

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-81155

(P2010-81155A)

(43) 公開日 平成22年4月8日(2010.4.8)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H04J 14/00 (2006.01)	H04B 9/00 F	5K102
H04J 14/04 (2006.01)		
H04J 14/06 (2006.01)		

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 49 頁)

(21) 出願番号	特願2008-245380 (P2008-245380)	(71) 出願人	000000295
(22) 出願日	平成20年9月25日 (2008.9.25)		沖電気工業株式会社
			東京都港区西新橋三丁目16番11号
		(74) 代理人	100085419
			弁理士 大垣 孝
		(74) 代理人	100141955
			弁理士 岡田 宏之
		(72) 発明者	佐々木 健介
			東京都港区西新橋三丁目16番11号 沖
			電気工業株式会社内
		Fターム(参考)	5K102 AD14 PH41 PH46

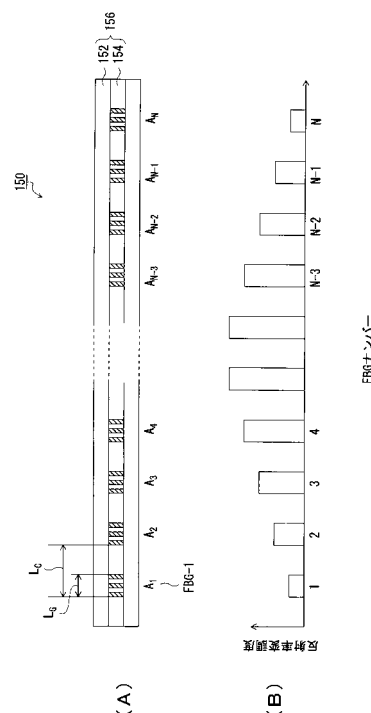
(54) 【発明の名称】 光パルス時間拡散装置及び光多重伝送システム

(57) 【要約】

【目的】自己相関波のピーク強度が相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れる。

【解決手段】第1から第s光パルス時間拡散器(sはs Nを満たす整数)は、入出力端からN個の単位FBGが第1から第N単位FBGの順で並べて配置されており、各単位FBGの反射率は両端に配置された単位FBGから中央に配置されている単位FBGに向かって徐々に大きくなり、中央に配置されている単位FBGの反射率が最も大きくなるように設定されている。チップパルス列を構成する第1のチップパルスには0、第2のチップパルスには $d_1 (= 2\pi \{a + (n-1)/N\})$、第Nチップパルスには $(N-1)d_1$ にそれぞれ等しい相対位相が与えられる。ここで、パラメータaは $0 < a < 1$ を満たす任意の実数である。

【選択図】図5



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列（Nは3以上の整数である。）として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器（sはs Nを満たす整数である。）を具え、

第n光パルス時間拡散器（nは1～sの全ての整数である。）のそれぞれは、第1～第N位相制御手段を具え、

該第1～第N位相制御手段は、

（a1）時間軸上で第1～第Nチップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第Nチップパルスをそれぞれ生成し、かつ

10

（b1）前記第1～第Nチップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える（aは0 a<1を満たす任意の実数である。）関係で配置されており、

（c1）Nが奇数の値であるとき、前記第1位相制御手段～第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ前記第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 位相制御手段～前記第N位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、又は

（d1）Nが偶数の値であるとき、前記第1位相制御手段～第 $(N/2)$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(N/2)+1\}$ 位相制御手段～前記第N位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、前記第 $(N/2)$ 位相制御手段の反射率と前記第 $\{(N/2)+1\}$ 位相制御手段の反射率とが互いに等しく設定されていることを特徴とする光パルス時間拡散装置。

20

【請求項 2】

それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列（Nは3以上の整数である。）として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器（sはs Nを満たす整数である。）を具え、

第n光パルス時間拡散器（nは1～sの全ての整数である。）のそれぞれは、光導波路に形成された第1～第N単位回折格子を具え、

該第1～第N単位回折格子は、

30

（a1）時間軸上で第1～第Nチップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第Nチップパルスをそれぞれ生成し、かつ

（b1）前記第1～第Nチップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える（aは0 a<1を満たす任意の実数である。）関係で、前記光導波路の方向に沿って直列に前記第1～第N単位回折格子の順に配置されており、

（c1）Nが奇数の値であるとき、前記第1単位回折格子～第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 単位回折格子の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ前記第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 単位回折格子～前記第N単位回折格子の順に反射率が単調減少するように設定されており、又は

（d1）Nが偶数の値であるとき、前記第1単位回折格子～第 $(N/2)$ 単位回折格子の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(N/2)+1\}$ 単位回折格子～前記第N単位回折格子の順に反射率が単調減少するように設定されており、前記第 $(N/2)$ 単位回折格子の反射率と前記第 $\{(N/2)+1\}$ 単位回折格子の反射率とが互いに等しく設定されていることを特徴とする光パルス時間拡散装置。

40

【請求項 3】

それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第(jN)チップパルスから成るチップパルス列（Nは3以上の整数であり、及びjは2以上の整数である。）として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器（sはs Nを満たす整数である。）を具え、

第nパルス時間拡散器（nは1～sの全ての整数である。）のそれぞれは、第1～第(jN)位相制御手段を具え、

50

該第1～第(jN)位相制御手段は、

(a2) 時間軸上で第1～第(jN)チップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第(jN)チップパルスをそれぞれ生成し、かつ

(b2) 前記第1～第(jN)チップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える(aは $0 \leq a < 1$ を満たす任意の実数である。)関係で配置されており、

(c2) jNが奇数の値であるとき、前記第1位相制御手段～第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ前記第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 位相制御手段～前記第jN位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、又は

(d2) jNが偶数の値であるとき、前記第1位相制御手段～第(jN/2)位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(jN/2)+1\}$ 位相制御手段～前記第jN位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、前記第(jN/2)位相制御手段の反射率と前記第 $\{(jN/2)+1\}$ 位相制御手段の反射率とが互いに等しく設定されていることを特徴とする光パルス時間拡散装置。

【請求項4】

それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第(jN)チップパルスから成るチップパルス列(Nは3以上の整数であり、及びjは2以上の整数である。)として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器(sは $s \leq N$ を満たす整数である。)を具え、

第n光パルス時間拡散器(nは1～sの全ての整数である。)のそれぞれは、光導波路に形成された第1～第(jN)単位回折格子を具え、

該第1～第(jN)単位回折格子は、

(a2) 時間軸上で第1～第(jN)チップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第(jN)チップパルスをそれぞれ生成し、かつ

(b2) 前記第1～第(jN)チップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える(aは $0 \leq a < 1$ を満たす任意の実数である。)関係で前記光導波路の方向に沿って直列に前記第1～第(jN)単位回折格子の順に配置されており、

(c2) jNが奇数の値であるとき、前記第1単位回折格子～第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 単位回折格子の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ前記第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 単位回折格子～前記第(jN)単位回折格子の順に反射率が単調減少するように設定されており、又は

(d2) jNが偶数の値であるとき、前記第1単位回折格子～第(jN/2)単位回折格子の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(jN/2)+1\}$ 単位回折格子～前記第(jN)単位回折格子の順に反射率が単調減少するように設定されており、前記第(jN/2)単位回折格子の反射率と前記第 $\{(jN/2)+1\}$ 単位回折格子の反射率とが互いに等しく設定されていることを特徴とする光パルス時間拡散装置。

【請求項5】

前記光導波路が、光ファイバーであることを特徴とする請求項2または4に記載の光パルス時間拡散装置。

【請求項6】

送信側装置に符号器を具え、受信側装置に復号器を具え、

前記符号器及び前記復号器は、請求項1～5のいずれか一項に記載の光パルス時間拡散装置であり、

第1～第nチャンネルが、それぞれ前記第1～第n光パルス時間拡散器に対応付けられており、

前記送信側装置において、前記符号器によって前記第1～第nチャンネルの光パルス信号を符号化して符号化光パルス信号を生成し、前記第1～第nチャンネルの前記符号化光パルス信号を多重して多重光パルス信号を生成し、

前記受信側装置において、前記復号器によって前記多重光パルス信号をチャンネルごとに復号化して前記第1～第nチャンネルのそれぞれの光パルス信号を再生することを特徴とする光多重伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、光多重伝送に利用される光パルス時間拡散装置、特に、周期的屈折率分布構造体である単位回折格子が、光ファイバーの導波方向に沿って複数配置されて構成されるSSFBG (Superstructured Fiber Bragg Grating) を利用する光パルス時間拡散装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、インターネットの普及等により通信需要が急速に増大しており、それに対応して光ファイバーを用いた高速で大容量のネットワークが整備されつつある。そして、通信の大容量化のために、一本の光ファイバー伝送路に複数チャンネル分の光パルス信号をまとめて伝送する光多重技術が重要視されている。

【0003】

光多重技術としては、光時分割多重 (OTDM: Optical Time Division Multiplexing)、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 及び光符号分割多重 (OCDM: Optical Code Division Multiplexing) が盛んに研究されている。

【0004】

この中にあって、OCDMは、送受信される光パルス信号の、1ビットあたりに割り当てられる時間軸上の制限がないという運用面における柔軟性を有している。また、時間軸上で同一の時間スロットに複数のチャンネルを設定でき、あるいは波長軸上においても同一の波長に複数の通信チャンネルを設定できるという特長を有している。

【0005】

以後の説明において、光パルス信号とは、2値デジタル信号を反映した光パルス列を意味するものとする。すなわち、規則正しい一定の間隔 (ビットレートに相当する周波数の逆数に相当する時間間隔) で光パルスが時間軸上に並ぶ光パルス列であって、この光パルス列を構成する光パルスの存在及び非存在に対応させて2値デジタル信号を反映させた光パルス列を光パルス信号というものとする。

【0006】

OCDMとは、チャンネルごとに異なる符号 (パターン) を割り当て、パターンマッチングにより信号を抽出する通信方法である (例えば、非特許文献1参照)。すなわち、OCDMは、送信側では通信チャンネルごとに異なる符号で光パルス信号を符号化し、かつ受信側では送信側と同じ符号を用いて復号化して元の光パルス信号に戻す光多重技術である。

【0007】

OCDMによれば、復号時には符号化されたときの符号と合致する光パルス信号のみが有効な信号として抽出されて処理されるため、同じ波長あるいは複数の波長が組み合わせられた光からなる光パルス信号を、複数の通信チャンネルに割り当てることが可能となる。また、OCDMによれば、受信側において復号化するために符号化に用いた符号と同一の符号を用いる必要があるため、この符号が知られない限り復号化されない。このため、OCDMは、情報の安全確保にも優れた伝送方法である。

【0008】

また、OCDMによれば、同一の波長で同一時刻に複数のチャンネルを多重する事が可能であり、OTDMやWDMに比べて通信容量が飛躍的に向上できることから、大容量のデータ通信が行える点で注目されている。

【0009】

光パルス信号を符号化、あるいは復号化するための手段には、SSFBGやアレイ導波路グレーティング (AWG: Array Waveguide Grating) 等の電力を消費しない受動光素子を用いることが可能である。受動光素子を利用する通信装置によれば、この受動光素子が電氣的な処理速度制限を受けずに動作可能であるので、通信レート的高速化への対応が容易である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 0 】

具体的なOCDM通信として、2値位相符号が利用されたOCDM通信方法が知られている（例えば、非特許文献2参照）。また、最近では多値位相を符号とする多値位相符号が利用されたOCDM通信が研究されている（例えば、非特許文献3及び4参照）。

【 0 0 1 1 】

以後、2値位相符号あるいは多値位相符号を、単に位相符号ということもある。位相符号が利用されたOCDM通信方法とは、次のようなステップを経て行われる通信方法である。まず、送信側で、多波長連続波光源の出力を光パルス列に変換し、この光パルス列を基にして、2値デジタル信号である送信信号をRZ（return to zero）フォーマットの光パルス信号に変換して送信すべき光パルス信号を生成する。以後、RZフォーマットの光パルス信号を、単に光パルス信号ということもある。

