.31a$ の導波モードを示しており、白抜きの四角の記号を結んで得られる曲線L6が格子半径 $r_6 = 0.27a$ の導波モードを示している。

50

【0046】

この図10に示されるように、縦軸の規格化周波数の値が0.28~0.29の範囲(格子周期 $a = 0.44 \mu\text{m}$ の場合に、波長 $1.53 \sim 1.57 \mu\text{m}$ に相当する)を参照すると、格子穴半径 $r_6 = 0.27a$ の2次元スラブフォトリック結晶の領域R6では、群速度(すなわち曲線L6の傾き)は $d/dk = 0.22$ であり、格子穴半径 $r_5 = 0.31a$ の2次元スラブフォトリック結晶の領域R5では、群速度(すなわち曲線L5の傾き)は $d/dk = 0.16$ となっている。つまり、格子穴半径を変えて形成したそれぞれの導波路には、異なる群速度の光信号が伝播することになり、実施の形態1~4で説明した、導波路幅を変化させた場合と同様の結果を得ることができる。

【0047】

この実施の形態6によれば、光遅延回路を、格子穴半径の異なる複数の領域を配置した2次元スラブフォトリック結晶を用いて構成するようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。

【0048】

実施の形態7.

上述した実施の形態1~4では、光遅延回路に、相対的に幅の広い欠陥導波路と幅の狭い欠陥導波路を設計して光遅延回路を実現していた。しかし、各欠陥導波路の幅を異ならせる代わりに、フォトリック結晶構造を構成する化合物組成をわずかに異ならせることによっても、複数の欠陥導波路を伝送する光信号の群速度の間に遅延を生じさせることができる。

【0049】

たとえば、フォトリック結晶構造を構成する半導体材料として InGaAsP を用いる場合、 $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{As}_{(y)}\text{P}_{(1-y)}$ の組成において、上述したように x と y を0~1の間で変化させることによって、屈折率を1~2割程度変化させることができる。また、フォトリック結晶構造を有する半導体材料として GaAs を用いる場合には、 AlGaAs などとの類似の組成および構造を有する材料との間で組成比を変化させることによって、屈折率を同様に変化させることができる。したがって、このような材料を用いて、欠陥導波路部分やクラッド部分、2次元周期的空気穴構造部分における組成を変化させることで、フォトリック結晶構造における屈折率を変化させることができる。たとえば、欠陥導波路部分の組成と、2次元周期的空気穴構造部分の組成とを変えることによって、フォトリック結晶構造における屈折率を変化させることができる。

【0050】

図11は、フォトリック結晶構造を有する光遅延回路において、導波路部分の組成を変化させて2つの導波路における屈折率を変化させた場合のバンド構造図である。横軸は規格化波数ベクトルを示し、縦軸は光の規格化周波数を示している。また、白抜きの三角の記号を結んで得られる曲線L7が屈折率 $n = 3.40$ の導波モードを示しており、黒の四角の記号を結んで得られる曲線L8が屈折率 $n = 3.28$ の導波モードを示している。

【0051】

この図11に示されるように、縦軸の規格化周波数の値が0.274~0.280の帯域(格子周期 $a = 0.428 \mu\text{m}$ の場合に、波長 $1.53 \sim 1.56 \mu\text{m}$ に相当する)を参照すると、屈折率 $n = 3.40$ の導波路では、群速度(すなわち曲線L7の傾き)は $d/dk = 0.21$ であり、屈折率 $n = 3.28$ の導波路では、群速度(すなわち曲線L8の傾き)は $d/dk = 0.12$ となっている。つまり、屈折率を変えて形成したそれぞれの導波路には、異なる群速度の光信号が伝播することになり、実施の形態1~4で説明した、導波路幅を変化させた場合と同様の結果を得ることができる。

【0052】

この実施の形態7によれば、光遅延回路を、導波路を構成する化合物組成を異ならせて、導波路における屈折率を異ならせたフォトリック結晶を用いて構成するようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。

【0053】

10

20

30

40

50

実施の形態 8 .

上述した実施の形態 1 ~ 4 では、光遅延回路に、相対的に幅の広い欠陥導波路と幅の狭い欠陥導波路を設計して光遅延回路を実現していた。しかし、各欠陥導波路の幅を異ならせる代わりに、欠陥導波路の近傍または途中に点欠陥を挿入することによっても、複数の欠陥導波路を伝送する光信号の群速度の間に遅延を生じさせることができる。

