

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6445038号
(P6445038)

(45) 発行日 平成30年12月26日 (2018.12.26)

(24) 登録日 平成30年12月7日 (2018.12.7)

(51) Int. Cl.	F I
HO4J 14/04 (2006.01)	HO4J 14/04
GO2B 6/00 (2006.01)	GO2B 6/00 C
HO4B 10/2581 (2013.01)	HO4B 10/2581
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B 6/02 431
	GO2B 6/02 411

請求項の数 9 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2016-556719 (P2016-556719)	(73) 特許権者	391030332
(86) (22) 出願日	平成27年2月10日 (2015.2.10)		アルカテルルーセント
(65) 公表番号	特表2017-514344 (P2017-514344A)		フランス国、92100・ブローニュービ
(43) 公表日	平成29年6月1日 (2017.6.1)		ヤンクール、ルート・ドゥ・ラ・レーヌ・
(86) 国際出願番号	PCT/US2015/015150		148/152
(87) 国際公開番号	W02015/138068	(74) 代理人	100094112
(87) 国際公開日	平成27年9月17日 (2015.9.17)		弁理士 岡部 譲
審査請求日	平成28年10月18日 (2016.10.18)	(74) 代理人	100106183
(31) 優先権主張番号	14/230,937		弁理士 吉澤 弘司
(32) 優先日	平成26年3月31日 (2014.3.31)	(74) 代理人	100114915
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 三村 治彦
(31) 優先権主張番号	61/950,803	(74) 代理人	100120363
(32) 優先日	平成26年3月10日 (2014.3.10)		弁理士 久保田 智樹
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100125139
			弁理士 岡部 洋

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マルチモード光ファイバへの光信号ストリームの空間モード多重化

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光出力と複数の光入力とを有する光空間モード・マルチプレクサと、
前記光空間モード・マルチプレクサの前記光出力に一端が接続された光空間モード・フ

ィルタと

を備え、

前記光空間モード・フィルタは、光伝搬モードを有するマルチモード光ファイバに一端が接続されるように構成され、また、前記マルチモード光ファイバ内での速度が選択された範囲内にある前記マルチモード光ファイバのそれら光伝搬モードを通過させ、前記マルチモード光ファイバのうち残りの光伝搬モードをブロックするように構成される、

装置。

【請求項 2】

光空間モード多重化を介して前記マルチモード光ファイバに光信号ストリームを並行して送信することができる光送信器であって、前記光送信器は、光データ変調器のアレイを含み、前記アレイの各変調器は、前記複数の光入力のうちの1つに光学的に接続される、光送信器

をさらに備える、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

前記マルチモード光ファイバと、前記マルチモード光ファイバを介して前記光送信器から前記光信号ストリームを受信するように接続された光データ受信器とをさらに備える、

請求項 2 に記載の装置。

【請求項 4】

光空間モード多重化を介して光信号を送信するように構成された光送信器と、
前記光送信器から前記送信された光信号を受信するように接続された近端を有し、光伝搬モードのセットを有する、少なくとも 1 つのスパンのマルチモード光ファイバと、
前記光信号をフィルタリングするように接続された光空間モード・フィルタと
を備えるシステムであって、

前記システムは、前記光伝搬モードのセットの真部分集合外の前記光伝搬モードの前記光信号を前記マルチモード光ファイバを介して実質的に送信することなく、前記光伝搬モードのセットの前記真部分集合の前記光伝搬モードの前記光信号を、前記マルチモード光ファイバを介して送信するように構成され、前記真部分集合は、選択されたインターバル内の光速度を有する、前記少なくとも 1 つのスパンのマルチモード光ファイバの光伝搬モードを含む、
システム。

10

【請求項 5】

前記光空間モード・フィルタは、前記真部分集合外の前記光伝搬モード上の光を、前記真部分集合内の前記光伝搬モード上の光より少なくとも 10 デシベルだけ減衰させるように構成されている、請求項 4 に記載のシステム。

【請求項 6】

前記マルチモード光ファイバを介して前記送信された光信号を受信し、前記真部分集合内の前記光伝搬モードの前記光信号だけに基づいて、前記マルチモード光ファイバから受信される光の多入力多出力処理または等化を実行するように接続された光データ受信器をさらに備える、請求項 4 に記載のシステム。

20

【請求項 7】

光データ搬送ビームを作るために複数のデータ変調された光搬送波を並行して光空間モード多重化するステップと、

マルチモード光ファイバの端面で、事前に設定された範囲外の速度を有する光伝搬モードを励起することのできる光を除去するために前記光データ搬送ビームを光空間モード・フィルタリングするステップであって、バック・ツー・バック構成で接続された光空間モード・デマルチプレクサと光空間モード・マルチプレクサとを含む光空間モード・フィルタへ前記光データ搬送ビームを送信するステップを含む、光空間モード・フィルタリングするステップと、

30

前記事前に設定された範囲内の速度を有する前記マルチモード光ファイバの全ての光伝搬モードを励起するために、前記光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームを前記端面へ送信するステップと

を含む方法。

【請求項 8】

前記送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームが前記マルチモード光ファイバの 1 つまたは複数のスパンをトラバースし終えた後に、前記送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームの光空間モード・フィルタリングを実行するステップをさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

40

【請求項 9】

前記実行するステップは、前記事前に設定された範囲外の速度を有する前記光伝搬モードによって搬送される光を除去するように構成される、請求項 8 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、2014年3月10日に出願した米国特許仮出願第61/950,803号の利益を主張するものである。

【0002】

50

本発明は、光空間モード・マルチプレクサと、光空間モード・マルチプレクサを使用する方法および装置とに関する。

【背景技術】

【0003】

このセクションでは、本発明のよりよい理解を容易にするのに役立つ諸態様を紹介する。したがって、このセクションの記載は、この観点から読まれるべきであり、何が従来技術であり何が従来技術ではないのかに関する自認として理解されるべきものではない。

【0004】

いくつかの光通信システムでは、光通信信号は、マルチモード光ファイバを介して伝送される。そのようなマルチモード光ファイバは、光通信システムが光空間モード多重化を使用する場合に、高いデータ伝送レートをサポートし得る。光空間モード多重化では、異なる横空間強度分布を有する伝搬モードは、たとえば、マルチモード光ファイバの総伝送容量がシングルモード光ファイバの伝送容量より多くなるように、光データ信号ストリームを搬送し得る。そのような光通信システムでは、光受信器は、多入力多出力 (MIMO: multiple-input multiple-output) 技法とデジタル信号プロセッサ (DSP) とを使用して、光受信器で受信される光データ・ストリームからデータを復調し得る。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】米国特許出願公開第2014/0055843号