10

【 0 0 1 2 】

送信側では、送信すべき光パルス信号に対して符号器による符号化を行って符号化光パルス信号に変換して送信する。一方、受信側では、符号化光パルス信号を受信して、上述の符号器に設定されている符号と同一の符号が設定されている復号器によってこの符号化光パルス信号を復号化して、送信された光パルス信号を再生する。

【 0 0 1 3 】

位相符号が利用されたOCDM通信方法においては、光パルス信号が、符号器によって、この符号器に設定されている一定の規則に従って、時間軸上に拡散されることによって符号化光パルス信号に変換される。この場合、一定の規則は符号によって規定されている。以後、光パルス信号が時間軸上に拡散されて生成される符号化光パルス信号を構成する光パルスを、チップパルスということもある。すなわち、符号器は、光パルス信号を構成する光パルスの一つ一つが符号器によって時間軸上にチップパルスの列として拡散する機能を果たす。

20

【 0 0 1 4 】

一方、符号化光パルス信号は、復号器によって元の光パルス信号に復号化される。すなわち、復号器によって、符号化光パルス信号を構成するチップパルスの列から、元の光パルス信号を構成する光パルスの一つ一つが再生されることによって、元の光パルス信号が復号化される。ここで、送信側で、多波長連続波光源を利用して送信すべき光パルス信号が生成された場合、チップパルスは、単一波長の光パルスであるが、光パルス信号を構成する個々の光パルスは、複数の波長の光を含む光パルスとなる。

30

【 0 0 1 5 】

SSFBGを用いた符号器及び復号器の関係は、SSFBGに設定されている符号が同一であるが、SSFBGの入出力端が逆の関係となる。すなわち、SSFBGの両端をそれぞれA、Bとしたとき、符号器に設置されるSSFBGの入力側が端Aであり、出力側が端Bとなるように設定されている場合、復号器に設置されるSSFBGの入力側は端Bであり、出力側が端Aとなるように設定される。従って、符号器に設置されるSSFBGの端Aには光パルス信号が入力され、端Bから符号化光パルス信号が出力される。また、復号器に設置されるSSFBGの端Bには符号化光パルス信号が入力され、端Aから復号化された光パルス信号が出力される。

【 0 0 1 6 】

40

上述したように、SSFBGを用いた符号器と復号器とは、入力端と出力端が互いに逆の関係になっているだけであり、それぞれは素子として同一のものである。そこで、以後の説明においては、符号器及び復号器のいずれをも指す場合には、光パルス時間拡散器ということもある。

【 0 0 1 7 】

ファイバブラッググレーティング（FBG：Fiber Bragg Grating）とは、コアに周期的な屈折率変調を施したブラッグ回折格子が形成されている光ファイバーであり、設定された周期に応じた特定の波長の光を反射するフィルタの機能を有する（例えば、非特許文献5参照）。FBGは、光ファイバーのコアの屈折率が周期的に変調されているだけであり、幾何学的形状は、ODDMによる光通信の光伝送路に使われる光ファイバーと同一のものである

50

。従って、FBGを光通信装置の構成要素として利用すれば、これらと光伝送路との接続は、光ファイバー同士の接続となる。そして、光ファイバー同士の接続は、PLC (Planer Lightwave Circuit) 等の光ファイバー以外の光導波路と光ファイバーとを接続する場合に比べて、格段に容易である。

【 0 0 1 8 】

光パルス時間拡散器は、周期が一定であって、一定の長さを有する単位FBGを、複数の光ファイバーのコアの長さ方向に沿って直列に配置することによって形成されたSSFBGを用いて構成される。単位FBGとは、途中に屈折率変調周期の変動あるいは位相の跳躍する部分が存在しない、一続きのFBGの部分と言う。

【 0 0 1 9 】

符号器あるいは復号器に利用されるSSFBGは、隣接して配置される単位FBG間に位相シフト部が設けられている。この位相シフト部に設定する位相シフト量は、符号器あるいは復号器に設定される符号によって確定される。例えば、位相シフト部は、単位FBGが t 個配置されたSSFBGにあっては $(t-1)$ 個所に設けられることになり、この $(t-1)$ 個所のそれぞれに設定される位相シフト量によって、SSFBGに設定される符号が確定する。

【 0 0 2 0 】

符号器及び復号器には、上述のSSFBG以外にも、トランスバーサル型フィルタ構造のPLCを利用することもできる（例えば、非特許文献5を参照）。また、AWGを利用することもできる（例えば、非特許文献6を参照）。PLCあるいはAWGを利用した符号器及び復号器は、それらに設定可能である符号に制限がないという特長がある。しかしながらその一方で、SSFBGを利用する場合と比較して、光損失量が大きく、素子の小型化が難しいという難点がある。

【 0 0 2 1 】

図1、図2(A)及び(B)を参照して、SSFBGによる符号化及び復号化の原理を説明する。図1は、同一の符号が設定されたSSFBGを利用した符号器及び復号器の動作原理の説明に供する図である。すなわち、図1は、送信側で符号化が行なわれ受信側で復号化が行われる様子を示している。以後、SSFBGを利用した符号器をSSFBG符号器といい、SSFBGを利用した復号器をSSFBG復号器ということもある。

【 0 0 2 2 】

図1において、符号器及び復号器を構成するSSFBGについて、単位FBGだけを横縞を含む矩形で概略的に示してある。そして、それぞれの単位FBGに設定される相対位相を、それぞれの単位FBGの横に数値で示してある。

【 0 0 2 3 】

ここで、SSFBGを構成する単位FBGの内の任意の単位FBG（基準単位FBGという。）からのブラッグ反射光の位相を0と定義し、基準単位FBGからのブラッグ反射光の位相と他のFBGからの位相差を、このFBGの位相として表現する場合、この単位FBGからのブラッグ反射光の位相を相対位相と呼ぶこととする。このように定義すると、SSFBGを構成する各単位FBGからのブラッグ反射光の位相が、基準単位FBGからの位相差として全て確定する。この発明の光パルス時間拡散器を形成するSSFBGの動作を説明する上では、SSFBGを構成する各単位FBGからのブラッグ反射光の位相は、それぞれ相互の単位FBGからのブラッグ反射光の位相差のみが必要となる。

【 0 0 2 4 】

図1において、単位FBGの横に示してある相対位相の内0と示す単位FBGからのブラッグ反射光の位相は全て互いに等しい。また、これらの数値のうち0.5と示す単位FBGからのブラッグ反射光の位相も全て互いに等しい。そして、0と示す単位FBGからのブラッグ反射光の位相と0.5と示す単位FBGからのブラッグ反射光の位相との位相差は半波長分（光パルスの波長を λ として 0.5λ ）ずれている。角度位相に換算して $(2\pi \times 0.5)$ ずれている。すなわち、符号化及び復号化される光パルスの波長を λ とすると、0と示す単位FBGからのブラッグ反射光の相対位相と0.5と示す単位FBGからのブラッグ反射光の相対位相との位相差は 0.5λ に等しい。相対位相を具体的数値で示す場合、例えば、0と示す単位FBGからのブラ

10

20

30

40

50

ッグ反射光の相対位相を0と表現し、0.5と示す単位FBGからのブラッグ反射光の相対位相を0.5であると表現し、 λ あるいは 2π の定数部分を省略する。

【0025】

基準単位FBGは、SSFBGを構成する単位FBGの内から、SSFBGの両端の何れか一方に配置される単位FBGをとるのが説明上便利である。そこで、以後の説明では、基準単位FBGは、SSFBGの入出力端に配置された単位FBGあるいは、入出力端の反対側の端に配置された単位FBGの何れかとするものとし、特にどの単位FBGを基準単位FBGとしたかについては断らないものとする。SSFBGの両端に配置されている単位FBGのブラッグ反射光の相対位相として0と表記されている、SSFBGの入出力端あるいは入出力端の反対側の端に配置された単位FBGが、基準単位FBGとして選定されているものと了解されたい。

10

【0026】

ここで、ブラッグ反射光の位相について、更に具体的に説明する。光パルスの時間波形として観測される形状は、光パルスを形成している光搬送波の包絡線の時間波形を意味している。従って、ここでいうブラッグ反射光の位相とは、単位FBGからブラッグ反射された光パルスを形成している光搬送波の位相を意味する。

【0027】

符号器を構成する、 t 個の単位FBGを有するSSFBGに入力された光パルスは、 t 個の光パルスとして時間軸上に拡散（以後、時間拡散ということもある）されて出力される。すなわち、このSSFBGに入力された光パルスは符号化されて出力される。符号器に入力された光パルスが、時間拡散されて生成されたこの t 個の光パルスを、チップパルスということもある。

20

【0028】

チップパルスの時間軸上でのピーク位置は、各チップパルスを生成した単位FBGのSSFBGにおける設置位置によって決まる。また、各チップパルスを形成している光搬送波の位相は、各単位FBGを構成している屈折率周期構造のSSFBGにおける相対位置によって決まる。

【0029】

図1に示すように、入力光パルスが光サーキュレータ12を介して符号器のSSFBG 10に入力されて時間拡散されて、再び光サーキュレータ12を介して、チップパルス列として出力される。図1に示す符号器のSSFBG 10は、光ファイバーの導波方向に沿って7つの単位FBGが配列されて構成されたSSFBGである。従って、符号器のSSFBGから出力される、時間軸上に並ぶチップパルスの数は7個となる。

30

【0030】

ここでは、一例として、PNパターン（擬似乱数（PN: pseudo-random number）パターン）のM系列の7ビットの2値符号（0, 0, 1, 0, 1, 1, 1）が符号器のSSFBG 10に設定されている場合を例に取り説明する。ここで、符号を与える「0」及び「1」からなる数列の項数を符号長ということもある。この例では、符号長が7である。また、符号を与える数列を符号列といい、符号列の各項「0」及び「1」をチップということもある。そして、0及び1の値そのものを符号値ということもある。

【0031】

符号器のSSFBG 10を構成する単位FBG 10a、10b、10c、10d、10e、10f及び10gは、それぞれ、上述の光位相符号の第1番目のチップ「0」、第2番目のチップ「0」、第3番目のチップ「1」、第4番目のチップ「0」、第5番目のチップ「1」、第6番目のチップ「1」及び第7番目のチップ「1」と、それぞれ対応する。符号値が0であるか1であるかを決定するのは、それぞれの単位FBGに設定されている相対位相である。

40

【0032】

符号器のSSFBG 10に光パルスを入力すると、単位FBG 10a、10b、10c、10d、10e、10f及び10gから、それぞれブラッグ反射光a、b、c、d、e、f及びgが生成されて、出力される。ブラッグ反射光a、b、及びdと、ブラッグ反射光c、e、f及びgとのそれぞれの相対位相は0及び0.5となる。以後、このような相対位相のブラッグ反射光からなるチップパルスの集合を、各チップパルスの出現順序も含めて、その相対位相値の数列、（0, 0, 0.5, 0, 0,

50

5, 0.5, 0.5) によって表現することもある。ここでは、符号値が0であるチップに対しては、相対位相が0であるチップパルスに対応させ、符号値が1であるチップに対しては、相対位相が0.5である光パルスに対応させている。

【0033】

すなわち、光サーキュレータ12の側から、第1番目のチップと第2番目のチップとは等しい符号値0をとっているので、第1番目のチップに対応する単位FBG 10aから反射されるブラッグ反射光の位相と、第2番目のチップに対応する単位FBG 10bから反射されるブラッグ反射光の位相とは等しい。また、第2番目のチップの符号値は0であり第3番目のチップの符号値は1であるから、両者は互いに異なる。したがって、第2番目のチップに対応する単位FBG 10bから反射されるブラッグ反射光の位相と、第3番目のチップに対応する単位FBG 10cから反射されるブラッグ反射光の位相との差が π となっている。