【 0 0 5 4 】

図 1 2 は、光遅延回路の実施の形態 8 の構成の一例を示す斜視図である。この図では、2本の直線状の欠陥導波路 3 a , 3 b のうち一本の欠陥導波路 3 b の伸長方向中央部付近に、空気穴構造が楕円状に変形された点欠陥 3 c が形成された光遅延回路を例示している。点欠陥 3 c は共振モードを有し、欠陥導波路 3 b を伝送する光は点欠陥 3 c にトラップされ、所定の時間経過した後に再び欠陥導波路 3 b に放出される。これにより、欠陥導波路 3 b を伝送する光は点欠陥 3 c にトラップされる時間だけ遅延が生じることになる。空気穴径を大きくした形のアクセプタ欠陥では、その Q 値（一般に共振器では、 $Q = \frac{E}{dE/dt}$ ）は、500 程度の値を実現でき、また逆に空気穴を埋める形のドナー欠陥では Q 値が 50,000 を超える値を実現することができる。これにより、前者の場合で ~ 0.4 p s e c、後者の場合で 40 p s e c 程度の遅延が可能となる。なお、図 1 2 では、点欠陥 3 c が楕円状の空気穴である場合を示したが、これに限られるものではなく、点欠陥 3 c であれば空気穴を小さくしたものや大きくしたものなどであってもよい。

【 0 0 5 5 】

この実施の形態 8 によれば、直線状の欠陥導波路の近傍またはその途中に点欠陥を形成した光遅延回路を構成するようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。

【 0 0 5 6 】

実施の形態 9 .

図 1 3 は、光遅延回路の実施の形態 9 の構成の一例を示す斜視図である。上述した実施の形態において、2本の欠陥導波路間の距離については規定していなかったが、この実施の形態 9 では、欠陥導波路（幅はサブ μ m サイズ）への外部からの入射部（端部 A の欠陥導波路形成領域）において、2本の欠陥導波路 3 a , 3 b 間の距離を近接して（距離はサブ μ m サイズ）並列に配置させるようにしている。このような構成によれば、外部からの 1つの結合光学系を 2つの欠陥導波路に一括結合させることができる。すなわち、1つの結合光学系からの光を同時に 2つの欠陥導波路 3 a , 3 b に入射させることが可能となる。これにより、ファイバに比べて幅の狭い欠陥導波路への光の結合効率が、1つの欠陥導波路ごとに入射させる場合の値に比べて全体で高い値を実現することができる。

【 0 0 5 7 】

この実施の形態 9 によれば、2本の欠陥導波路の距離を近接して並列に配置させた光遅延回路を構成したので、この光遅延回路に光を入射する結合光学系を 1つにして結合することができるという効果を有する。また、一導波路に結合させてから分岐する場合に比して光の結合効率を向上することができる。これにより、サイズの小さな光遅延回路を有する光機能素子を実現することが可能となる。

【 0 0 5 8 】

実施の形態 10 .

図 1 4 は、光遅延回路の実施の形態 10 の構成の一例を示す斜視図である。この図に示されるように、フォトニック結晶中に形成する幅の異なる線状の 2本の欠陥導波路を、平行な直線状の欠陥導波路とすることを特徴とする。つまり、実施の形態 1 の図 1 では、一方の欠陥導波路の分岐部分を曲げて構成していたが、この実施の形態 10 ではフォトニック結晶中の欠陥導波路 3 a , 3 b は曲げ分岐せず、平行な欠陥導波路のままとしている。このような構造では、方向性結合器の原理によって伝播長 L_d に応じた光の分岐、合波、再分岐を行なうことが可能となる。つまり、2本の平行に形成された欠陥導波路 3 a ,

3 b の長さを適当な値に設定することによって、2本の欠陥導波路 3 a , 3 b 中を伝播する光信号の間に、所望の遅延を生じさせることができる。

【0059】

この実施の形態 1 0 によれば、フォトニック結晶中に複数の互いに平行な幅の異なる直線状の欠陥導波路を形成するように構成したので、欠陥導波路を曲げることによる曲げロスを低減することができるとともに、方向性結合器の原理による光の合分波を行うことができる。また、コンパクトに光遅延回路を構成することができる。

【0060】

実施の形態 1 1 .

上述した実施の形態では、0次モードの光を利用していた。しかし、0次モードの光だけでなく、高次(1次)モードの光を併用することで、群速度の遅い特性を利用でき、光遅延回路を構成することも可能である。

【0061】

図 1 5 は、0次と1次の導波モードをフォトニックバンドギャップに挿入したバンド構造図である。この図において、横軸は規格化波数ベクトルを示し、縦軸は光の規格化周波数を示している。また、黒丸の記号を結んで得られる曲線 L 9 が0次の導波モードを示しており、白抜きの四角の記号を結んで得られる曲線 L 1 0 が1次の導波モードを示している。