【特許文献2】米国特許出願公開第2013/0068937号

【特許文献3】米国特許出願公開第2012/0177384号

【特許文献4】米国特許出願公開第2011/0243574号

【特許文献5】米国特許出願公開第2011/0243490号

【特許文献6】米国特許出願公開第2010/0329670号

【特許文献7】米国特許出願第13/78684号

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0006】

残念ながら、一部のマルチモード光ファイバは、空間伝搬モードの異なるグループの間で強い分散を生じさせる。本明細書では、様々な例示的な装置、システム、および方法が、マルチモード光ファイバの伝搬モードの一部を選択的に励起する一方で、他の伝搬モードを励起しないように構成される。具体的には、例示的な装置は、その位相速度が事前に設定された範囲内にある伝搬モードの真部分集合、たとえば、事前に設定された範囲内の位相速度を有するすべての伝搬モードを励起し得る。伝搬モードのそのような選択的励起は、マルチモード光ファイバ・リンクのより高いデータ・レートおよび/またはより長いスパンの使用を可能にし得る。いくつかのそのような装置、システム、および方法は、励起される伝搬モードの個数に対する調整機能をも提供し得る。

【0007】

第1の実施形態は、光出力と複数の光入力とを有する光空間モード・マルチプレクサと、光空間モード・マルチプレクサの光出力に一端が接続された (end-connected) 光空間モード・フィルタとを含む装置を提供する。光空間モード・フィルタは、光伝搬モードのセットを有するマルチモード光ファイバに一端が接続されるように構成され、マルチモード光ファイバ内でのその速度が選択された範囲内にある、上記セットの光モードを通過させ、上記セットの光モードのうちの残りの光モードをブロックするように構成される。

【0008】

装置のいくつかの第1の実施形態では、光空間モード・フィルタは、その両端にテーバ

10

20

30

40

50

ー付きのセグメントを有する、マルチモード光ファイバのセグメントを含むことができる。いくつかのそのような実施形態では、マルチモード光ファイバのセグメントの中央セグメントは、マルチモード光ファイバのセグメントの両端のセグメントより小さい直径の光コアを有する。

【0009】

装置の第1の実施形態のいずれも、光空間モード多重化を介してマルチモード光ファイバに光信号ストリームを並行して送信することができる光送信器をさらに含むことができる。光送信器は、光データ変調器のアレイを含む。アレイの各光データ変調器は、複数の光入力のうち1つに光学的に接続される。いくつかのそのような実施形態は、マルチモード光ファイバと、マルチモード光ファイバを介して光送信器から光信号ストリームを受信するように接続された光データ受信器とをさらに含む。

10

【0010】

装置のいくつかの第1の実施形態では、光空間モード・フィルタは、バック・ツー・バック構成で接続された、光空間モード・デマルチプレクサと光空間モード・マルチプレクサとを含み得る。

【0011】

装置のいくつかの第1の実施形態では、光空間モード・フィルタは、第2のセットの光モードだけを通して電氣的に再構成可能とされ得、第2のセットは、第1のセットの真部分集合である。

【0012】

第1の実施形態のいずれにおいても、光空間モード・フィルタは、上記セットの光モードの残りの光モードの光を、マルチモード光ファイバ内でのその速度が選択された範囲内であるセットの光モードの光より少なくとも10デシベルだけより減衰させるように構成され得る。

20

【0013】

第2の実施形態は、光送信器と、少なくとも1つのスパンのマルチモード光ファイバを含むシステムを提供する。光送信器は、光空間モード多重化を介して光信号を送信するように構成される。少なくとも1つのスパンのマルチモード光ファイバは、光送信器から送信された光信号を受信するように接続された近端を有し、光伝搬モードのセットを有する。このシステムは、伝搬モードのセットの真部分集合外の光伝搬モードの光信号を実質的に励起することなく、真部分集合を介してマルチモード光ファイバを介して光信号を送信するように構成される。真部分集合は、選択されたインターバル内の光速度を有する、上記セットの光伝搬モードを含む。

30

【0014】

システムの第2の実施形態のいずれにおいても、光送信器は、真部分集合外の光伝搬モード上の光を、真部分集合内の光伝搬モード上の光より少なくとも10デシベルだけ減衰させるように構成された光空間モード・フィルタを含み得る。

【0015】

システムの第2の実施形態のいずれにおいても、光データ送信器は、真部分集合外の光伝搬モード上の光をブロックするように構成された光空間モード・フィルタを含み得る。

40

【0016】

第2の実施形態のいずれにおいても、少なくとも1つのスパンのマルチモード光ファイバは、真部分集合内の光伝搬モード上の光より、真部分集合外の光伝搬モード上の光を選択的に減衰させる全光プロセッサに光ファイバ中の光を送信するために接続された遠端を有し得る。

【0017】

システムの第2の実施形態のいずれにおいても、光データ送信器は、光空間モード・フィルタに直列に接続された光空間モード・マルチプレクサを含み得る。

【0018】

第2の実施形態のいずれにおいても、システムは、マルチモード光ファイバを介して送

50

信された光信号を受信し、真部分集合内の空間光モードの光だけに基づいて、マルチモード光ファイバから受信される光の多入力多出力処理または等化を実行するように接続された光データ受信器をさらに含むことができる。

【0019】

第3の実施形態は、光データ搬送ビームを作るために複数のデータ変調された光搬送波を並行して光空間モード多重化するステップを含む方法を提供する。この方法は、マルチモード光ファイバの端面で、事前に設定された範囲外の速度を有する光伝搬モードを励起することのできる光を除去するために光データ搬送ビームを光空間モード・フィルタリングするステップも含む。この方法は、事前に設定された範囲内の速度を有するマルチモード光ファイバの光伝搬モードを励起するために、光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームを端面へ送信するステップを含む。

10

【0020】

第3の実施形態のいずれにおいても、方法は、送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームがマルチモード光ファイバの1つまたは複数のスパンをトラバースし終えた後に、送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームの光空間モード・フィルタリングを実行するステップをさらに含む。この実行するステップは、事前に設定された範囲外の速度を有する光伝搬モードによって搬送される光を除去するように構成され得る。