10

【0034】

同様に第3番目のチップの符号値は1であり第4番目のチップの符号値は0であるから、両者は互いに異なる値をとっている。したがって、第3番目のチップに対応する単位FBG 10cから反射されるブラッグ反射光の位相と、第4番目のチップに対応する単位FBG 10dから反射されるブラッグ反射光の位相との差が π となっている。

【0035】

第5番目以降のチップについても同様であるので、その説明を省略する。

【0036】

次に、光パルスが符号器で符号化されてチップパルス列に変換され、そのチップパルス列が復号器で復号化されて自己相関波が形成される過程を説明する。図1に示す単一の光パルスが光サーキュレータ12を介して符号器のSSFBG 10に入力されると、単位FBG 10a、10b、10c、10d、10e、10f及び10gからのブラッグ反射光が生成される。そこで、単位FBG 10a、10b、10c、10d、10e、10f及び10gからのブラッグ反射光をそれぞれa、b、c、d、e、f及びgとする。すなわち、図1に示す単一の光パルスが、ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f及びgに時間拡散されてチップパルス列に変換される。

20

【0037】

ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f及びgは、時間軸に対して表すと、図1の送信側と受信側とをつなぐ光ファイバー伝送路18の上側に示すように、7つの光パルスに時間拡散されて、時間軸上で単位FBG 10a、10b、10c、10d、10e、10f及び10gの配列の仕方に依存する特定の間隔で配列された光パルス列を構成する。したがって、チップパルス列とは、符号器に入力された光パルスが時間軸上に複数の光パルスとして時間拡散された光パルス列である。この時間軸上に時間拡散されて配列された個々の光パルスがそれぞれチップパルスに対応する。

30

【0038】

チップパルス列を構成するこれらのブラッグ反射光a、b、c、d、e、f及びgの位相の関係（相対位相）は、(0, 0, 0.5, 0, 0.5, 0.5, 0.5)である。ブラッグ反射光aの位相とブラッグ反射光bの位相とは等しい。ブラッグ反射光bの位相とブラッグ反射光cの位相との差が π となっている。ブラッグ反射光cの位相とブラッグ反射光dの位相との差が π となっている。以下、ブラッグ反射光e、f、gについても同様である。すなわち、ブラッグ反射光aの位相を基準にすると、ブラッグ反射光a、ブラッグ反射光b及びブラッグ反射光dの位相は等しく、これらに対してブラッグ反射光c、e、f、gの位相は π 異なっている。

40

【0039】

光サーキュレータ12から出力されるチップパルス列は、光ファイバー伝送路18を伝播して、光サーキュレータ14を介して復号器のSSFBG 16に入力される。復号器のSSFBG 16は符号器のSSFBG 10と同一の構造であるが、入出力端（光サーキュレータに近い側）の位置が逆になっている。すなわち、復号器のSSFBG 16の入出力端から順に単位FBG 16a、16b、16c、16d、16e、16f及び16gと並んでいるが、単位FBG 16aと単位FBG 10gとが対応する。また、同様に単位FBG 16b、単位FBG 16c、単位FBG 16d、単位FBG 16e、単位FBG 16f、及び単位FBG 16gは、単位FBG 10f、単位FBG 10e、単位FBG 10d、単位FBG 10c、単位FBG 10b及

50

び単位FBG 10aとそれぞれ対応する。

【 0 0 4 0 】

図2(A)及び(B)を参照して、符号器のSSFBG 10から出力されるチップパルス列が、復号器のSSFBG 16に入力されて自己相関波として生成されて出力される過程を説明する。図2(A)及び(B)は、チップパルス列から自己相関波が生成される過程の説明に供する図である。

【 0 0 4 1 】

図2(A)は、単位FBG 16a、16b、16c、16d、16e、16f及び16gからそれぞれブラッグ反射されて生成されるチップパルス a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 e' 、 f' 、 g' の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1~13を付して時刻の前後関係を表示しており、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

10

【 0 0 4 2 】

チップパルス列は復号器のSSFBG 16に入力されると、まず単位FBG 16aでブラッグ反射される。単位FBG 16aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光 a' と表すこととする。同様に単位FBG 16b、単位FBG 16c、単位FBG 16d、単位FBG 16e、単位FBG 16f、及び単位FBG 16gでブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光 b' 、 c' 、 d' 、 e' 、 f' 及び g' と表すこととする。

【 0 0 4 3 】

チップパルス列を構成するチップパルス a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 及び g が、単位FBG 16aによって、ブラッグ反射されて、図2(A)において a' と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 16aによってブラッグ反射されたチップパルス a は、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 16aによってブラッグ反射されたチップパルス b は、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。同様に、単位FBG 16aによってブラッグ反射されたチップパルス c 、 d 、 e 、 f 及び g は、それぞれ時間軸上で3、4、5、6、及び7と示してある位置にピークをもつ光パルスである。

20

【 0 0 4 4 】

単位FBG 16bによっても、チップパルス列を構成するチップパルス a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 及び g がブラッグ反射されて、図2(A)において b' と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 16bから反射されるブラッグ反射光 b' は、ブラッグ反射光 a' と同位相である。したがって、 a' と示した時間軸上に並ぶ光パルスの列と、 b' と示した時間軸上に並ぶ光パルスの列とは、両光パルス列の相互の位相関係は同一である。

30

【 0 0 4 5 】

同様に、単位FBG 16c及び単位FBG 16eによっても、チップパルス列を構成するチップパルスがブラッグ反射されて、図2(A)においてそれぞれ c' 及び e' と示した時間軸上に光パルスが並ぶ。単位FBG 16c及び単位FBG 16eから反射されるブラッグ反射光 c' 及び e' は、ブラッグ反射光 a' と比較すると、相互の位相関係は同一である。したがって、図2(A)において、 c' と示した光パルス列と e' と示した光パルス列として時間軸上に並ぶ。ブラッグ反射光 a' 、 b' 、 c' 及び e' に関連した光パルスは、時間軸上で平行にずれているが、それぞれのブラッグ反射光に関連する光パルスの相互の位相関係は同一である。

40

【 0 0 4 6 】

一方、単位FBG 16d、単位FBG 16f及び単位FBG 16gから反射されるブラッグ反射光は、単位FBG 16a、単位FBG 16b、単位FBG 16c及び単位FBG 16eから反射されるブラッグ反射光との位相差が π である。したがって、チップパルス列 a' 、 b' 、 c' 及び e' を構成するチップパルスの相対位相が(0.5, 0.5, 0, 0.5, 0, 0, 0)であるのに対してチップパルス列 d' 、 f' 及び g' を構成するチップパルスの相対位相が(0, 0, 0.5, 0, 0.5, 0.5, 0.5)となっている。ここで、チップパルス列を構成するチップパルスの相対位相を示す数列は、図2(A)に示す時間軸に対して右から左に向けて並ぶチップパルスの相対位相を順次並べて表記したものである。

【 0 0 4 7 】

図2(B)は復号器のSSFBG 16で復号化された入力光パルスの自己相関波を示している。横

50

軸は時間軸であり、図2(A)に示した図と時間軸を合わせてある。自己相関波は、復号器の各单位FBGからのブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'で与えられるので、図2(A)に示した、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'を全て足し合わせたものとなっている。図2(B)の時間軸上で7と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'に関連する光パルスが全て同位相で足しあわされるので、最大のピークを構成する。また、図2(B)の時間軸上で7と表示してある時刻以外の時刻では、チップパルスが7つ重なることはなく、しかも、必ずしも同一の相対位相のチップパルス同士が重なっているとは限らない。

【0048】

そのため、図2(B)の時間軸上で7と表示してある時刻以外の時刻では、7と表示してある時刻に形成される光パルス以上の大きさの光パルスが生成されることはない。すなわち、以上説明したように、光パルスが符号器のSSFBG 10で時間拡散されてチップパルスの列となり、このチップパルスの列が復号器のSSFBG 16に入力されることによって、自己相関波が生成される。ここで取り上げた例では7ビット(符号長7)の光位相符号(0, 0, 1, 0, 1, 1, 1)を用いたが、光位相符号がこれ以外の場合であっても上述した説明は同様に成り立つ。

【0049】

図2(B)に示す自己相関波は、次のようなメカニズムで生成されたものと解釈することができる。時間軸上で1と示す位置に形成されるピーク波形は、単位FBG 16aから反射された、チップパルスaに対するブラッグ反射光a'によって形成されたものである。従って、時間軸上で1と示す位置に形成されるピーク波形の振幅は、チップパルスの振幅に等しい。

【0050】

時間軸上で2と示す位置に形成されるピーク波形は、単位FBG 16aから反射された、チップパルスbに対するブラッグ反射光b'と、単位FBG 16bから反射された、チップパルスaに対するブラッグ反射光a'との和として形成されたものである。これら両者の和は、相対位相がどちらも0.5であるチップパルス同士の和であるから、その振幅がチップパルスの振幅の2倍となる。

【0051】

以下、時間軸上で3~13と示す位置に形成されるピーク波形の振幅は、上記と同一のメカニズムで生成されたピーク波形であり、それぞれチップパルスの振幅の、1倍、0倍、1倍、0倍、7倍、0倍、1倍、0倍、1倍、2倍、1倍となっている。図2(B)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。これらのピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1~13と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+1+0+1+0+7+0+1+0+1+2+1=17$ となる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して289倍(=17²倍)となる。すなわち、自己相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの289倍である。

【0052】

また、自己相関波のピーク(パルスの尖塔値)の振幅は、チップパルス1つ分の7倍であるから、エネルギーに換算すると49倍となる。

【0053】

以上の説明では、符号器と復号器とに設定された符号が同一である場合について説明した。すなわち、符号器によってチップパルス列として時間拡散された後、このチップパルス列が復号器に入力されて、自己相関波として生成されて出力される場合を説明した。次に、図3及び図4(A)及び(B)を参照して、符号器と復号器に設定された符号が異なる場合について説明する。

【0054】

図3は、相異なる符号が設定されたSSFBGをそれぞれ符号器及び復号器として利用した場合の、符号器及び復号器の動作原理の説明に供する図である。図1と異なる点は、送信側に設置されている符号器の役割を果たすSSFBGに設定されている符号と、受信側に設置さ

10

20

30

40

50

れている復号器の役割を果たすSSFBGに設定されている符号とが互いに異なっている点である。その他の点では、図1と図3とでは同一である。

【 0 0 5 5 】

送信信号を構成する光パルスが、光サーキュレータ22を介して符号器のSSFBG 20に入力される。符号器のSSFBG 20は、入出力端（光サーキュレータ22に近い側）から順に、単位FBG 20a、単位FBG 20b、単位FBG 20c、単位FBG 20d、単位FBG 20e、単位FBG 20f及び単位FBG 20gが配置されている。それぞれの単位FBGから反射されるブラッグ反射光a、b、c、d、e、f及びgの相対位相は、(0.5, 0.5, 0, 0, 0, 0.5, 0.5)である。これらの各ブラッグ反射光は、それぞれチップパルスとなる。

【 0 0 5 6 】

光サーキュレータ22から出力されるチップパルス列は、図3で光サーキュレータ22と光サーキュレータ24との間の光ファイバー伝送路28の上側に示すように、a、b、c、d、e、f及びgで示すチップパルスの列となる。各チップパルスは、aで示すチップパルスからgで示すチップパルスまで順に光サーキュレータ22から出力され、それらの相対位相は、順に(0.5, 0.5, 0, 0, 0, 0.5, 0.5)である。