【0062】

この図 1 5 に示されるように、縦軸の規格化周波数の値が 0 . 3 0 2 ~ 0 . 3 0 6 の帯域(格子周期 $a = 0 . 4 6 9 \mu\text{m}$ の場合に、波長 $1 . 5 3 \sim 1 . 5 5 \mu\text{m}$ に相当する)を参照すると、1次の導波モードでは、群速度(すなわち曲線 L 1 0 の傾き)は $d / dk \sim 0 . 0 9$ であり、0次の導波モードでは、群速度(すなわち曲線 L 9 の傾き)は $d / dk \sim 0 . 2 3$ となっている。つまり、複数の異なる導波モードを用いることによってそれぞれの欠陥導波路には、異なる群速度の光信号が伝播することになり、実施の形態 1 ~ 4 で説明した、導波路幅を変化させた場合と同様の結果を得ることができる。なお、0次や1次の導波モードは、所望の導波モードが欠陥導波路中に伝播するように導波路幅や導波路の構造を適宜変えることによってその利用を実現することができる。

【0063】

この実施の形態 1 1 によれば、光遅延回路の欠陥導波路に導波モードの異なる光信号を伝送させるようにしたので、小さいサイズで所望の光遅延を実現することが可能となる。また、広帯域で群速度の遅い特性を利用することが可能になる。

【0064】

なお、欠陥導波路を単一仕様ではなく、上述した実施の形態 1 ~ 1 1 で説明した異なる種類(格子周期、欠陥導波路幅、空気穴径、化合物組成など)を組み合わせることで、広帯域で群速度の遅い特性を利用可能となり、フォトニック結晶構造を用いた光遅延回路を構成することが可能となる。また、実施の形態 4 ~ 1 1 において、実施の形態 2 で説明したようにフォトニック結晶構造のスラブ層 5 の上下をポリマーなどのスラブ層 5 よりも屈折率の低い誘電体材料で挟む構造としてもよい。

【0065】

実施の形態 1 2 .

上述した実施の形態 1 ~ 1 1 では光遅延回路の構成を説明したが、以下ではこれらの光遅延回路を用いた集積光素子の実施の形態について説明する。たとえば、実施の形態 1 で説明した光遅延回路 1 において、1つの光信号を分波して2つの欠陥導波路間で 1 b i t の遅延を生じさせた後に干渉させるように構成し、それぞれの欠陥導波路に2連のフォトディテクタを有する光検出部を組み合わせることで、集積光素子としての D P S K 受信デバイスを構築することができる。

【0066】

図 1 6 は、光遅延回路を用いた集積光素子(D P S K 受信デバイス)の構造を模式的に示す斜視図である。図 1 6 に示されるように、集積光素子 1 0 は、光信号を分波して所定

10

20

30

40

50

量の遅延を生じさせた後に干渉させる遅延干渉部 1 1 と、遅延干渉部 1 1 から出力される干渉波を検出する光検出部 2 1 と、を備えて構成される。

【 0 0 6 7 】

遅延干渉部 1 1 は、線状の欠陥が導入された欠陥導波路 3 a , 3 b を有するフォトニック結晶によって構成される。図 1 6 に示されるように、欠陥導波路のうち 1 本は周期的な空気穴構造のうちの 1 列を崩した直線状の欠陥導波路 3 a であり、もう 1 本は直線状の欠陥導波路 3 a を伝播する光に比して 1 b i t の遅延が生じるように、欠陥導波路 3 a の伸長方向にほぼ並行して、周期的な空気穴構造を崩して形成した欠陥導波路 3 b である。このような構造の遅延干渉部 1 1 に、外部から入射した光信号を分波する第 1 のカプラ 4 a 、分波した光信号間に 1 b i t の遅延を生じさせる光遅延部 1 2 、遅延が生じた光信号を合波して干渉波とするとともに生じた干渉波を分離する第 2 のカプラ 4 b が形成される。ここで、第 1 のカプラ 4 a と光遅延部 1 2 は、上述した実施の形態 1 ~ 1 1 で説明したフォトニック結晶によって構成される光遅延回路に相当する。図 1 6 には、実施の形態 1 で説明した幅の異なる 2 本の欠陥導波路 3 a , 3 b を有する場合が示されているので、第 1 のカプラ 4 a で分波された光信号の間に 1 b i t の遅延が生じるように欠陥導波路 3 a , 3 b の幅が調整される。

10

【 0 0 6 8 】

光検出部 2 1 は、遅延干渉部 1 1 の欠陥導波路 3 a , 3 b の一方の端部の延長上に配置され、前記遅延干渉部 1 1 の欠陥導波路 3 a , 3 b と接続される 2 連の導波路と、この導波路に設けられるフォトディテクタと、を有する導波路型フォトディテクタ 2 2 を備えて構成される。導波路はたとえば従来公知の埋め込み型導波路としている。なお、フォトディテクタは、導波路から入力される光信号を検知できるように、導波路に接して p n 接合部分を設ける必要がある。通常、導波路とフォトディテクタは一体形成して、図 1 6 に示されるように埋め込み型構造の導波路型フォトディテクタ 2 2 とすることで、製造プロセスの簡略化を図ることができる。この場合には、導波路部分にも p n 接合が形成されている。