【0021】

第3の実施形態のいずれにおいても、方法は、送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送光ビームを光空間モード多重分離するステップと、光空間モード多重分離によって作られる光ビームの等化またはMIMO処理を実行するステップとをさらに含む。

20

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】光空間モード多重化を実行するための光学装置を示すブロック図である。

【図2】図1の光学装置のいくつかの実施形態が空間モード多重化された光を送信し得る光ファイバの断面の屈折率分布を示すグラフである。

【図3】図1の光学装置のいくつかの実施形態が空間モード多重化された光を送信し得るマルチモード光ファイバの一例のインパルス応答を示すグラフである。

30

【図4A】図1の光空間モード・フィルタの一実施形態内で使用され得る二重テーパ付き光ファイバの縦断面を示す図である。

【図4B】図1の光空間モード・フィルタの別の実施形態を示すブロック図である。

【図4C】図1の光空間モード・フィルタのモード再構成可能実施形態を示すブロック図である。

【図5】たとえば、データ変調された光搬送波の光空間モード多重化を実行するために、図1の光学装置を使用する光送信器を示すブロック図である。

【図6】たとえば、図5の光送信器を使用して、データ変調された光搬送波の光空間モード多重化を実行する光通信システムを示すブロック図である。

【図7】たとえば、図5の光送信器および/または図6の光通信システムを用いて、データ変調された光搬送波の光空間モード多重化を実行する方法を示す流れ図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0023】

図面および本文では、同様の符号は、同様のまたは同一の機能および/または構造を有する要素を示す。

【0024】

図面の一部では、いくつかの特徴の相対的な寸法が、その中の構造のうちの1つまたは複数をもより明瞭に示すために強調されている場合がある。

【0025】

本明細書では、様々な実施形態が、「課題を解決するための手段」、図面、および「発

50

明を実施するための形態」によってより十分に説明される。それでも、本発明は、様々な形で実施され得、「課題を解決するための手段」、図面、および「発明を実施するための形態」で説明される実施形態に限定されない。

【0026】

本明細書では、光空間モード・マルチプレクサは、マルチモード光ファイバの端面がマルチプレクサの光出力に関して適切に配置されるならば、その光入力のうちの一つでの光の受信にตอบสนองして、マルチモード光ファイバの光伝搬モードの組合せを励起することができる。光が、光空間モード・マルチプレクサの光入力のうち異なる光入力を受信される時には、異なる励起された組合せは、一定の係数より大きく異なる、マルチモード光ファイバの軸に横向きに位相分布および/または振幅分布を有する。各そのような励起された組合せは、主にそのようなモードの正規直交系の単一の光伝搬モードである場合があり、あるいは、そのような正規直交モードの重畳である場合がある。異なる励起された組合せは、ほぼ直交である場合とそうでない場合とがある。

10

【0027】

本明細書では、光空間モード・デマルチプレクサは、光空間モード・マルチプレクサであるが、光伝搬方向を反転されて動作するものとして議論される。

【0028】

本明細書では、マルチモード光ファイバは、偏光回転より大きく異なる少なくとも2つのそのようなモードを含む光伝搬モードの完全な正規直交系を有する。

【0029】

様々な実施形態は、少なくとも、従来の光遠隔通信のC、L、およびS波長帯のうちの一つまたは複数内の波長で光を処理するように構成された装置、システム、および方法を含む。

20

【0030】

図1に、光出力00を介してマルチモード光ファイバ6の隣接し面する端面2にN個の光信号ストリームを並行して光学的に送信することのできる光学装置10を示す。整数Nは、2以上である。光学装置10は、光空間モード・マルチプレクサ12と光空間モード・フィルタ14とを含む。光空間モード・マルチプレクサ12は、N個の個々の光信号ストリームを受信するためのN個の光入力 I_1, \dots, I_N のアレイと、光出力0すなわち、N個の受信された個々の光信号ストリームがこれに送信される光出力とを有する。光空間モード・フィルタ14は、光空間モード・マルチプレクサ12の隣接する光出力0に一端が接続され、光学装置10の光出力00に一端が接続される。光学装置10は、光空間モード・マルチプレクサ12の光出力0と光空間モード・フィルタ14の光入力との間および/または光空間モード・フィルタ14の光出力00とマルチモード光ファイバ6の端面2との間に配置された、視準し、集光し、かつ/または拡大する光学系、たとえばバルク型レンズおよび/または鏡をオプションで含むことができる。

30

【0031】

光空間モード・マルチプレクサ12は、N個の光入力 $I_1 \sim I_N$ の個々の光入力を受信されるN個の光信号ストリームのそれぞれを、その端面2でマルチモード光ファイバ6の光伝搬モードのうちの一つまたは複数の対応する組合せを励起する光パターンとして送信するように構成される。異なる組合せは、マルチモード光ファイバ6の軸に横向きの平面上で異なる位相分布および/または振幅分布を有する、すなわち、軸に横向きの線形独立な位相分布および/または振幅分布を有する。異なる組合せは、ほぼ直交である場合とそうでない場合とがある。

40

【0032】

光空間モード・マルチプレクサ12は、従来の自由空間光カプラもしくはマルチプレクサ、フォトニック・ランタン・カプラもしくはマルチプレクサ、または3D光導波路カプラもしくはマルチプレクサとすることができる。そのような従来の光カプラまたはマルチプレクサの例は、米国特許出願公開第2014/0055843号、米国特許出願公開第2013/0068937号、米国特許出願公開第2012/0177384号、米国特

50

許出願公開第2011/0243574号、米国特許出願公開第2011/0243490号、および米国特許出願公開第2010/0329670号、ならびに/または米国特許出願第13/78684号に記載され得る。光空間モード・マルチプレクサ12の様々な実施形態は、本願の教示と上記に列挙した米国特許出願公開および/または上記に列挙した米国特許出願のうちの1つまたは複数の教示と組み合わせることによって構成される。上にリストした米国特許出願公開および上に引用した米国特許出願は、参照によってその全体が本明細書に組み込まれている。