【 0 0 5 7 】

光サーキュレータ22から出力されるチップパルス列は、光ファイバー伝送路28を伝播し、光サーキュレータ24を介して復号器のSSFBG 26に入力される。復号器のSSFBG 26は、入出力端（光サーキュレータ24に近い側）から順に、単位FBG 26a、単位FBG 26b、単位FBG 26c、単位FBG 26d、単位FBG 26e、単位FBG 26f及び単位FBG 26gが配置されている。それぞれの単位FBGのから反射されるブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'の相対位相は、(0.5, 0.5, 0.5, 0, 0.5, 0, 0)である。すなわち、符号器のSSFBG 20に設定されている符号と、復号器のSSFBG 26に設定されている符号とは異なっている。

【 0 0 5 8 】

図4(A)及び(B)を参照して、符号器のSSFBG 20から出力されるチップパルス列が、復号器のSSFBG 26に入力されて相互相関波として生成されて出力される過程を説明する。図4(A)及び(B)は、チップパルス列から相互相関波が生成される過程の説明に供する図である。

【 0 0 5 9 】

図4(A)は、単位FBG 26a、単位FBG 26b、単位FBG 26c、単位FBG 26d、単位FBG 26e、単位FBG 26f及び単位FBG 26gからそれぞれブラッグ反射されるチップパルスa'、b'、c'、d'、e'、f'、g'の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1~13を付して時刻の前後関係を表示してあり、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

【 0 0 6 0 】

チップパルス列は復号器のSSFBG 26に入力されると、まず単位FBG 26aでブラッグ反射される。単位FBG 26aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光a'と表すこととする。同様に単位FBG 26b、単位FBG 26c、単位FBG 26d、単位FBG 26e、単位FBG 26f及び単位FBG 26gでブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光b'、c'、d'、e'、f'及びg'と表すこととする。

【 0 0 6 1 】

単位FBG 26aからは、チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c、d、e、f及びgがブラッグ反射されて、図4(A)においてa'と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 26aからブラッグ反射されたチップパルスaは、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 26aからブラッグ反射されたチップパルスbは、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。同様に、光パルスc、d、e、f及びgは、それぞれ時間軸上で3、4、5、6、及び7と示してある位置にピークをもつ光パルスである。

【 0 0 6 2 】

単位FBG 26bからも、チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c、d、e、f及びgがブラッグ反射されて、図4(A)においてb'と示した時間軸上に並ぶ。図4(A)において、a'、

10

20

30

40

50

b'、c'、d'、e'、f'及びg'で示すそれぞれのチップパルスの列に並ぶチップパルスの相対位相は、図2(A)を参照して説明した原理に従い、図4(A)に示す、それぞれのチップパルスに記載された0及び0.5となっている。

【0063】

図4(B)は復号器のSSFBG 26で復号化された入力光パルスの相互相関波を示している。横軸は時間軸であり、図4(A)に示した図と時間軸を合わせてある。相互相関波は、復号器の各单位FBGからのブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'で与えられるので、図4(A)に示した、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'及びg'を全て足し合わせたものとなっている。すなわち、光パルスが符号器のSSFBG 20で時間拡散されてチップパルスの列となり、このチップパルスの列が復号器のSSFBG 26に入力されることによって、相互相関波が生成される。図4(B)に示す相互相関波が生成されるメカニズムは、図2(B)で示した自己相関波が生成されるメカニズムと同様である。

10

【0064】

図4(B)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。

【0065】

図4(B)に示す相互相関波のピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1～13と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+1+2+3+0+1+2+1+2+1+2+1=19$ となる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して361倍(=19²倍)となる。すなわち、相互相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの361倍である。また、相互相関波のピーク(パルスの尖塔値)の振幅は、高々チップパルス1つ分の3倍であるから、エネルギーに換算すると9倍に過ぎない。

20

【0066】

図4(B)に示す相互相関波を構成するピークの内、最大ピークの振幅の大きさは、チップパルスの振幅の3倍となっている。受信側において、自己相関波と相互相関波との識別は、自己相関波及び相互相関波を構成する、それぞれのピーク強度の比に基づいて行われる。図2(B)に示した自己相関波の最大ピークの振幅の大きさはチップパルスの振幅の7倍であり、図4(B)に示す相互相関波を構成するピークの内、最大ピークの振幅の大きさは、チップパルスの振幅の3倍となっていることから、両者のピーク強度比は7²対3²=49対9となる。

30

【0067】

上述したように、自己相関波の総エネルギーはチップパルス1つ分のエネルギーの289倍であり、相互相関波の総エネルギーも361倍と、両者はほとんど変わらない。一般に従来の符号化及び復号化においては、自己相関波の総エネルギーと相互相関波の総エネルギーとは同程度の大きさである。従って、OCDMにおいて多重するチャンネル数が増えると、自己相関波成分のエネルギーは相互相関波成分のエネルギーよりも小さくなる。例えば、多重するチャンネル数が2つである場合は、自己相関波成分及び相互相関波成分のそれぞれに分配されるエネルギー比(信号のS/N比に相当する。)は、ほぼ1対1であるが、多重するチャンネル数が4つである場合は、自己相関波成分及び相互相関波成分のそれぞれに分配されるエネルギー比は1対3となる。自己相関波として生成されるのは、多重された1チャンネル分に対してだけであるのに対して、相互相関波として生成されるのは、自己相関波として再生成される以外の3チャンネル分となるからである。

40

【0068】

すなわち、OCDMにおいて多重するチャンネル数が増えると、S/N比が小さくなるので、受信側では、自己相関波と相互相関波との識別のために、時間ゲート処理を行う、あるいは非線形光学デバイスを利用する等の、特別の手段を必要としていた(例えば、非特許文献7参照)。

【非特許文献1】外林秀之「光符号分割多重ネットワーク」応用物理，第71巻，第7号，(2002) pp.853-859.

【非特許文献2】西木玲彦、岩村英志、小林秀幸、沓澤聡子、大柴小枝子「SSFBGを用い

50

たOCDM用位相符号器の開発」信学技報：Technical Report of IEICE, OFT2002-66, (2002-11).

【非特許文献3】P.C.Teh, et al., "Demonstration of a Four-Channel WDM/OCDMA System Using 255-chip 320-Gchip/s Quarternary Phase Coding Gratings", IEEE Photonics Technology Letters, vol.14, No.2, February 2002.

【非特許文献4】Gabriella Cincotti, "Full Optical Encoders/Decoders for Photonic IP Routers", Journal of Lightwave Technology, vol.22, No. 2, pp. 337-342, February 2004.

【非特許文献5】Naoya Wada, et al., "A 10 Gb/s Optical Code Division Multiplexing Using 8-Chip Optical Bipolar Code and Coherent Detection", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 10, October 1999.

【非特許文献6】Jing Cao, et al., "Spectral Encoding and Decoding of Monolithic InP OCDMA Encoder", Paper We.3.6.6, vol.3, ECOC 2005.

【非特許文献7】Wei Cong, et al., "An Error-Free 100Gb/s Time Slotted SPECTS-CDMA Network Testbed", Paper Th.1.4.6, vol.3, ECOC 2005.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0069】

上述したように、従来のOCDMに代表される送信光パルス信号を符号等で時間拡散して多重化して送受信する光多重伝送システムにおいては、多重するチャンネル数の増大に伴いS/N比が小さくなることに対処するための特別の手段が必要とされていた。このため、従来の装置はそれだけ構成要素が多くなり、装置が複雑化するとともに高コストとなる。

【0070】

そこで、この発明は、多重するチャンネル数が増大しても、S/N比が小さくならない光多重伝送を可能とする、送信光パルス信号の時間拡散が行える光パルス時間拡散装置を提供することを目的とする。すなわち、この発明の目的は、従来の光パルス時間拡散装置に比べて、相互相関波成分に対する自己相関波成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れる、光パルス時間拡散が実現できる光パルス時間拡散装置を提供することにある。

【0071】

また、この光パルス時間拡散装置を利用して構築される光多重伝送システム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】

【0072】

この発明の発明者は、以下の構成の光パルス時間拡散装置によれば、従来の光パルス時間拡散装置に比べて、相互相関波成分に対する自己相関波成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れることを突き止めた。

【0073】

この発明の要旨によれば、以下の構成の光パルス時間拡散装置が提供される。

【0074】

なお、以後の説明においては、符号化及び復号化という呼称を、従来の慣習からより拡張して広い意味に使うこととする。すなわち、光パルス信号を構成する光パルスを時間軸上に拡散する規則を、通常の意味での符号（狭義の符号）に限定せず、一義的に確定する任意の規則（広義の符号）であっても、上述の符号化及び復号化という呼称を用いる。従って、広義の符号の場合に対しても、符号化光パルス信号、チップパルス等の用語を使うものとする。

【0075】

以下に説明するこの発明の第1及び第2の光パルス時間拡散装置を構成する光パルス時間拡散器から出力されるチップパルスの列は、通常の符号が設定された符号器から出力さ

れるチップパルスの列のように、厳密な意味での符号に基づいて光パルスが時間拡散されることによって生成されたものではない。しかしながら、便宜上、光パルスをチップパルスの列に変換することを符号化、チップパルスの列を自己相関波あるいは相互相関波として生成することを復号化ということもある。

【0076】

この発明の第1の光パルス時間拡散装置の構成は、それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列（Nは3以上の整数である。）として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器（sはs ≤ Nを満たす整数である。）を具えて構成される。

【0077】

第n光パルス時間拡散器（nは1～sの全ての整数である。）のそれぞれは、第1～第N位相制御手段を具えている。以後、nを、チャンネル識別パラメータということもある。

【0078】

第1～第N位相制御手段は、以下の条件（a1）～（d1）を満たすように形成されている。（a1）時間軸上で第1～第Nチップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第Nチップパルスをそれぞれ生成する。

（b1）第1～第Nチップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える関係で配置されている。ここで、aは $0 \leq a < 1$ を満たす任意の実数である。

（c1）Nが奇数の値であるときは、第1位相制御手段～第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 位相制御手段～第N位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定される。

（d1）また、Nが偶数の値であるときは、第1位相制御手段～第 $(N/2)$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(N/2)+1\}$ 位相制御手段～第N位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、第 $(N/2)$ 位相制御手段の反射率と第 $\{(N/2)+1\}$ 位相制御手段の反射率とが互いに等しく設定される。

【0079】

第1～第N位相制御手段は、光導波路の光が伝播する方向に沿って一列に配列された第1～第N単位回折格子とすることが良い。また、この光導波路を光ファイバーとするのが好適である。以後、単位回折格子を単位FBGと表記することもある。

【0080】

上述のように、第1～第N位相制御手段の反射率を設定することを、以後、位相制御手段をアポダイズするということがある。また、第1～第N単位FBGの反射率を設定することを、以後、単位FBGの反射率をアポダイズするということがある。

【0081】

この発明の第2の光パルス時間拡散装置の構成は、それぞれに入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第(jN)チップパルスから成るチップパルス列（Nは3以上の整数であり、及びjは2以上の整数である。）として、それぞれ出力する第1～第s光パルス時間拡散器（sはs ≤ Nを満たす整数である。）を具えて構成される。

【0082】

第n光パルス時間拡散器のそれぞれは、第1～第(jN)位相制御手段を具えている。

【0083】

第1～第(jN)位相制御手段は、以下の条件（a2）～（d2）を満たすように形成されている。

（a2）時間軸上で第1～第jNチップパルスの順に配列されてなるチップパルス列を生成する当該第1～第jNチップパルスをそれぞれ生成する。

（b2）第1～第jNチップパルスの時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(n-1)/N\}$ に等しい位相差を与える関係で配置されている。

（c2）jNが奇数の値であるときは、第1位相制御手段～第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(1/2)(jN+1)\}$ 位相制御手段～第jN位相