20

【 0 0 6 9 】

このような構成の集積光素子によれば、まず、遅延干渉部 1 1 に光信号が入力されると、光信号が第 1 のカプラ 4 a で 2 つの光信号に分波され、欠陥導波路 3 a , 3 b の光遅延部 1 2 を導波中に分波された光信号間に 1 b i t 分の遅延が生じる。その後、2 つの光信号が再び第 2 のカプラ 4 b で合波され、その時に生じる 2 つの干渉波が 2 つの欠陥導波路 3 a , 3 b に分波されて、遅延干渉部 1 1 から出力される。光検出部 2 1 の 2 つの導波路型フォトディテクタ 2 2 には、それぞれの欠陥導波路 3 a , 3 b からの干渉波が入力され、電気信号に変換される。この時、1 つの光信号を 2 つの実質的に同じ内容の干渉波で検出するので、遅延干渉部 1 1 に入力された光信号を、感度を上げて受信することが可能となる。

30

【 0 0 7 0 】

なお、基板上に形成される埋め込み型の導波路型フォトディテクタ 2 2 は公知であるので、その詳細な構造の説明を省略する。また、フォトディテクタにおける p n 接合の境界に真性半導体層または非導電層を形成して、p - i - n 接合としてもよい。このように p - i - n 接合を形成することでフォトディテクタの接合容量を減らし、信号応答速度を速めることができる。

40

【 0 0 7 1 】

また、図 1 6 では、集積光素子の遅延干渉部 1 1 が実施の形態 1 に示される構成を有する場合を例に挙げて説明したが、実施の形態 1 ~ 1 1 に示される光遅延回路であれば、この集積光素子に適用することができる。さらに、図 1 6 では、光検出部 2 1 のフォトディテクタは埋め込み型の構成を有していたが、図 1 7 に示されるように、リッジ型の導波路型フォトディテクタ 2 3 としてもよい。

【 0 0 7 2 】

この実施の形態 1 2 によれば、光遅延部 1 2 を有する遅延干渉部 1 1 を小さく構成する

50

ことができるので、この遅延干渉部 1 1 と光検出部 2 1 を備える集積光素子 1 0 もコンパクトに構築することが可能となる。

【 0 0 7 3 】

実施の形態 1 3 .

実施の形態 1 2 に示される集積光素子において、遅延干渉部 1 1 と、複数のフォトディテクタを有する光検出部 2 1 とを一括形成することで、集積光素子 1 0 を一体にそしてコンパクトに構築することができる。これは集積光素子 1 0 において、遅延干渉部 1 1 と光検出部 2 1 とは同じ半導体材料で構成することができるので、同一基板上に遅延干渉部 1 1 と光検出部 2 1 とを一体形成することも可能となる。たとえば、図 1 に示されるように 2 次元フォトニック結晶スラブ構造を有する遅延干渉部 1 1 も、埋め込み型またはリッジ型導波路構造を有する光検出部 2 1 もともに、基板上に下クラッド層、コア層、上クラッド層を積層してなる構造を有するので、遅延干渉部 1 1 の欠陥導波路 3 a , 3 b の延長上に光検出部 2 1 の導波路構造を形成することで、両者の導波路部分の接合を精度よく行うことができる。このとき、埋め込み型またはリッジ型導波路のもう一方の端部にフォトディテクタが形成される。

10

【 0 0 7 4 】

ここで、集積光素子 1 0 を一体形成する場合の製造方法の一例を説明する。ここでは、基板として I n P を用い、光遅延回路 1 と光検出部 2 1 を構成する材料として I n G a A s P を用いる場合を例に挙げる。図 1 8 - 1 ~ 図 1 8 - 7 は、集積光素子の製造方法を模式的に示す断面図である。これらの図において、遅延干渉部 1 1 と光検出部 2 1 とを横切

20

【 0 0 7 5 】

最初に、図 1 8 - 1 に示される I n P の基板 6 の光検出部を形成する領域（以下、光検出部形成領域という） R_{PD} となる部分をエッチングして、基板断面に段差を設ける（図 1 8 - 2）。ついで、I n P の基板 6 の上側の面に、上述した工程で設けた段差がなくなるまで I n G a A s P の薄膜 6 a を成長させた後、エッチングしていない箇所、すなわち遅延干渉部 1 1 が形成される領域（以下、遅延干渉部形成領域という） R_{PC} の基板表面が現れるまで薄膜表面を削り取り（図 1 8 - 3）、基板 6 の表面を平坦化させる。なお、段差を設けた光検出部形成領域 R_{PD} に I n G a A s P の薄膜 6 a を成長させた際に、光検出部形成領域 R_{PD} と遅延干渉部形成領域 R_{PC} の表面がほぼ平坦となっている場合には、遅延干渉部形成領域 R_{PC} の基板表面が現れるまで薄膜表面を削り取る必要はない。