【0033】

製造および/またはアライメントの不完全さに起因して、従来の $N \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサは、通常、 $N \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサの N 個の光入力のうちの1つへの光の入力にตอบสนองして、そのマルチプレクサに一端が接続されたマルチモード光ファイバの複数の光伝搬モードを励起するはずである。マルチモード光ファイバが、多数の直交光伝搬モードを有する場合には、そのような励起された光伝搬モードのセットの一部は、しばしば、そのような $N \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサによって主に励起される光伝搬モードとは大きく異なる位相速度を有する。光信号の送信が、非常に異なる速度を有する光伝搬モードの励起を引き起こす時に、送信された光は、大きい範囲の相対遅延を伴って、マルチモード光ファイバの第2の端面に到着し得る。そのような大きい範囲の相対到着遅延は、マルチモード光ファイバの遠端面での、たとえば従来の等化および/または多入力多出力(MIMO: multiple-input-multiple-output)技法を介する、受信された光信号を復調する能力に干渉し得る。実際に、大きく異なる速度を有する光伝搬モードの並列励起は、光データ伝送に関するマルチモード光ファイバの使用可能な長さに厳しい上限を課すことがあり、かつ/またはマルチモード光ファイバ内の光データ伝送レートに厳しい上限を課すことがある。

【0034】

様々な実施形態では、光空間モード・フィルタ14は、光空間モード・マルチプレクサ12による、マルチモード光ファイバ6内で非常に異なる位相速度を有する光伝搬モードの励起を低減するように構成される。具体的には、光空間モード・フィルタ14は、望まれない横分布を有する光すなわち、マルチモード光ファイバ6の望まれない光伝搬モードに結合した光を除去しまたは強く減衰させ、望まれる横分布を有する光すなわち、マルチモード光ファイバ6の望まれる光伝搬モードのみに結合した光を通過させる。望まれる光は、通常、光空間モード・フィルタ14の光入力および光出力の断面にわたるおよび/またはマルチモード光ファイバ6の端面にわたる、望まれない光に関する消滅する重なり積分を有する。望まれる光は、マルチモード光ファイバ6内の速度が事前に設定された範囲内であるマルチモード光ファイバ6の光伝搬モードを励起する。望まれない光は、マルチモード光ファイバ6内の速度が同一の事前に設定された範囲外であるマルチモード光ファイバ6の光伝搬モードのうちの1つまたは複数の励起する。

【0035】

光空間モード・フィルタ14は、たとえばマルチモード光通信リンクとして、マルチモード光ファイバ6の使用を妨げないのに十分に小さい位相速度の事前に設定された範囲を作るように構成され得る。たとえば、光空間モード・フィルタ14は、光空間モード・フィルタ14が光を減衰させるのよりも少なくとも10dB、好ましくは少なくとも15dB、または少なくとも20dBだけより強く光を減衰させることによって、そのような望まれない光を除去するように構成され得、これによって、マルチモード光ファイバ6の望まれる光伝搬モードだけを励起する。そのような望まれない光の強い減衰は、従来の少数モード光ファイバより多数の伝搬モードを有するタイプのマルチモード光ファイバ6の使用を可能にし、なおかつ、結果の光リンクがかなりの長さを有することを可能にすることができる。望まれない光伝搬モードのそのようなモード選択的な強い減衰の可用性は、その光伝搬モードのうちのより多数またはより少数の上で光データ・ストリームを搬送するための同一のマルチモード光ファイバ6の将来の再構成をも可能にすることができる、すなわち、これによって、空間モード多重化におけるスケーラビリティを提供する。

【0036】

図2に、図1のマルチモード光ファイバ6として使用することのできる、例の光ファイバの断面の屈折率分布を示す。例の光ファイバは、約50マイクロメートル(μm)の直径を有するグレーデッドインデックス光コアを有する。図示の屈折率分布は、例の光ファイバの軸からの距離(D)の関数としての、光コアの屈折率と光クラディングの屈折率との間のパーセンテージ差()を示す。

【0037】

一例として、米国ニューヨーク州イサカのコーニング(Corning)社(www.corning.com)によって販売され、商標CLEAR CURVE(登録商標)の下で広告されるOM3+OM4シリカ・マルチモード光ファイバを、たとえば図1のマルチモード光ファイバ6に関して、使用することができる。

10

【0038】

代替案では、マルチモード光ファイバ6は、コーニング社によって販売されるOM3+OM4シリカ・マルチモード光ファイバに類似するがこれとは異なる半径方向屈折率分布を有することができる。具体的には、半径方向屈折率分布は、望ましい光通信波長、たとえば1550ナノメートルでマルチモード光ファイバ6の様々な伝搬モードの間の微分群遅延を減らすか最小化するように変更され得る。

【0039】

図3は、図1のマルチモード光ファイバ6の一例のインパルス応答を示すプロットである。このプロットは、光がマルチモード光ファイバ6の例をトラバースするための出力光強度および相対遅延を示す。このプロットは、マルチモード光ファイバ6の例のLP₀₁、LP₁₁、LP₀₂、LP₂₁、およびより高次のLPモード(HOM)に対応するピークのラベルをも含む。特筆すべきことに、LP₀₁モードとLP₁₁モードとの間の相対到着遅延は短い、すなわち、約1.5ナノ秒(ns)であり、LP₀₁モードとLP₀₂モードおよびLP₂₁モードとの間の相対到着遅延はより長い、すなわち、約2nsであり、LP₀₁モードとHOMとの間の相対到着遅延は最長である、すなわち、2nsより長い。したがって、マルチモード光ファイバ6のこのグレーデッドインデックス例では、相対到着遅延は、おおむね、LPモード番号が増加するにつれて増加する。

20

【0040】

マルチモード光ファイバ6のこの例に関して、図1の光学装置10は、異なる実施形態を有することができる。第1の実施形態では、光空間モード・マルチプレクサ12は、マルチモード光ファイバ6の例のLP₀₁モードおよびLP₁₁モードに光を透過させ、マルチモード光ファイバのより高いLPモードに光を実質的に透過させないことが可能である。この第1の実施形態では、光空間モード・フィルタ14は、LP₀₁モードおよびLP₁₁モードに結合する光を通過させ、他のLPモードすなわちLP₀₂モードおよびLP₂₁モードと図3のHOMとに結合する光を除去するように構成される。したがって、マルチモード光ファイバ6内の望まれる光伝搬モードの速度の事前に設定された範囲は、マルチモード光ファイバ6の例の遠端面で1.5nsの、事前に設定された範囲内の相対到着遅延をもたらすはずである。代替の第2の実施形態では、光空間モード・マルチプレクサ12は、マルチモード光ファイバ6の例のLP₀₁モード、LP₁₁モード、LP₀₂モード、およびLP₂₁モードに光を透過させることができる。この第2の実施形態では、光空間モード・フィルタ14は、LP₀₁モード、LP₁₁モード、LP₀₂モード、およびLP₂₁モードに結合する光を通過させ、図3のHOMに結合する光を除去するように構成される。したがって、マルチモード光ファイバ6の例の望まれる伝搬モードの速度の事前に設定された範囲は、第2の実施形態より長くなるはずであり、2nsまでの相対到着遅延を引き起こすことができる。