10

20

30

40

50

制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されている。

(d2) jN が偶数の値であるときは、第1位相制御手段～第 $(jN/2)$ 位相制御手段の順に反射率が単調増加するように設定され、かつ第 $\{(jN/2)+1\}$ 位相制御手段～第 jN 位相制御手段の順に反射率が単調減少するように設定されており、第 $(jN/2)$ 位相制御手段の反射率と第 $\{(jN/2)+1\}$ 位相制御手段の反射率とが互いに等しく設定されている。

【0084】

第1～第 jN 位相制御手段は、光導波路の光が伝播する方向に沿って一列に配列された第1～第 jN 単位FBGとすることが良い。また、この光導波路を光ファイバーとするのが好適である。

【0085】

この発明の光多重伝送システムは、上述の第1の光パルス時間拡散装置を符号器あるいは復号器として利用することによって構成される。また、この発明の光多重伝送システムは、上述の第2の光パルス時間拡散装置を符号器あるいは復号器として利用することによっても構成される。

【0086】

すなわち、この発明の光多重伝送システムは、送信側装置に符号器を具え、受信側装置に復号器を具えている。

【0087】

符号器及び復号器は、この発明の第1の光パルス時間拡散装置を利用することも、また、この発明の第2の光パルス時間拡散装置を利用することも可能である。

【0088】

第1～第 n チャンネルは、それぞれ第1～第 n 光パルス時間拡散器に対応付けられて構成される。

【0089】

送信側装置において、符号器によって第1～第 n チャンネルの光パルス信号を符号化して符号化光パルス信号を生成し、第1～第 n チャンネルの符号化光パルス信号を多重して多重光パルス信号を生成する。

【0090】

受信側装置において、復号器によって多重光パルス信号をチャンネルごとに復号化して第1～第 n チャンネルのそれぞれの光パルス信号を再生する。

【発明の効果】

【0091】

この発明の第1の光パルス時間拡散装置を構成する第 m_E 光パルス時間拡散器 ($m_E = 1, 2, \dots, s$) によれば、入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第 N チップパルスまでの N 個のチップパルスから成る、チップパルス列に変換して出力する機能を有している。そして、時間軸上で隣接するチップパルス間に $2\pi\{a+(m_E-1)/N\}$ に等しい位相差が与えられるので、第1チップパルスに対して k 番目の第 k チップパルス (k は、1～ N までの全ての整数) は、 $2\pi\{a+(m_E-1)/N\} \times (k-1)$ に等しい相対位相が与えられる。

【0092】

同様に、この発明の第1の光パルス時間拡散装置を構成する第 m_D 光パルス時間拡散器 ($m_D = 1, 2, \dots, s$) によれば、入力される光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第 N チップパルスまでの N 個のチップパルスから成る、チップパルス列に変換して出力する機能を有している。そして、第1チップパルスに対して、このチップパルスの列を構成する k 番目の第 k チップパルスは、 $2\pi\{a+(m_D-1)/N\} \times (k-1)$ に等しい相対位相が与えられている。

【0093】

従って、 $m_E = m_D$ のとき $2\pi\{a+(m_E-1)/N\} \times (k-1) = 2\pi\{a+(m_D-1)/N\} \times (k-1)$ であり、 $m_E \neq m_D$ のとき $2\pi\{a+(m_E-1)/N\} \times (k-1) \neq 2\pi\{a+(m_D-1)/N\} \times (k-1)$ であるから、送信側で、第1～第 s 光パルス時間拡散器から出力される s 通りのチップパルス列を合波して多重信号として送信し、受信側でこの多重信号をこの発明の第1の光パルス時間拡散器に入力すれ

10

20

30

40

50

ば、受信側の光パルス時間拡散器が具える、同一の光パルス時間拡散器のみから自己相関波($m_E = m_D$)が生成され、これ以外の光パルス時間拡散器からは、相互相関波($m_E \neq m_D$)が生成される。すなわち、受信側では、多重信号から第 m_E 光パルス時間拡散器によって、送信側の第 m_E 光パルス時間拡散器で生成されて送信されたチップパルス成分のみが自己相関波として変換されて出力される。

【0094】

この発明の第1の光パルス時間拡散装置と第2の光パルス時間拡散装置との相違点は、光パルス時間拡散器の構成にある。

【0095】

第2の光パルス時間拡散装置を構成する第 n 光パルス時間拡散器によれば、入力する光パルスを、時間軸上に時間拡散して順次並ぶ、第1～第 (jN) チップパルスまでの (jN) 個のチップパルスから成る、チップパルス列に変換して出力する機能を有している。この (jN) 個のチップパルスからなるチップパルス列は、 N 個ごとに第1～第 j チップパルス群が順次配列されることによって形成されている。

【0096】

第1チップパルス群は、このチップパルスの列を構成する第1番目の第1チップパルス～第 N 番目の第 N チップパルスによって構成される。そして、第1チップパルス群を構成する第 k_1 チップパルス(k_1 は、1～ N までの全ての整数)は、第1チップパルスに対して $2\pi\{a+(n-1)/N\} \times (k_1-1)$ に等しい相対位相が与えられている。

【0097】

第2チップパルス群は、このチップパルスの列を構成する第 $(N+1)$ 番目の第 $(N+1)$ チップパルス～第 $(2N)$ 番目の第 $(2N)$ チップパルスによって構成される。そして、第2チップパルス群を構成する第 k_2 チップパルス(k_2 は、 $N+1$ ～ $2N$ までの全ての整数)は、第 $(N+1)$ チップパルスに対して $2\pi\{a+(n-1)/N\} \times (k_2-1)$ に等しい相対位相が与えられている。

【0098】

以下同様に、第 j チップパルス群に至るまで、順次チップパルス群が配列される。そして、最後に配列される第 j チップパルス群は、このチップパルスの列を構成する第 $((j-1)N+1)$ 番目の第 $((j-1)N+1)$ チップパルス～第 $((j-1)N+N)$ 番目の第 $((j-1)N+N)$ チップパルス、すなわち第 (jN) チップパルスによって構成される。そして、第 j チップパルス群を構成する第 k_j チップパルス(k_j は、 $(j-1)N+1$ ～ (jN) までの全ての整数)は、第 $((j-1)N+1)$ チップパルスに対して、 $2\pi\{a+(n-1)/N\} \times (k_j-1)$ に等しい相対位相が与えられている。

【0099】

すなわち、第1の光パルス時間拡散装置を構成する第 n 光パルス時間拡散器と第2の光パルス時間拡散装置を構成する第 n 光パルス時間拡散器との相違は、次のように説明することができる。すなわち、前者が、第1～第 N チップパルスまでの N 個のチップパルスから成るチップパルス列に変換して出力する機能を有しているのに対して、後者は、第1チップパルス群～第 j チップパルス群までの j 個のチップパルス群からなるチップパルス列(チップパルス数が jN 個)に変換して出力する機能を有している点にある。第2の光パルス時間拡散装置を構成する第 n 光パルス時間拡散器が生成して出力するチップパルス列を構成する第1チップパルス群～第 j チップパルス群までの j 個のチップパルス群の、個々のチップパルス群を構成するチップパルス列は、全て、第1の光パルス時間拡散装置を構成する第 n 光パルス時間拡散器が生成して出力するチップパルス列と同一である。

【0100】

一方、時間拡散されて時間軸上に並ぶチップパルスの数が、第1の光パルス時間拡散装置による場合と比較して、 j 倍となる。そのため、1つの光パルスから生成されたチップパルスの時間軸上での存在範囲も、 j 倍の広さとなる。そのため、光パルス信号を構成する隣接する光パルスから生成されるチップパルス列同士が時間軸上で重なり合うことが起こり得る。この結果、重なり合うチップパルス同士の干渉によって、再生される光パルスの時間波形に歪が生じる等の問題も起こりえる。従って、第2の光パルス時間拡散装置の設計に当たって、 j の値を幾つに選択するかは、光パルス信号のビットレート等を勘案して

決定されるべき設計的事項に属する。ちなみに、 $j = 1$ に設定すれば、この発明の第1の光パルス時間拡散装置になる。

【0101】

この発明の第1の光パルス時間拡散装置の特徴は、当該装置が具える光パルス時間拡散器のそれぞれが有する位相制御手段の個数である N が奇数の値及び偶数の値であるときに応じて、上述のように第1位相制御手段～第 N 位相制御手段の反射率が設定されている。同様にこの発明の第2の光パルス時間拡散装置の特徴は、当該装置が具える光パルス時間拡散器のそれぞれが有する位相制御手段の個数である jN が奇数の値及び偶数の値であるときに応じて、上述のように第1位相制御手段～第 jN 位相制御手段の反射率が設定されている。

10

【0102】

定量的な説明は後述するが、この発明の第1及び第2の光パルス時間拡散装置が上述の特徴を有することによって、この特徴を有しない場合と比較して、相互相関波成分に対する自己相関波成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れる。

【0103】

位相制御手段として、単位FBGを光導波路の方向に沿って直列に配置した構成とすれば、トランスバーサル型光フィルタを利用するよりも簡便に形成することができるという利点がある。

【0104】

また、この光導波路を、光ファイバーとすれば、光パルス時間拡散器を更に容易に形成できる。その上、光通信システムにおいては、光ファイバーが光伝送路として使われていることから、位相制御手段として光ファイバーを用いて構成された光パルス時間拡散器を利用することが好適である場合が多い。

20

【0105】

この発明の光多重伝送システムによれば、符号化及び復号化のそれぞれに使われる光パルス時間拡散装置として、この発明の第1あるいは第2の光パルス時間拡散装置が利用される。これによって、自己相関波成分と相互相関波成分とのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れ、受信信号を容易に分離できる光多重伝送システムが実現される。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0106】

以下、図を参照して、この発明の実施形態につき説明する。なお、各図は、この発明による実施形態に係る一構成例を図示するものであり、この発明が理解できる程度に各構成要素の断面形状や配置関係等を模式的に示しているに過ぎず、この発明を図示例に限定するものではない。また、各図において同様の構成要素については、同一の符号を付して示し、その重複する説明を省略することもある。

【0107】

以下に示す実施形態は、光パルス時間拡散器がSSFBGによって構成されているものとして説明する。そこで、まず、この発明の第1及び第2実施形態の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成するためのSSFBGについて説明する。もちろん、上述したこの発明が奏する効果は、光パルス時間拡散器をSSFBG以外の、例えば、トランスバーサル型フィルタ構造のPLCあるいはAWGを利用して構成しても、同様に得られる。トランスバーサル型フィルタ構造のPLCあるいはAWGを利用して構成した場合には、以下の説明でチップパルスに相対位相を与える単位FBGに代えて、トランスバーサル型フィルタ構造のPLCあるいはAWGにおけるチップパルスに相対位相を与える構成部分をそれぞれ置き換えることによって、以下の説明はそのまま成り立つ。

40

【0108】

< SSFBG >

図5(A)及び(B)を参照して、この発明による各実施形態の光パルス時間拡散器に利用さ

50

れるSSFBGの概略的構造を説明する。

【 0 1 0 9 】

図5(A)は、SSFBG 150の模式的な断面図である。このSSFBG 150は、コア154とクラッド152を具える光ファイバー156のコア154に作り付けられた構造である。N個の単位FBGが、光ファイバー156の光導波路であるコア154の導波方向に沿って直列に配置されてSSFBG 150が構成されている。図5(A)において、N個の第1～第N単位FBGに対しては、 $A_1 \sim A_N$ まで順次記号を付して区別してある。

【 0 1 1 0 】

図5(B)は、図5(A)に示されたSSFBG 150が具える第1～第N単位FBGの反射率変調度を、第1～第N単位FBGの順にそれぞれ示した図である。

10

【 0 1 1 1 】

第1～第N単位FBGの屈折率変調周期は Λ である。したがって、第1～第N単位FBGのブラッグ反射波長 λ は、 $\lambda = 2N_{eff}\Lambda$ で与えられる。ここで、 N_{eff} は光ファイバー156の実効屈折率である。単位FBGをN個具えるSSFBGに入力された光パルスは、N個のチップパルスに時間拡散される。