30

【 0 0 7 6 】

つぎに、基板 6 の表面全体に I n G a A s P 薄膜によって下クラッド層 5 b、コア層 5 a、遅延干渉部形成領域 R_{PC} に形成するスラブ層 5 の上クラッド層 5 c となる材料やエッチングストップ層、光検出部 2 1 の導波路 2 2 の形成に使用される上クラッド層などを含む上クラッド層 5 d を順に形成し、光検出部 2 1 における導波路型フォトディテクタ 2 2 を形成する（図 1 8 - 4）。また、遅延干渉部形成領域 R_{PC} においてスラブ層 5 の厚さがサブミクロンオーダーとなるように遅延干渉部形成領域 R_{PC} の上クラッド層 5 d をウエットエッチングなどでエッチングして、スラブ層 5 を形成する（図 1 8 - 5）。その後、遅延干渉部 1 1 が形成される領域 R_{PC} では実施の形態 1 で説明したようにフォトリソグラフィとエッチングによって周期的な構造に対して導入する線状の欠陥を有する空気穴構造を、スラブ層 5 を貫通するように形成する（図 1 8 - 6）。

40

【 0 0 7 7 】

そして、遅延干渉部形成領域 R_{PC} の下部に存在する基板 6 をエッチングにより除去して、空洞を形成する（図 1 8 - 7）。たとえば、塩酸（H C l）は I n P をよく溶かすが I n G a A s P は溶かさない性質があるので、集積光素子を塩酸に所定時間浸すことによって、遅延干渉部 1 1 に形成された穴 2 から流れ込む塩酸で遅延干渉部形成領域 R_{PC} の下部の基板 6 をエッチングして、基板 6 内部を空洞にすることができる。このとき、光検出部形成領域 R_{PD} では基板 6 が I n G a A s P の薄膜 6 a で構成されているので、基板内部における I n P と I n G a A s P との境界部分において、塩酸によって横方向に I n P がエ

50

ッチングされても、InGaAsPの薄膜6aはエッチングされない。以上のようにして、遅延干渉部11と光検出部21とを一体に製造することが可能となる。

【0078】

このように、薄膜層をInGaAsPで形成し、下側基板をInPで形成すれば、塩酸を用いて薄膜層下部をウエットエッチングでアンダカットでき、遅延干渉部形成領域 R_{PC} のみにスラブ構造を形成することができる。しかし、光検出部21は同様のアンダカットを行なう必要はないため、両者を一括形成するためには両者の境界垂直壁がInGaAsPで形成されていればよい。また、光検出部21の上面はマスクで覆ってしまえば上方からのウエットエッチングも防げる。この構成により容易にフォトニック結晶構造を有する遅延干渉部11と光検出部21を一括形成することができる。

10

【0079】

この実施の形態13によれば、同一基板上に、フォトニック結晶構造を有する遅延干渉部11と、導波路型フォトディテクタを有する光検出部21とを一体形成するように構成したので、両者を別々に作製したときに必要であった遅延干渉部11の欠陥導波路3a, 3bと光検出部21の導波路型フォトディテクタ22との位置合わせが不要となるという効果を有する。また、製造工程で遅延干渉部11と光検出部21とが同時に形成され、共通する構造を有する場合には工程の省略化を行うことができるので、両者をそれぞれ単独で作製後に接合する場合に比して歩留まりがよくなり、安価に光機能素子を製造することができるという効果を有する。また、基板をInPとし、薄膜層をInGaAsPとした場合に、遅延干渉部11と光検出部21との基板内部での境界をInGaAsPとすることによって、遅延干渉部11下部の基板材料を塩酸によって除去し、光検出部21下部の基板材料を除去しないようにして、遅延干渉部11のみを薄膜スラブ構造とすることができる。

20

【産業上の利用可能性】

【0080】

以上のように、この発明にかかる光遅延回路は、光通信において時分割多重を行なう光機能素子に有用である。

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1】この発明による光遅延回路の構成を模式的に示す斜視図である。