30

40

【0041】

図4A、図4B、および図4Cは、図1の光空間モード・フィルタ14の様々な実施形態14A、14B、14Cを示す。

【0042】

50

図4Aを参照すると、光空間モード・フィルタ14Aは、光クラディング24によって囲まれた光コア22を有するマルチモード光ファイバのセグメント20を含む。マルチモード光ファイバのセグメント20は、セグメント20の端面から離れて光コア22の直径を徐々に縮小させるテーパを有する端セグメント26、28を有する。セグメント20は、2つの端セグメント26、28を接続する中央サブセグメント30をも有する。中央サブセグメント30内では、光コア22および光クラディング24は、端セグメント26、28内より薄く、その中でほぼ一定の直径を有する。

【0043】

セグメント20の第1の端面では、端セグメント26は、たとえば、図1のマルチモード光ファイバ6と同一の屈折率分布を有することができる。

10

【0044】

セグメント20の第2の端面では、第2の端セグメント28は、図1の光空間モード・マルチプレクサ12の光出力0に一端が接続されるのに適切な屈折率分布を有することができる。たとえば、この分布は、光出力0において、伝搬する光空間モードの望まれないひずみまたは混合を全く引き起こさないものとして行うことができる。

【0045】

第1および第2の端セグメント26、28は、セグメント20の中央の前後で反射対称とすることができる。たとえば、そのような構成は、図1の光空間モード・マルチプレクサ12の光出力0が、図1のマルチモード光ファイバ6と同一タイプのマルチモード光ファイバのセグメントである時に使用され得る。

20

【0046】

セグメント20内では、中央サブセグメント30は、そうでなければ図1のマルチモード光ファイバ6の望まれない光伝搬モードに結合するはずの伝搬する光を減衰させるように構成される。具体的には、中央サブセグメント30内で、光コア22は、光コア22が端セグメント26、28または図1のマルチモード光ファイバ6のいずれかより少ない光伝搬モードを案内するようにするために、より狭くなるように構成される。中央サブセグメント30内で、そのような案内されない光伝搬モードによって搬送される光は、光コア22から光クラディング24に漏れ、その後、中央サブセグメント30の側面から漏れることができ、これによってそのような望まれない光伝搬モードを減衰させる。中央サブセグメント30内では、光クラディング24も、端セグメント26、28内より薄くされ得、光クラディング24は、中央サブセグメント30内で一致する屈折率または相対的により高い屈折率の第2のクラディング材料32によって囲まれることも可能である。両方のそのような特徴は、通常、そのような案内されない光伝搬モードからの光に光クラディング24、32から漏れさせ、これによって、光空間モード・フィルタ14Aの側面から失われることを引き起こす。中央サブセグメント30は、そのような案内されない光伝搬モードの事前に選択された望まれる量の減衰を作るのに十分に長くなるように構成され、その結果、そのようなモードの光は、図1のマルチモード光ファイバ6の望まれない光伝搬モードをその後励起するために大きく残ることがなくなる。

30

【0047】

第1および第2の例では、中央サブセグメント30は、異なる形を有し、その結果、光空間モード・フィルタ14Aは、図3に関して上ですでに説明された、光空間モード・フィルタ14の第1および第2の実施形態として機能するようになる。第1の実施形態では、中央サブセグメント30の光コア22は、図3のマルチモード光ファイバ6の上の例のLP₀₁モードおよびLP₁₁モードだけに結合する光伝搬モードだけを案内する直径を有する。次に、図3のより高いLPモードを励起することができる光伝搬モードすなわち、LP₀₂モードおよびLP₂₁モードとHOMとは、中央サブセグメント30内で強く減衰される。第2の実施形態では、中央サブセグメント30の光コア22は、図3のマルチモード光ファイバ6の例のLP₀₁モード、LP₁₁モード、LP₀₂モード、およびLP₂₁モードだけに結合する光伝搬モードだけを案内する異なる直径を有する。その後、図3のHOMモードを励起することができる光伝搬モードだけが、中央サブセグメント

40

50

30内で強く減衰される。

【0048】

いくつかのグレーデッドインデックス・マルチモード光ファイバに関して、本発明人は、LPモードが、定性的に規則的な形でモード番号と共に増加する、位相速度およびファイバの軸からの平均距離を有すると考える。そのようなグレーデッドインデックス・マルチモード光ファイバに関して、本発明人は、そうでなければそのようなグレーデッドインデックス・マルチモード光ファイバ内で望まれる次数を超えるLPモードを端部励起する(end-excite)はずの光伝搬モードを案内しないのに十分に小さい直径をその光コア22が有する光空間モード・フィルタ14Aの中央サブセグメント30を設計し、構成することが、通常は可能であると考えられる。

10

【0049】

図4Bを参照すると、光空間モード・フィルタ14Bは、バック・ツー・バックの形で接続された、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ40と $M \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサ42を含む。 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ40は、 $1 \times M$ 光空間モード・マルチプレクサ42のM個の光入力48₁, ..., 48_Mのうちの対応する1つにM個の光導波路46₁, ..., 46_Mによって接続されたM個の光出力44₁, ..., 44_Mを有する。光空間モード・フィルタ14Bの光入力50は、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ40の光入力である。光空間モード・フィルタ14Bの光出力52は、 $M \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサ42の光出力である。

【0050】

$1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ40および $M \times 1$ 光空間モード・マルチプレクサ42は、図1の光空間モード・デマルチプレクサ12に関してすでに議論した、自由空間光デバイス、フォトニック・ランタン、または3D光導波路デバイスとして作られ得る。