【 0 1 1 2 】

図5(A)及び(B)に示されたSSFBG 150の左端から右端の方向に配列された $A_1 \sim A_N$ と示す第1～第N単位FBGと、このSSFBG 150から出力されるチップパルスとが、一対一に対応する。

【 0 1 1 3 】

図5(B)に示すように、第1単位FBGから中央に配置されている単位FBGに向かい反射率が単調に増大し、中央に配置されている単位FBGから第N単位FBGに向って反射率が単調に減少するように形成されている。このように形成するには、第1単位FBGから中央に配置されている単位FBGに向いそれぞれの単位FBGの屈折率変調の大きさを単調に大きくし、中央に配置されている単位FBGから第N単位FBGに向いそれぞれの単位FBGの屈折率変調の大きさを単調に小さく形成すればよい。

20

【 0 1 1 4 】

すなわち、Nが奇数の値であるときは、第1単位FBGから第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 単位FBGの順に屈折率変調の大きさを単調に大きくし、かつ第 $\{(1/2)(N+1)\}$ 単位FBGから第N単位FBGの順に屈折率変調の大きさを単調減少するように形成すればよい。また、Nが偶数の値であるときは、第1単位FBGから第 $(N/2)$ 単位FBGの順に屈折率変調の大きさを単調に大きくし、かつ第 $\{(N/2)+1\}$ 単位FBGから第N単位FBGの順に屈折率変調の大きさを単調小さくし、第 $(N/2)$ 単位FBGの屈折率変調の大きさと第 $\{(N/2)+1\}$ 単位FBGの屈折率変調の大きさとを互いに等しく形成すればよい。

30

【 0 1 1 5 】

第2の発明の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器にあっては、上述した単位FBGの個数をNとあるところをjNと読み替えれば、上述の説明はそのまま成り立つ。

【 0 1 1 6 】

< 第1実施形態 >

図6(A)、(B)及び(C)を参照して、この発明による第1実施形態の光パルス時間拡散装置(以後、第1の光パルス時間拡散装置という。)の光パルス時間拡散器に利用されるSSFBGの詳細な構造を説明する。

40

【 0 1 1 7 】

図6(A)は、SSFBGの模式的な断面図であり、以下の説明における参照の便宜のために上述の図5(A)と同一の図を採録してある。図6(B)は、SSFBGの屈折率変調構造を概略的に示す図である。横軸はSSFBGが形成された光ファイバー156の長手方向に沿った位置座標である。縦軸は光ファイバー156の屈折率変調構造を表しており、光ファイバー156のコア154の屈折率の最大と最小の差を Δn として表してある。また、図6(C)には、光ファイバー156のコア154の屈折率変調構造を一部拡大して描いてある。図6(A)、(B)及び(C)では単位FBGの数が16個である場合を一例として示してある。

【 0 1 1 8 】

50

図6(C)に示すように、隣接する単位FBG間は、屈折率変調がなされていない領域である。A_iで示された第A_i単位FBGとA_{i+1}で示された第A_{i+1}単位FBGとの間の間隔D_iについて、この間隔がどのように設定されているかを説明する。ここに、iは1～(N-1)までの任意の整数である。間隔D_iは、A_iで示された第A_i単位FBGの屈折率変調構造の任意のピーク位置から、A_{i+1}で示された第A_{i+1}単位FBGの屈折率変調構造の任意のピーク位置までの距離である。ここで、A_iで示された第A_i単位FBGの有する相対位相をP_iとし、A_{i+1}で示された第A_{i+1}単位FBGの有する相対位相をP_{i+1}であるとする。このとき両者の位相差d_iは、P_{i+1}-P_iである。D_iとd_iとは、A_iで示された第A_i単位FBGとA_{i+1}で示された第A_{i+1}単位FBGとの間の光ファイバーの実効屈折率をN_{eff}として、D_i=(M+d_i)λ/2なる関係がある。ここでMは任意の整数で、λは、光パルスの真空中の屈折率をλ₀としたときλ=λ₀/N_{eff}である。(M+d_i)λ/2を角度位相で表すと、π(M+d_i)となる。

10

【0119】

第1の光パルス時間拡散装置の第n光パルス時間拡散器を製造するに当たり、SSFBGの入出力端に配置された単位FBGの相対位相を0として、その隣の単位FBGの相対位相が2π{a+(n-1)/N}、その隣の単位FBGの相対位相が2π{a+(n-1)/N}×2となるように形成するには、D₁=(M+a+(n-1)/N)λ、D₂=(M+{a+(n-1)/N})×2λに等しく設定すればよい。一般に、SSFBG 50の入出力端に配置された第1単位FBGを第1番目として、第k番目の第k単位FBGの相対位相が2π{a+(n-1)/N}×(k-1)となるように形成するには、D_k=(M+{a+(n-1)/N})×(k-1)λに等しく設定すればよい。

【0120】

20

図7を参照して、第1の光パルス時間拡散装置の構成及びその動作を説明する。図7は、第1の光パルス時間拡散装置の概略的構成図である。第1の光パルス時間拡散装置は、第1光パルス時間拡散器36-1～第s光パルス時間拡散器36-sのs個の光パルス時間拡散器を具えて構成される。

【0121】

図7に示すように、第1の光パルス時間拡散装置は、第1～第s光パルス時間拡散器(sはNを満たす整数)を具えて構成される。第1～第s光パルス時間拡散器は、それぞれ単位FBGが、各光パルス時間拡散器の入出力端から、第1～第N単位FBGの順で並べて配置されて構成されている(図7では、第1～第NFBGと省略して示してある。)。図7では、光ファイバーのコアの部分に示す縦縞によって、第1～第N単位FBGをそれぞれ示している。図7に示す第1～第N単位FBGが、それぞれ第1～第Nの位相制御手段に対応する。

30

【0122】

第1、第2、……、及び第s光パルス時間拡散器のそれぞれの入出力端には、光サーキュレータ30-1～30-sが接続されている。図7に示す光パルス時間拡散装置が、チップパルス変換器として利用される場合は、各光サーキュレータ30-1～30-sを介して、それぞれ光パルス時間拡散器に入力された光パルスは、時間拡散されたチップパルスの列に変換されて、再び各光サーキュレータ30-1～30-sを介して出力される。この場合は、例えば、各光サーキュレータ30-1～30-sを介して、それぞれ光パルス時間拡散器に入力された光パルスは、第1～第sチャンネルの光パルス信号を構成する光パルスに相当する。

【0123】

40

また、図7に示す光パルス時間拡散装置が、光パルス復元器として利用される場合は、各光サーキュレータ30-1～30-sを介して、それぞれ光パルス時間拡散器に入力されたチップパルスの列は、自己相関波あるいは相互相関波に変換されて、再び各光サーキュレータ30-1～30-sを介して出力される。この場合は、各光サーキュレータ30-1～30-sを介して、それぞれ光パルス時間拡散器に入力されたチップパルスの列は、第1～第sチャンネルのチップパルスの列に相当する。

【0124】

まず、第1光パルス時間拡散器36-1を取り上げて、光パルス時間拡散器の構成を説明する。第1光パルス時間拡散器36-1に入力される光パルス29-1は、光サーキュレータ30-1を介して光パルス34-1として入力される。光パルス34-1は、第1光パルス時間拡散器36-1の

50

第1～第N単位FBGによって時間拡散されて、チップパルスの列35-1として生成される。

【0125】

すなわち、光サーキュレータ30-1を介して、第1光パルス時間拡散器36-1に入力された光パルス34-1は、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列35-1として生成されて、光サーキュレータ30-1を介して、チップパルスの列31-1として出力される。

【0126】

第1～第N単位FBGのそれぞれが、チップパルス列35-1を構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_1 (= 2\pi a)$ に等しい相対位相を与え、・・・、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_1 (= 2\pi a \times (N-1))$ に等しい相対位相を与える。ただし、パラメータaは $0 < a < 1$ を満たす任意の実数である。

10

【0127】

第2光パルス時間拡散器36-2に入力される光パルス29-2は、第2光サーキュレータ30-2を介して光パルス34-2として入力される。光パルス34-2は、第2光パルス時間拡散器36-2の第1～第N単位FBGによって時間拡散されて、チップパルスの列31-2として生成される。

【0128】

すなわち、光サーキュレータ30-2を介して、第2光パルス時間拡散器36-2に入力された光パルス34-2は、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列35-2として生成されて、光サーキュレータ30-2を介して、チップパルスの列31-2として出力される。

20

【0129】

チップパルス列35-2を構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_2 (= 2\pi (a + (1/N)))$ に等しい相対位相を与え、・・・、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_2 (= 2\pi (a + (1/N) \times (N-1)))$ に等しい相対位相を与える。

【0130】

以下同様に、光パルス時間拡散器36-nに入力される光パルス29-nは、第n光サーキュレータ30-nを介して光パルス34-nとして入力される。光パルス34-nは、第n光パルス時間拡散器36-nの第1～第N単位FBGによって時間拡散されて、チップパルスの列31-nとして生成される。

30

【0131】

すなわち、光サーキュレータ30-nを介して、第n光パルス時間拡散器36-nに入力された光パルス列34-nは、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列35-nとして生成されて、光サーキュレータ30-nを介して、チップパルスの列31-nとして出力される。

【0132】

チップパルス列31-nを構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_n (= 2\pi \{a + (n-1)/N\})$ に等しい相対位相を与え、・・・、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_n (= 2\pi \{a + (n-1)/N\} \times (N-1))$ に等しい相対位相を与える。

40

【0133】

光パルス時間拡散器36-sに入力される光パルス29-sは、第s光サーキュレータ30-sを介して光パルス34-sとして入力される。光パルス34-sは、第s光パルス時間拡散器36-sの第1～第N単位FBGによって時間拡散されて、チップパルスの列31-sとして生成される。

【0134】

すなわち、光サーキュレータ30-sを介して、第s光パルス時間拡散器36-sに入力された光パルス34-sは、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1～第NチップパルスまでのN個のチップパルスから成る、チップパルス列35-sとして生成されて、光サーキュレータ30-sを介して、チップパルスの列31-sとして出力される。

【0135】

50

チップパルス列35-sを構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_s (= 2\pi \{a+(s-1)/N\})$ に等しい相対位相を与え、 $\dots$ 、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_s (= 2\pi \{a+(s-1)/N\} \times (N-1))$ に等しい相対位相を与える。

【0136】

また、第1～第s光パルス時間拡散器のそれぞれを構成する第1～第N単位FBGのそれぞれの反射率 $R_1 \sim R_N$ は以下の通りに設定されている。

【0137】

Nが奇数の値であるときは、 R_1 から $R_{\{(1/2)(N+1)\}}$ の順に単調に増大するように、かつ $R_{\{(1/2)(N+1)\}}$ から R_N の順に屈折率変調の大きさを単調減少するように形成されている。また、Nが偶数の値であるときは、 R_1 から $R_{N/2}$ の順に単調に増大するように、かつ $R_{\{(N/2)+1\}}$ から R_N の順に単調に減少させ、 $R_{N/2}$ の大きさと $R_{\{(N/2)+1\}}$ の大きさとを互いに等しく形成されている。

【0138】

次に、図8(A)、(B)及び(C)を参照して、第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理について説明する。図8(A)は動作原理の説明に供する図であり、図8(B)は、単位FBG 46a、46b、46c及び46dからそれぞれブラッグ反射されるチップパルスa'、b'、c'及びd'の時間波形を示す図であり、図8(C)は、SSFBG 46で復号化された入力光パルスの自己相関波の時間波形を示している。