30

【図2-1】2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である(その1)。

【図2-2】2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である(その2)。

【図2-3】2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である(その3)。

【図2-4】2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である(その4)。

【図2-5】2次元スラブフォトニック結晶構造を有する光遅延回路の製造方法の一例を示す図である(その5)。

40

【図3】2次元スラブフォトニック結晶構造における欠陥導波路の規格化したバンド構造を示す図である。

【図4】光遅延回路の三角格子周期穴構造が形成される面内の状態を模式的に示す図である。

【図5】基板を含めた光遅延回路の実施の形態2の断面構造の一例を模式的に示す図である。

【図6】基板を含めた光遅延回路の実施の形態3の断面構造の一例を模式的に示す図である。

【図7】光遅延回路の実施の形態5の構成の一例を示す一部平面図である。

【図8】図7の光遅延回路におけるバンド構造図である。

50

【図 9】光遅延回路の実施の形態 6 の構成の一例を示す平面図である。

【図 10】図 9 の光遅延回路におけるバンド構造図である。

【図 11】光遅延回路において導波路部分の組成を変化させた場合のバンド構造図である。

【図 12】光遅延回路の実施の形態 8 の構成の一例を示す斜視図である。

【図 13】光遅延回路の実施の形態 9 の構成の一例を示す斜視図である。

【図 14】光遅延回路の実施の形態 10 の構成の一例を示す斜視図である。

【図 15】0 次と 1 次の導波モードをフォトニックバンドギャップに挿入したバンド構造図である。

【図 16】光遅延回路を用いた集積光素子の構造を模式的に示す斜視図である。

10

【図 17】集積光素子の光検出部がリッジ型の導波路型フォトディテクタである場合の構造を模式的に示す斜視図である。

【図 18 - 1】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 1）。

【図 18 - 2】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 2）。

【図 18 - 3】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 3）。