20

【0051】

光多重分離のために操作される時に、光空間モード・デマルチプレクサ40および光空間モード・マルチプレクサ42は、たとえば、機能的に同一の光デバイスとすることができる。したがって、図1のマルチモード光ファイバ6の端面2が、光入力50または光出力52に隣接し、これに面して配置される場合に、光空間モード・デマルチプレクサ40または光空間モード・マルチプレクサ42は、適宜、端面2から受信される光をほぼ同一のパターンに、すなわち光出力44₁ ~ 44_M上または光入力48₁ ~ 48_M上で分割する。しかし、図1のマルチモード光ファイバ6の端面2が、その中で前に論じた望まれない光伝搬モードの光を出力する場合には、光空間モード・デマルチプレクサ40または光空間モード・マルチプレクサ42は、光出力44₁ ~ 44_M上または光入力48₁ ~ 48_M上に光をほとんどまたは全く透過させないように構成される。この理由から、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ40および光空間モード・マルチプレクサ42のバック・ツー・バック組合せは、図1のマルチモード光ファイバ6の望まれない伝搬モードから受信される光を選択的に除去し、図1のマルチモード光ファイバ6の望まれる光伝搬モードから受信される光を通過させる光フィルタである。

30

【0052】

M個の光導波路46₁, ..., 46_Mは、マルチモード光ファイバ6の光伝搬モードのうちの異なる1つによって搬送される光の間の相対到着遅延を事前に補償し、かつ/または事後に補償することができる。一例として、光導波路46₁, ..., 46_Mのうちの異なる1つは、マルチモード光ファイバ6の相対的に直交する伝搬モードに結合する光を搬送するように接続され得る。そのような実施形態では、光導波路46₁, ..., 46_Mは、光がマルチモード光ファイバ6を介して伝搬する時に作られるそのような相対到着遅延を事前に補償しかつ/または事後に補償するために、適切に異なる長さを有することができる。

40

【0053】

図4Cに、再構成可能な光空間モード・フィルタ14Cを示す。再構成可能な光空間モード・フィルタ14Cおよび光空間モード・フィルタ14Bは、両方が個々の光出力44

50

$1 \sim 44_M$ が個々の光入力 $48_1 \sim 48_M$ のそれぞれの 1 つに接続されるバック・ツー・バック構成の光空間モード・デマルチプレクサ 40 と光空間モード・マルチプレクサ 42 とを含むので、類似する。両方のデバイス 14B、14C において、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ 40 の M 個の光出力 $44_1 \sim 44_M$ は、光入力 50 が、図 1 のマルチモード光ファイバ 6 の隣接し、面する端面 2 を介して光伝搬モードの第 1 のセットの光を受信するように構成される時に、光を透過させる。光空間モード・フィルタ 14 では、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ 40 の K 個の光出力 $44_1 \sim 44_K$ だけが、光入力 50 が図 1 のマルチモード光ファイバ 6 の隣接し、面する端面 2 を介してその光伝搬モードの第 2 のセットからの光を受信する時に、光を透過させる。光空間モード・フィルタ 14C では、 K 個の光出力 $44_1 \sim 44_K$ は、光導波路 $46_1 \sim 46_K$ を介して対応する K 個の光入力 $48_1 \sim 48_K$ に接続され、残りの $(M - K)$ 個の光出力 $44_{K+1} \sim 44_M$ は、 $(M - K)$ 個の光導波路 $46_{K+1} \sim 46_M$ を介して対応する $(M - K)$ 個の光入力 $48_{K+1} \sim 48_M$ に接続される。ここで、第 2 のセットは、第 1 のセットの真部分集合である。

【0054】

光空間モード・フィルタ 14C は、1 つまたは複数の光ブロッカ 54、たとえば可変光減衰器と、光ブロッカ 54 を操作するように接続された電子コントローラ・コネクタ 56 とをも含む。1 つまたは複数の光ブロッカ 54 は、 $(M - K)$ 個の光導波路 $46_{K+1} \sim 46_M$ のセグメントに沿って配置され、 $(M - K)$ 個の光導波路 $46_{K+1} \sim 46_M$ は、光空間モード・デマルチプレクサ 40 の最後の $(M - K)$ 個の光出力 $44_{K+1} \sim 44_M$ に接続される。光出力 $44_{K+1} \sim 44_M$ は、その端面 2 が光入力 50 に隣接してこれに面して配置される時に、マルチモード光ファイバ 6 の光伝搬モードの第 2 のセットから光を受信しない。

【0055】

電子コントローラ 30 は、「通過状態」または「ブロック状態」に選択的になるように 1 つまたは複数の光ブロッカ 54 を動作させる。「通過状態」では、光ブロッカ 54 は、光モード・フィルタ 14C の光導波路 $46_1 \sim 46_M$ の M 個すべてが光空間モード・デマルチプレクサ 40 と光空間モード・マルチプレクサ 42 との間で光を透過させることができるようにするために、光が対応する $M - K$ 個の光導波路 $46_{K+1} \sim 46_M$ を通過することを可能にする。「ブロック状態」では、光ブロッカ 54 は、 K 個の光導波路 $46_1 \sim 46_K$ だけが光空間モード・デマルチプレクサ 40 と光空間モード・マルチプレクサ 42 との間で光を透過させることができるようにするために、 $(M - K)$ 個の光導波路 $46_{K+1} \sim 46_M$ 内の光を強く減衰させまたはブロックする。

【0056】

「通過状態」および「ブロック状態」は、図 1 のマルチモード光ファイバ 6 の光伝搬モードの異なるセットを除去する、光空間モード・フィルタ 14C のフィルタリング構成である。一例として、 $1 \times M$ 光空間モード・デマルチプレクサ 40 は、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の LP_{01} モードおよび LP_{11} モードから受信された光だけをその最初の K 個の光出力 $44_1 \sim 44_K$ に透過させ、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の LP_{02} モードおよび LP_{21} モードから受信された光だけをその最後の $(M - K)$ 個の光出力 $44_{K+1} \sim 44_M$ に透過させるように構成され得る。次に、「通過状態」では、光空間モード・フィルタ 14C は、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の LP_{01} モード、 LP_{11} モード、 LP_{02} モード、および LP_{21} モードから受信された光を通過させ、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の他の LP モードから受信された光を除去する。対照的に、「ブロック状態」では、光空間モード・フィルタ 14C は、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の LP_{01} モードおよび LP_{11} モードから受信された光だけを透過させ、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の他の LP モードから受信された光を除去する。「ブロック状態」では、 N 個の光入力 $I_1 \sim I_N$ のサブセットからの光データ・ストリーム、たとえば、図 3 の例のマルチモード光ファイバ 6 の光伝搬モードのより小さい第 2 のセットに結合された光入力 $I_1 \sim I_N$ の光データ・ストリームからの光データ・スト