【0139】

すなわち、図8(A)、(B)及び(C)を参照して説明する第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器は、 $N=4$ 、 $a=1/4$ である場合を示しており、 $R_1 < R_2$ 、 $R_2 = R_3$ 、 $R_3 > R_4$ の関係を満たすように、第1単位FBG～第4単位FBGのそれぞれの反射率が設定されている。後述する図9(A)、(B)及び(C)を参照して説明する第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器においても同様である。

【0140】

図8(A)は、この発明の第1の光パルス時間拡散装置の1組の一方が具えるSSFBG 40をチップパルス変換器とし、他方が具えるSSFBG 46を光パルス復元器とした例を示している。すなわち、SSFBG 40は、符号器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器であり、SSFBG 46は、復号器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器である。ここでは、符号器の役割を果たすSSFBG 40と復号器の役割を果たすSSFBG 46とに設定された符号が同一である場合について説明する。すなわち、第1光パルス時間拡散器のSSFBG 40 ($n=1$) で符号化し、第1光パルス時間拡散器のSSFBG 46で復号化する場合について説明する。

【0141】

図8(A)に示すように、入力光パルスが光サーキュレータ42を介してSSFBG 40に入力されて時間拡散されて、再び光サーキュレータ42を介して、チップパルス列として出力される。図8(A)に示すSSFBG 40は、光ファイバーの導波方向に沿って4つの単位FBGが配列されて構成されたSSFBGである。従って、SSFBG 40から出力される、時間軸上に並ぶチップパルスの数は4個 ($N=4$) となる。SSFBG 40に光パルスを入力すると、単位FBG 40a、40b、40c及び40dから、それぞれブラッグ反射光a、b、c及びdが生成されて、出力される。

【0142】

図8(A)に示すこの発明の第1の光パルス時間拡散装置の第1光パルス時間拡散器の例では、 $a=0.25$ 、 $n=1$ 、 $N=4$ である場合に相当する。従って、第1のチップパルス(時間軸上で先頭位置のチップパルス)に対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2\pi \{a+(n-1)/N\}$ に等しい相対位相を与える。従って、第2のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} = 2\pi (0.25+(1-1)/4) = 2\pi \times 0.25$ となるので、 2π を省略して相対位相値は0.25となる。同様に第3のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} \times 2 = 2\pi (0.25+(1-1)/4) \times 2 = 2\pi \times 0.25 \times 2 = 2\pi \times 0.5$ となるので、 2π を省略して相対位相値は0.5となる。同

10

20

30

40

50

様に、第4のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} \times 3 = 2\pi (0.25+(1-1)/4) \times 3 = 2\pi \times 0.25 \times 3 = 2\pi \times 0.75$ となるので、 2π を省略して相対位相値は0.75となる。すなわち、第1光パルス時間拡散器のSSFBG 40を構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列は、 $(0, 0.25, 0.5, 0.75)$ となる。以後、 2π を省いた $\{a+(n-1)/N\}$ を相対位相の最小単位ということもある。

【0143】

図8(A)に示すSSFBG 40を第1光パルス時間拡散器として、SSFBG 46をこの第1光パルス時間拡散器と同一の屈折率変調構造を有するSSFBGとして示してある。SSFBG 46は、SSFBG 40と屈折率変調構造が同一であることに加えて、入出力端も同一に設定されている。この点が、符号が設定されたSSFBGを利用する従来の符号器と復号器との関係と相違する。すなわち、従来の符号器と復号器との関係は、互いに入出力端が逆の関係に設定される。

【0144】

一方、第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列は、次のようになる。

【0145】

すなわち、 $a=0.25$ 、 $n=2$ 、 $N=4$ であるので、第1のチップパルス（時間軸上で先頭位置のチップパルス）に対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2\pi \{a+(n-1)/N\}$ に等しい相対位相を与える。従って、第2のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} = 2\pi (0.25+(2-1)/4) = 2\pi (0.25+0.25) = 2\pi \times 0.5$ となるので、 2π を省略して相対位相値は0.5となる。同様に第3のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} \times 2 = 2\pi (0.25+(2-1)/4) \times 2 = 2\pi (0.25+0.25) \times 2 = 2\pi \times 0.5 \times 2 = 2\pi \times 1$ となるので、 2π を省略して相対位相値は1となる。同様に、第4のチップパルスに対しては、 $2\pi \{a+(n-1)/N\} \times 3 = 2\pi (0.25+(2-1)/4) \times 3 = 2\pi (0.25+0.25) \times 3 = 2\pi \times 0.5 \times 3 = 2\pi \times 1.5$ となるので、 2π を省略して相対位相値は1.5となる。すなわち、第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列は、 $(0, 0.5, 1, 1.5)$ となる。

【0146】

また、既に述べたように相対位相値を示すのに、 λ あるいは 2π という定数部分を省略して表記している関係上、1は1周期を示し、0と1とは位相としては同位相を意味する。従って、第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列は、 $(0, 0.5, 1, 1.5) = (0, 0.5, 0, 0.5)$ となる。以後、相対位相値を示すに当たっては、0以上1未満の実数で表記する。

【0147】

次に、光パルスが符号器で符号化されてチップパルス列に変換され、そのチップパルス列が復号器で復号化されて自己相関波が形成される過程を説明する。すなわち、光パルスがSSFBG 40で時間拡散されてチップパルスの列に変換され、そのチップパルスの列がSSFBG 46によって自己相関波（復元された光パルス）が形成される過程を説明する。

【0148】

図8(A)に示す単一の光パルスが光サーキュレータ42を介してSSFBG 40に入力されると、単位FBG 40a、40b、40c及び40dからのブラッグ反射光が生成される。そこで、単位FBG 40a、40b、40c及び40dからのブラッグ反射光をそれぞれa、b、c及びdとする。すなわち、図8(A)に示す単一の光パルスが、ブラッグ反射光a、b、c及びdとして時間拡散されてチップパルス列に変換される。

【0149】

ブラッグ反射光a、b、c及びdは、時間軸に対して表すと、図8(A)の送信側と受信側とをつなぐ光ファイバー伝送路48の上側に示すように、4つの光パルスに時間拡散されて、時間軸上で単位FBG 40a、40b、40c及び40dに依存する特定のチップパルスの列を構成する。したがって、チップパルスの列とは、符号器に入力された光パルスが時間軸上に複数のチップパルスとして時間拡散されたチップパルスの列である。

【0150】

チップパルスの列を構成するこれらのブラッグ反射光a、b、c及びdの相対位相は、 $(0,$

0.25, 0.5, 0.75) で示すようになっている。ブラッグ反射光aの位相とブラッグ反射光bの位相差は、0.25である。ブラッグ反射光bの位相とブラッグ反射光cの位相との差、ブラッグ反射光cの位相とブラッグ反射光dの位相との差も0.25となっている。

【0151】

光サーキュレータ42から出力されるチップパルスの列は、光ファイバー伝送路48を伝播して、光サーキュレータ44を介して復号器のSSFBG 46に入力される。SSFBG 46はSSFBG 40と同一の構造であり、入出力端（光サーキュレータに近い側）も同一である。すなわち、SSFBG 40の入出力端から順に単位FBG 40a、40b、40c及び40dと並んでおり、SSFBG 46の入出力端からも同様に順に単位FBG 46a、46b、46c及び46dと並んでいる。

【0152】

図8(B)及び(C)を参照して、SSFBG 40から出力されるチップパルス列が、SSFBG 46に入力されて自己相関波として生成されて出力される過程を説明する。図8(B)及び(C)は、チップパルス列から自己相関波が生成される過程の説明に供する図である。

【0153】

図8(B)は、単位FBG 46a、46b、46c及び46dからそれぞれブラッグ反射されて生成されるチップパルスa'、b'、c'及びd'の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1から7を付して時刻の前後関係を表示してあり、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

【0154】

チップパルス列は復号器のSSFBG 46に入力されると、まず単位FBG 46aでブラッグ反射される。単位FBG 46aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光a'と表すこととする。同様に単位FBG 46b、単位FBG 46c及び単位FBG 46dでブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光b'、c'及びd'と表すこととする。

【0155】

チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c及びdが、単位FBG 46aによって、ブラッグ反射されて、図8(B)においてa'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列になる。単位FBG 46aによってブラッグ反射されたチップパルスaは、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 46aによってブラッグ反射されたチップパルスbは、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。同様に、単位FBG 46aによってブラッグ反射されたチップパルスc及びdは、それぞれ時間軸上で3及び4と示してある位置にピークをもつチップパルスである。

【0156】

単位FBG 46bによっても、チップパルスの列を構成する光パルスa、b、c及びdがブラッグ反射されて、図8(B)においてb'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列になる。単位FBG 46bから反射されるブラッグ反射光b'は、ブラッグ反射光a'と比べて0.25だけ増えている。したがって、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列に対して、b'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列は、各チップパルスの相対位相に0.25だけ加えられた値となっている。すなわち、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列の右側から左側に向って相対位相が(0, 0.25, 0.5, 0.75)となっているのに対して、b'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列の相対位相値は、右側から左側に向って、0.25がそれぞれ加えられて、(0.25, 0.5, 0.75, 0)となっている。

【0157】

単純に0.25を加えるだけであれば、b'と示した列の相対位相は、(0.25, 0.5, 0.75, 1)となるのであるが、最後の第4項が1ではなく0となっているのは、既に述べたように、相対位相値が0と1とでは、位相としては、両者は同じ意味であるからである。

【0158】

同様に、c'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列は、a'と示したチップパルスの列の相対位相値(0, 0.25, 0.5, 0.75)に0.5が加えられて、(0.5, 0.75, 1, 1.25) = (0.5, 0.75, 0, 0.25)となっている。また、d'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列は、a'と示した列のチップパルスの列の相対位相値(0, 0.25, 0.5, 0.75)に0.75が加えられ

10

20

30

40

50

て、 $(0.75, 1, 1.25, 1.5) = (0.75, 0, 0.25, 0.5)$ となっている。

【0159】

図8(C)はSSFBG 46で復元された入力光パルスの自己相関波を示している。横軸は時間軸であり、図8(B)に示した図と時間軸を合わせてある。自己相関波は、SSFBG 46の各単位FBGからのブラッグ反射光 a' 、 b' 、 c' 及び d' で与えられるので、図8(B)に示した、ブラッグ反射光 a' 、 b' 、 c' 及び d' を全て足し合わせたものとなっている。図8(C)の時間軸上で4と表示してある時刻では、ブラッグ反射光 a' 、 b' 、 c' 及び d' に関連する光パルスが全て同位相で足しあわされるので、最大のピークを構成する。また、図8(C)の時間軸上で4と表示してある時刻以外の時刻でも各チップパルスは、同一の位相で重なり合うが、重なり合うチップパルスの数が4つ未満(3、2及び1つ)であるので、4と表示してある時刻における最大ピークよりも小さい。

10

【0160】

以上説明したように、光パルスがSSFBG 40で時間拡散されてチップパルスの列となり、このチップパルスの列がSSFBG 46に入力されることによって、自己相関波が生成される。ここで取り上げた例では4ビットの相対位相(0, 0.25, 0.5, 0.75)を用いたが、相対位相がこれ以外の場合であっても上述した説明は同様に成り立つ。

【0161】

図8(C)に示す自己相関波は、次のようなメカニズムで生成されたものと解釈することができる。時間軸上で1と示す位置に形成されるピーク波形は、単位FBG 46aから反射された、チップパルスaに対するブラッグ反射光 a' によって形成されたものである。従って、時間軸上で1と示す位置に形成されるピーク波形の振幅は、チップパルスの振幅に等しい。

20

【0162】

時間軸上で2と示す位置に形成されるピーク波形は、単位FBG 46aから反射された、チップパルスbに対するブラッグ反射光 b' と、単位FBG 46bから反射された、チップパルスaに対するブラッグ反射光 a' との和として形成されたものである。これら両者の和は、相対位相がどちらも0.25である同位相の光チップパルス同士の和であるから、その振幅がチップパルスの振幅の2倍となる。