【図 18 - 4】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 4）。

20

【図 18 - 5】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 5）。

【図 18 - 6】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 6）。

【図 18 - 7】集積光素子を一体形成する場合の製造方法の一例を示す図である（その 7）。

【図 19】光遅延線を用いた光信号時分割多重伝送系の構成の従来例を示す図である。

【図 20】差動位相変調受信デバイスの構造の従来例を模式的に示す図である。

【符号の説明】

【0082】

30

1, 1 a 光遅延回路

2 空気穴

3 a, 3 b 欠陥導波路

3 c 点欠陥

4 a, 4 b 合分波部

5 コア層

6 下クラッド層

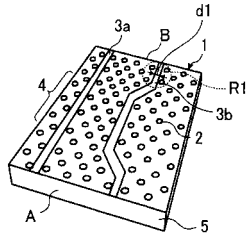
7 上クラッド層

8 スラブ層

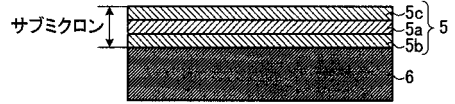
9 基板

40

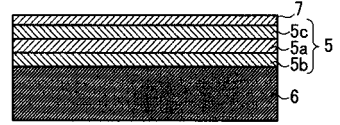
【図1】



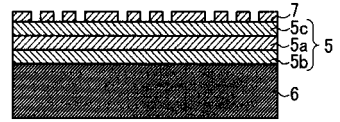
【図2-1】



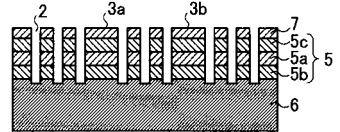
【図2-2】



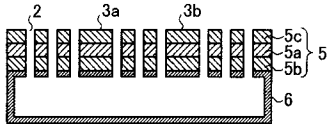
【図2-3】



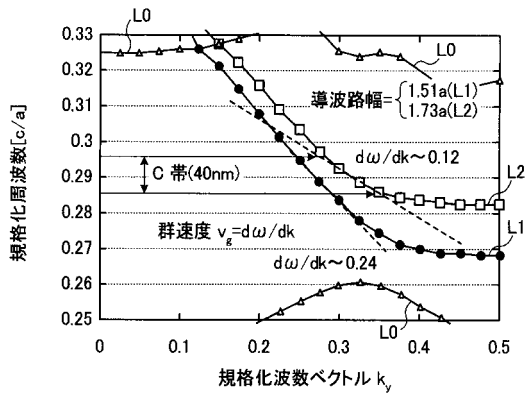
【図2-4】



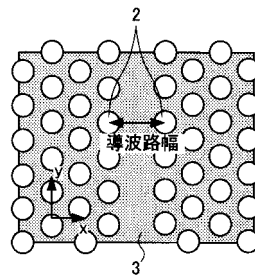
【図2-5】



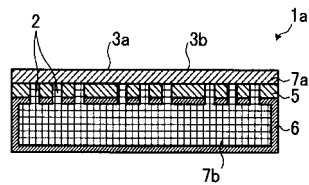
【図3】



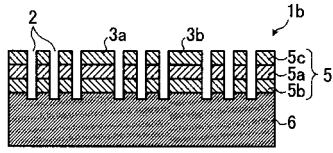
【図4】



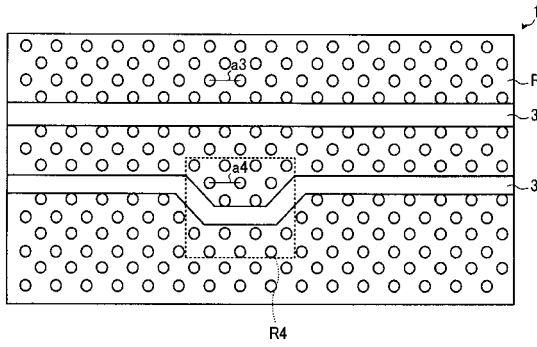
【図5】



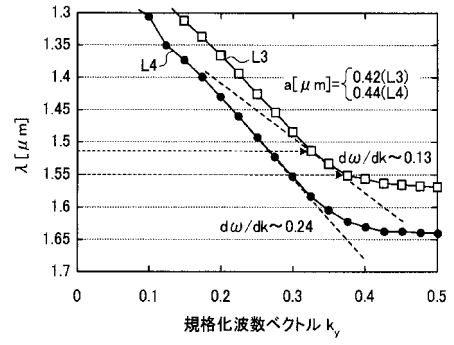
【図6】



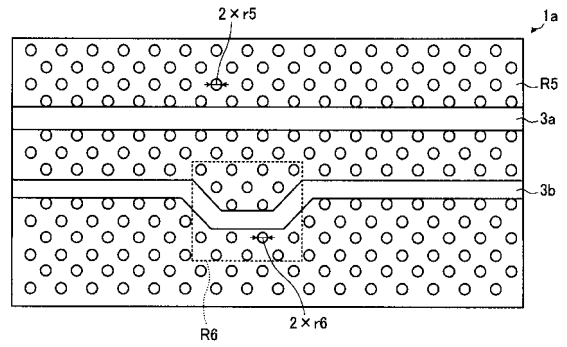
【図7】



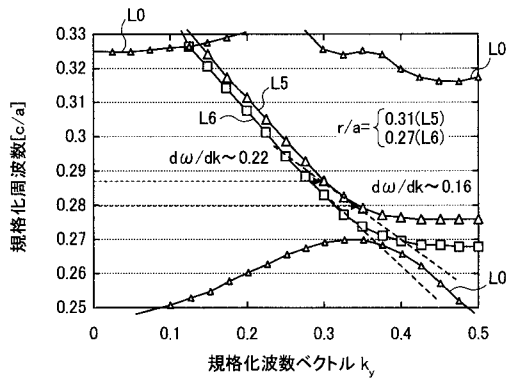