10

20

30

40

50

リームだけを透過させるようにも構成される。

【0057】

図5に、空間モード多重化を使用するように構成された光送信器60を示す。光送信器60は、図1の光学装置10を含み、N個の光データ変調器62₁~62_NおよびN個の対応する光ソース64₁~64_Nの並列アレイをも含む。各光データ変調器62₁~62_Nは、光空間モード・マルチプレクサ12のN個の光入力I₁~I_Nのうちの対応する1つに光学的に接続される。各個々の光変調器62₁~62_Nは、対応する受信されたデジタル・データ・ストリームDATA₁, ..., DATA_Nによって、光ソース64₁~64_Nのうちの対応する1つから受信された光搬送波を変調する。

【0058】

各光データ変調器62₁~62_Nは、たとえば、任意の既知の光変調フォーマットに従って光搬送波を変調するように構成された任意の従来の外部光変調器とすることができる。適切な光変調フォーマットの例は、オン・オフ・キーイング、二相位相偏移変調(PSK)、四相PSK、および直角位相振幅変調(QAM)、たとえば4QAM、8QAM、16QAM、32QAM、または64QAMを含む。

【0059】

光ソース64₁~64_Nのアレイは、N個の異なる光レーザを含むことができ、あるいはその代わりに、単一の光レーザからの出力光が、N個の光データ変調器62₁~62_NにN個の別々の光搬送波を提供するために分割され、たとえば強度分割される場合に、単一の光レーザだけを含むことができる。N個の光ソース64₁~64_Nは、光学装置10が、N個の異なる波長の光搬送波ではなく、N個の並列光データ・ストリームを搬送するのにマルチモード光ファイバ6のN個の光伝搬モードを使用するので、同一のまたはほぼ同一の光波長を有することができる。

【0060】

いくつかの実施形態では、光送信器60は、N個の光ソース64₁~64_NのアレイのうちのQ個、N個の光データ変調器62₁~62_NのうちのQ個、およびQ個の光学装置10(図示せず)の並列アレイをも含むことができる。Q個のそのようなアレイの並列構造は、波長分割多重化(WDM)を提供することができる。たとえば、この実施形態は、偏光分割多重化を用いるQ/2個の光搬送波波長、または、偏光分割多重化ならびに図5の光送信器60内にすでに示された光空間モード多重化を用いないQ個の搬送波波長をサポートすることができる。

【0061】

図6に、光空間モード多重化を介してデータを送信する光通信システム70を示す。この光通信システムは、光送信器60、光受信器70、およびマルチモード光ファイバのP個のスパン6₁、6₂、...、6_pの全光系列を含む。ここで、Pは、1以上の整数である。

【0062】

光送信器60は、図5に関してすでに説明されている。

【0063】

マルチモード光ファイバのP個のスパン6₁、6₂、...、6_pは、従来のマルチモード光ファイバ、たとえば、図1のマルチモード光ファイバ6の上の例のうちのいずれかである。必ずではないがしばしば、各スパンのマルチモード光ファイバ6₁~6_pは、ほぼ同一の屈折率分布を有することができる。したがって、P個のスパンの系列は、光伝搬モードの同一のセットを有する。スパンのうちの隣接するスパンは、受信された光信号を光学的に再生成する(P-1)個の全光プロセッサ64₁、64₂、...、64_{p-1}に接続される。そのような光再生成は、光増幅、光分散補償、およびスパンの望まれない光伝搬モード上で伝搬する光を除去するための光空間モード・フィルタリングのうちのいずれかまたはすべてを含むことができる。そのようなスパン間光空間モード・フィルタリングは、少数モード光ファイバを使用する光増幅器または分散補償器内で実行され得る。たとえば、そのような少数モード光ファイバは、望まれない光伝搬モードを案内しないように構成さ

10

20

30

40

50

れ得る。代替案では、そのようなスパン間光空間モード・フィルタリングが、図1の光空間モード・フィルタ14に類似するかこれと同一のデバイス内で実行され得る。

【0064】

光受信器62は、最後のまたはP番目のスパンのマルチモード光ファイバ6_pの端面からN個の光信号ストリームを受信するように構成される。光受信器62は、光空間モード・デマルチプレクサ66と、電子プロセッサおよび/または光プロセッサ68と、オプションで光空間モード・フィルタ70とを含む。

【0065】

光空間モード・デマルチプレクサ66は、光送信器60の光空間モード・マルチプレクサ12に類似する構成を有することができる。光空間モード・デマルチプレクサ66は、各光出力O₁、...、O_Nがマルチモード光ファイバ6_pのN個の望まれる光伝搬モードのうちの一つから受信される光を受信するようにするために、受信される光を空間モード分割する。プロセッサ68は、たとえば、光等化および/もしくは電子等化を実行することができる。かつ/または異なるデータ・ストリームの間の混合を除去するために、結果のN個の光信号ストリームに対して電子MIMO処理を実行することができる。たとえば、光受信器62は、マルチモード光ファイバ6₁、6₂、...、6_pのP個のスパンでの不完全さ、温度変化、または機械的变化によって引き起こされた望まれない光空間モード混合を除去するように構成され得る。

【0066】

光空間モード・フィルタ70は、光送信器60内の光空間モード・フィルタ14に類似する構成を有することができる。光空間モード・フィルタ70は、マルチモード光ファイバ6_pの望まれない光伝搬モードから受信された光を除去しまたは強く減衰させるように構成される。そのような光空間モード・フィルタは、マルチモード光ファイバ6_pの望まれない光伝搬モードから受信された光の、光空間モード・デマルチプレクサ66および/またはプロセッサ68による処理をさらに単純化することができる。

【0067】

図7に、光空間モード多重化を介して、たとえば図5の光送信器60および/または図6の光通信システム70とデータを光学的に通信する方法80を示す。

【0068】

方法80は、光データ搬送ビームを作るために複数のデータ変調された光搬送波を並行して光空間モード多重化するステップ(ステップ82)を含む。たとえば、ステップ82を、図6の光空間モード・マルチプレクサ12によって実行することができる。

【0069】

方法80は、マルチモード光ファイバの端面で、事前に設定された範囲外の速度を有するその中の光伝搬モードを励起することのできるその中の光を除去するために光データ搬送ビームを光空間モード・フィルタリングするステップ(ステップ84)を含む。たとえば、ステップ84を、図6の光空間モード・フィルタ14によって実行することができる。

【0070】

方法80は、同一の事前に設定された範囲内の速度を有するマルチモード光ファイバの光伝搬モードを励起するために、マルチモード光ファイバの端面に光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送ビームすなわちステップ84で作られたビームを送信するステップ(ステップ86)を含む。たとえば、送信するステップ86は、光送信器60の光出力O₀に最も近く、これに面し、これに横に位置合せされた、図6のマルチモード光ファイバ6₁の端面に、光空間モード・フィルタリングされた、データ搬送ビームを送ることができる。

【0071】

様々な実施形態では、方法80は、マルチモード光ファイバの1つまたは複数のスパン、たとえば図6のマルチモード光ファイバ6₁~6_pのスパンのサブセットをトラバースした後に、送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送光ビームの光空間

10

20

30

40

50

モード・フィルタリングを実行するステップをも含むことができる。実行するステップは、事前に設定された範囲外の速度を有する光伝搬モードによって搬送される光を除去するように構成され得る。光空間モード・フィルタリングは、たとえば、全光プロセッサ64₁、64₂、...、64_{p-1}のいずれかおよび/または図6の光データ受信器62の光空間モード・フィルタ70内で実行され得る。

【0072】

様々な実施形態では、この方法は、送信された光空間モード・フィルタリングされたデータ搬送光ビームの光空間モード多重分離のステップと、マルチモード光ファイバ内のデータ変調された光搬送波に対して引き起こされたモード混合を除去するための、多重分離によって作られる光ビームの等化またはMIMO処理を実行するステップとを含むことも

10

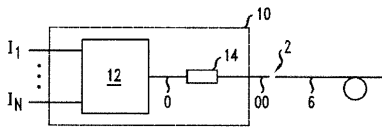
【0073】

いくつかの実施形態では、上で説明された装置および方法は、マルチモード光ファイバ、たとえば、図1の光ファイバ6または図6の光ファイバ6₁の、事前に選択されたLPモード番号までのすべてのLPモードを励起することを含むことができる。

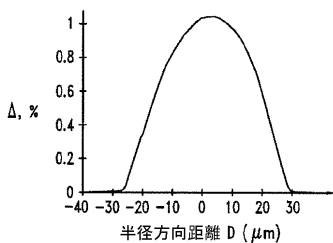
【0074】

本発明は、この説明、図面、および特許請求の範囲に鑑みて当業者に明白となる他の実施形態も含むことが意図されている。

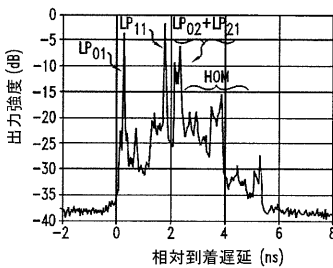
【図1】



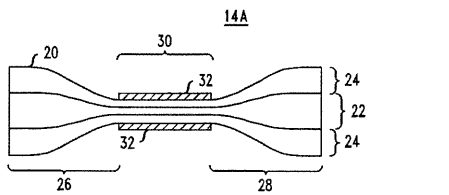
【図2】



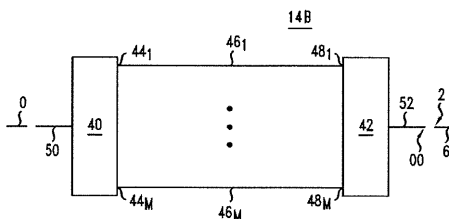
【図3】



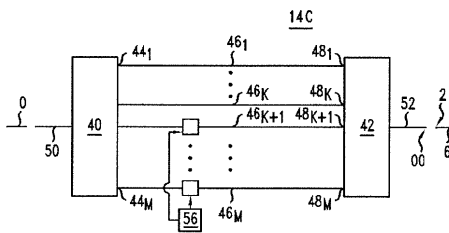
【図4A】



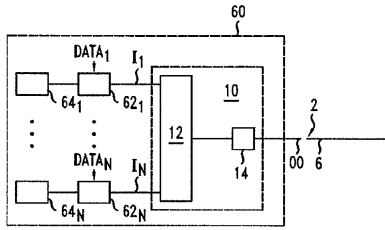
【図4B】



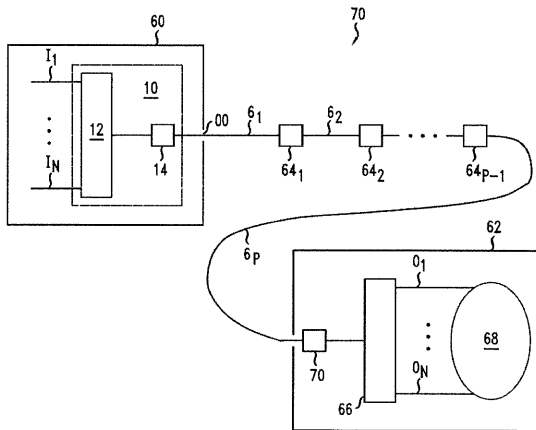
【図4C】



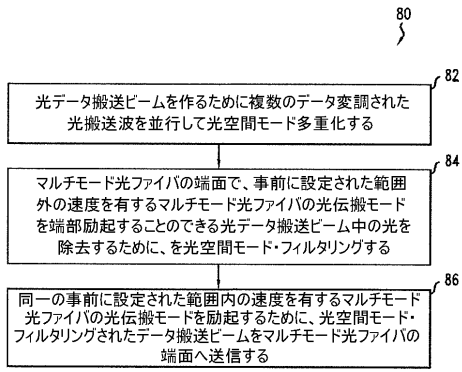
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 リフ, ローランド

アメリカ合衆国 07733-1661 ニュージャーシィ, ホルムデル, ホルムデル ロード
791

(72)発明者 フォンテーヌ, ニコラス

アメリカ合衆国 07733-1661 ニュージャーシィ, ホルムデル, ホルムデル ロード
791

審査官 鴨川 学

- (56)参考文献 特表2008-530904(JP, A)
特開2006-157811(JP, A)
国際公開第2013/144062(WO, A1)
国際公開第2013/134361(WO, A1)
国際公開第2012/150127(WO, A1)
米国特許出願公開第2013/0230319(US, A1)
特表2012-533915(JP, A)
特開2010-118856(JP, A)
特開2005-057705(JP, A)
米国特許出願公開第2010/0329670(US, A1)
米国特許出願公開第2010/0329671(US, A1)
特開2013-243682(JP, A)
特開2013-214852(JP, A)
特表2012-531812(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04J 14/04
G02B 6/00
G02B 6/02
H04B 10/2581