【図8】



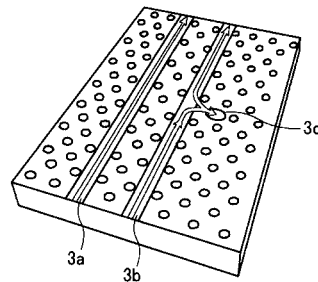
【図9】



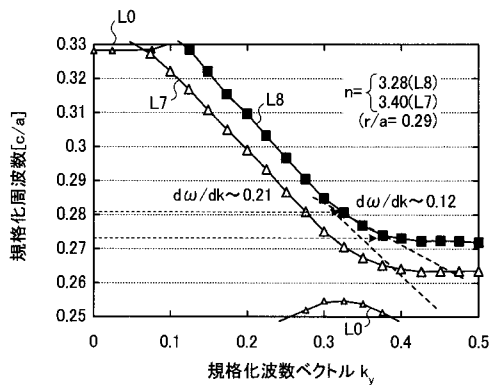
【図10】



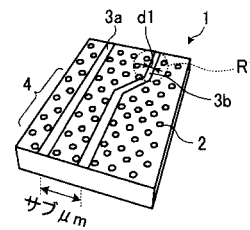
【図12】



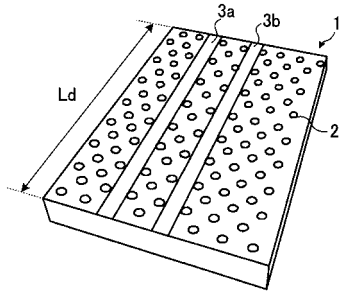
【図11】



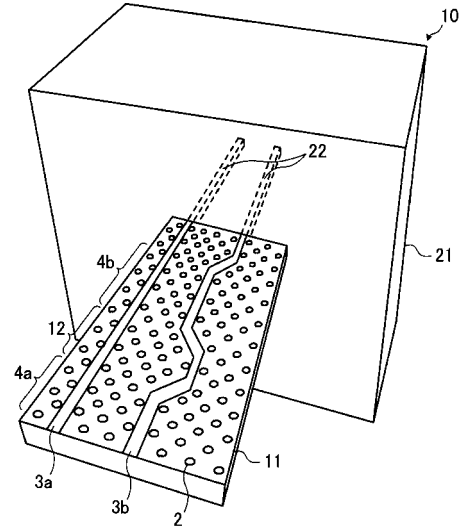
【図13】



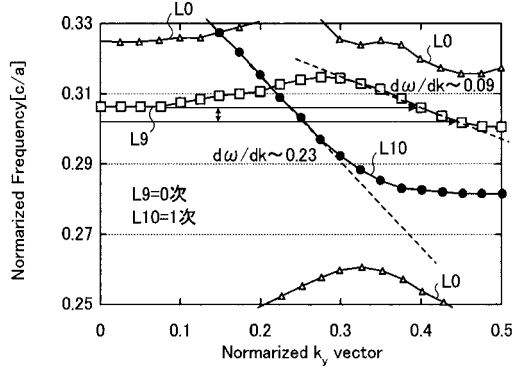
【 図 1 4 】



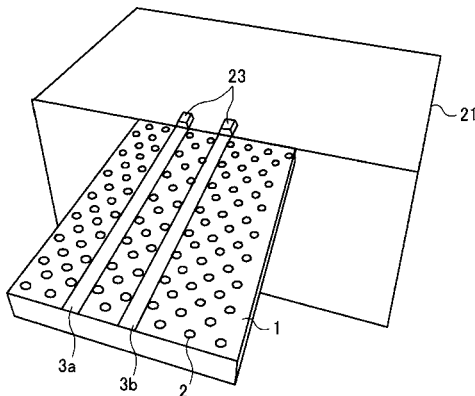
【 図 1 6 】



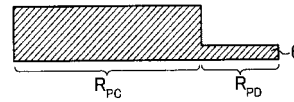
【 図 1 5 】



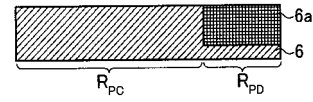
【 図 1 7 】



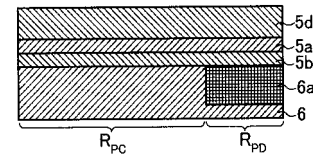
【 図 1 8 - 2 】



【 図 1 8 - 3 】



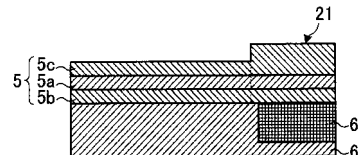
【 図 1 8 - 4 】



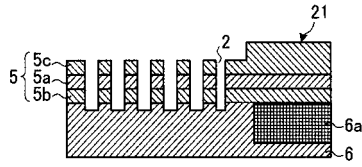
【 図 1 8 - 1 】



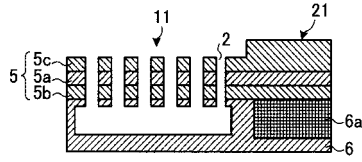
【 図 1 8 - 5 】



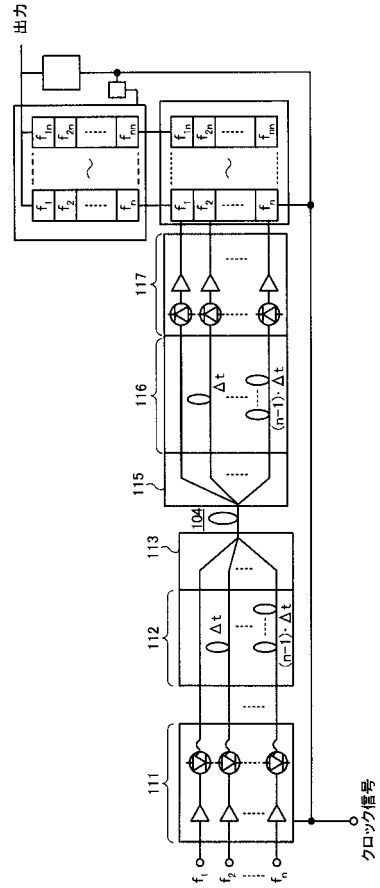
【図18-6】



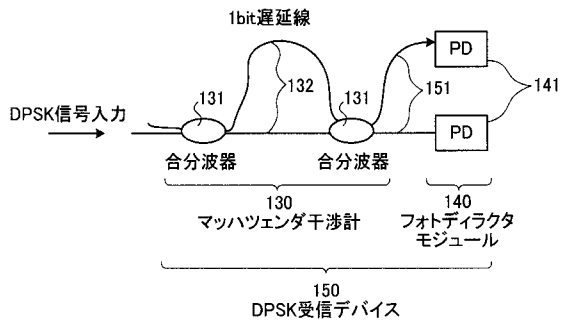
【図18-7】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

(72)発明者 野田 進

京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京都大学 大学院工学研究科内

審査官 山村 浩

(56)参考文献 特開2001-242329(JP,A)

特開2003-161971(JP,A)

特開2003-295143(JP,A)

特開2004-037938(JP,A)

特開2004-163731(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/00

G02B 6/12