【0163】

以下、時間軸上で3から7と示す位置に形成されるピーク波形の振幅は、上記と同一のメカニズムで生成されたピーク波形であり、それぞれチップパルスの振幅の、3倍、4倍、3倍、2倍、1倍となっている。図8(C)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。これらのピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1から7と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+3+4+3+2+1=16$ となる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して256倍($=16^2$ 倍)となる。すなわち、自己相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの256倍である。

30

【0164】

以上の説明では、符号器に類似する役割を果たすSSFBG 40と復号器に類似する役割を果たすSSFBG 46とを構成する各単位FBGのそれぞれに設定された相対位相が同一である場合について説明した。すなわち、SSFBG 40によってチップパルス列として時間拡散された後、このチップパルスの列がSSFBG 46に入力されて、自己相関波として生成されて出力される場合を説明した。

40

【0165】

次に、符号器の役割を果たすSSFBGと復号器の役割を果たすSSFBGとに設定された符号が異なる場合について説明する。

【0166】

図9(A)、(B)及び(C)は、異なる屈折率変調構造を作りつけた一組のSSFBGを利用した第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理の説明に供する図である。図9(A)は動作原理の説明に供する図であり、図9(B)は、単位FBG 56a、56b、56c及び56dからそれぞれブ

50

ラッグ反射されるチップパルス a' 、 b' 、 c' 及び d' の時間波形を示す図であり、図9(C)は、復号器のSSFBG 56で復号化された入力光パルスの相互相関波の時間波形を示している。図9(A)、(B)及び(C)においても、図8(A)、(B)及び(C)と同様に、位相制御手段を4つ具える光パルス時間拡散器、すなわち $N=4$ である場合を、一例として取り上げて示している。

【0167】

図9(A)、(B)及び(C)を参照して、相異なる屈折率変調構造を作りつけた一組のSSFBGを利用した第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理について説明する。

【0168】

図9(A)では、第1の光パルス時間拡散装置の1組の一方が具えるSSFBG 50をチップパルス変換器とし、他方が具えるSSFBG 56を光パルス復元器とした例を示している。すなわち、SSFBG 50は、一方のチップパルス変換器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器であり、SSFBG 56は、他方の光パルス復元器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器である。

【0169】

すなわち、SSFBG 50は、光パルス時間拡散装置の1組の一方が具える第2光パルス時間拡散器であり、SSFBG 56は、光パルス時間拡散装置の1組の他方が具える第1光パルス時間拡散器である。

【0170】

図9(A)に示すように、入力光パルスが光サーキュレータ52を介してSSFBG 50に入力されて時間拡散されて、再び光サーキュレータ52を介して、チップパルス列として出力される。図9(A)に示すSSFBG 50は、光ファイバーの導波方向に沿って4つの単位FBGが配列されて構成されたSSFBGである。従って、SSFBG 50から出力される、時間軸上に並ぶチップパルスの数は4個となる。

【0171】

SSFBG 50を構成する単位FBG 50a、50b、50c及び50dは、それぞれ、光位相符号の第1番目のチップa、第2番目のチップb、第3番目のチップc、第4番目のチップdと、それぞれ対応する。

【0172】

SSFBG 50に光パルスを入力すると、単位FBG 50a、50b、50c及び50dから、それぞれブラッグ反射光がa、b、c及びdが生成されて、出力される。SSFBG 50は、第2光パルス時間拡散器に対応するから、ブラッグ反射光a、b、c及びdのそれぞれの相対位相は0、0.5、0、0.5となっている。これを、相対位相値の数値として表すと、(0、0.5、0、0.5)となる。すなわち、第2光パルス時間拡散器に対応する、SSFBG 50は、 $n=2$ 、 $N=4$ 、 $a=0.25$ である場合に相当する。すなわち、相対位相の最小単位 $a+(n-1)/N$ は、 $a+(n-1)/N=0.25+(2-1)/4=0.5$ である。第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数値は、(0、0.5、0、0.5)で与えられる。

【0173】

これに対して、SSFBG 56は、第1光パルス時間拡散器に対応するから、ブラッグ反射光 a' 、 b' 、 c' 及び d' のそれぞれの相対位相を表す数値は(0、0.25、0.5、0.75)となる。すなわち、第1光パルス時間拡散器に対応する、SSFBG 56は、 $n=1$ 、 $N=4$ 、 $a=0.25$ である場合に相当する。すなわち、相対位相の最小単位 $a+(n-1)/N$ は、 $a+(n-1)/N=0.25+(1-1)/4=0.25$ である。従って、第1光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数値は、(0、0.25、0.5、0.75)で与えられる。

【0174】

次に、光パルスが第2光パルス時間拡散器に対応するSSFBG 50で時間拡散されてチップパルスの列に変換され、そのチップパルスの列が第1光パルス時間拡散器に対応するSSFBG 56によって相互相関波が形成される過程を説明する。

【0175】

図9(A)に示す単一の光パルスが光サーキュレータ52を介して符号器のSSFBG 50に入力さ

10

20

30

40

50

れると、単位FBG 50a、50b、50c及び50dからのブラッグ反射光が生成される。そこで、単位FBG 50a、50b、50c及び50dからのブラッグ反射光をそれぞれa、b、c及びdとする。すなわち、図9(A)に示す単一の光パルスが、ブラッグ反射光a、b、c及びdに時間拡散されてチップパルス列に変換される。

【0176】

ブラッグ反射光a、b、c及びdは、時間軸に対して表すと、図9(A)の送信側と受信側とをつなぐ光ファイバー伝送路58の上側に示すように、4つの光パルスに時間拡散されて、時間軸上で単位FBG 50a、50b、50c及び50dに依存する特定のチップパルスの列を構成する。したがって、チップパルスの列とは、符号器に入力された光パルスが時間軸上に複数のチップパルスとして時間拡散されたチップパルスの列である。

10

【0177】

チップパルスの列を構成するこれらのブラッグ反射光a、b、c及びdの相対位相は、(0, 0.5, 0, 0.5)で示すようになっている。ブラッグ反射光aの位相とブラッグ反射光bの位相差は、0.5である。ブラッグ反射光bの位相とブラッグ反射光cの位相との差、ブラッグ反射光cの位相とブラッグ反射光dの位相との差も0.5となっている。

【0178】

光サーキュレータ52から出力されるチップパルスの列は、光ファイバー伝送路58を伝播して、光サーキュレータ54を介してSSFBG 56に入力される。

【0179】

図9(B)及び(C)を参照して、SSFBG 50から出力されるチップパルス列が、SSFBG 56に入力されて相互相関波として生成されて出力される過程を説明する。図9(B)及び(C)は、チップパルス列から相互相関波が生成される過程の説明に供する図である。

20

【0180】

図9(B)は、単位FBG 56a、56b、56c及び56dからそれぞれブラッグ反射されて生成されるチップパルスa'、b'、c'及びd'の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1から7を付して時刻の前後関係を表示してあり、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

【0181】

チップパルス列は復号器のSSFBG 56に入力されると、まず単位FBG 56aでブラッグ反射される。単位FBG 56aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光a'と表すこととする。同様に単位FBG 56b、単位FBG 56c及び単位FBG 56dでブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光b'、c'及びd'と表すこととする。

30

【0182】

チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c及びdが、単位FBG 56aによって、ブラッグ反射されて、図9(B)においてa'と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 56aによってブラッグ反射されたチップパルスaは、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 56aによってブラッグ反射されたチップパルスbは、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。同様に、単位FBG 56aによってブラッグ反射されたチップパルスc及びdは、それぞれ時間軸上で3及び4と示してある位置にピークをもつチップパルスである。

40

【0183】

単位FBG 56bによっても、チップパルスの列を構成する光パルスa、b、c及びdがブラッグ反射されて、図9(B)においてb'と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 56bから反射されるブラッグ反射光b'は、ブラッグ反射光a'と比べて0.25だけ増えている。したがって、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列に対して、b'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列は、各チップパルスの相対位相に0.25だけ加えられた値となっている。すなわち、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列の右側から左側に向って相対位相が(0, 0.5, 0, 0.5)となっているのに対して、b'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列の相対位相値は、右側から左側に向って、0.25がそれぞれ加えられて、(0.25, 0.75, 0.25, 0.75)となっている。

50

【0184】

同様に、c'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列は、a'と示した列のチップパルスの列の相対位相値(0, 0.5, 0, 0.5)に0.5が加えられて、(0.5, 0, 0.5, 0)となっている。また、d'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列は、a'と示した列のチップパルスの列の相対位相値(0, 0.5, 0, 0.5)に0.75が加えられて、(0.75, 1.25, 0.75, 1.25) = (0.75, 0.25, 0.75, 0.25)となっている。

【0185】

図9(C)はSSFBG 56で復元された入力光パルスの相互相関波を示している。横軸は時間軸であり、図9(B)に示した図と時間軸を合わせてある。相互相関波は、SSFBG 56の各単位FBGからのブラッグ反射光a'、b'、c'及びd'で与えられるので、図9(B)に示した、ブラッグ反射光a'、b'、c'及びd'を全て足し合わせたものとなっている。

10

【0186】

図9(C)の時間軸上で1と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'の内、最も右側にあるチップパルスだけで形成されるピークであるから、その振幅はチップパルス1つ分の振幅に等しい。時間軸上で2と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'の内、右側から2番目にあるチップパルスと、ブラッグ反射光b'の内、最も右側にあるチップパルスの和として形成されるピークである。両者のチップパルスの位相は、それぞれ、0.5、0.25であるので、その和として形成されるピークは、その振幅はチップパルス2つ分より小さい。このことを、図9(C)では、(<2)と示してある。

【0187】

20

同様に、時間軸上で3と表記してある時刻ではその振幅がチップパルス1つ分より小さく、時間軸上で5と表記してある時刻ではその振幅がチップパルス1つ分より小さく、及び時間軸上で6と表記してある時刻ではその振幅がチップパルス2つ分より小さいピークとなる。また、時間軸上で4と表記してある時刻では、重なり合うチップパルスがちょうど相殺されてその振幅は0となっている。また、時間軸上で7と表示してある時刻では、ブラッグ反射光d'の内、最も左側にあるチップパルスだけで形成されるピークであるから、その振幅はチップパルス1つ分の振幅に等しい。

【0188】

図9(C)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。これらのピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1から7と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+1+0+1+2+1=8$ よりも小さくなる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して64倍(=8²倍)より小さい値となる。すなわち、相互相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの64倍より小さい。

30

【0189】

従って、第1光パルス時間拡散器で時間拡散して、第1光パルス時間拡散器で光パルスを復元した場合、自己相関波エネルギーがチップパルス1つ分のエネルギーの256倍であったのに対して、第2光パルス時間拡散器で時間拡散して、第1光パルス時間拡散器で光パルスを復元した場合、相互相関波エネルギーがチップパルス1つ分のエネルギーの64倍となる。すなわち、この発明の第1の光パルス時間拡散装置によって、光パルスの時間拡散及び光パルスの復元を行った場合、自己相関波のエネルギーは相互相関波のエネルギーの4(=256/64)倍となることを示している。また、図8(C)に示したように自己相関波のピーク強度はチップパルス1つ分の4倍であった。すなわちエネルギーに換算して16倍である。一方、図9(C)に示すように、相互相関波のピーク強度は0となっている。

40

【0190】

上述した自己相関波及び相互相関波のエネルギーの大きさは、単位FBGの反射率が全て等しいものとして評価したものである。以下に説明するように、この発明の特徴である、単位FBGの反射率を変調すると、自己相関波のエネルギーと相互相関波のエネルギーとのエネルギー比(S/N比)は一層大きくなる。

【0191】

50

< 単位FBGのアポダイズ効果 >

上述した第1実施形態では、単位FBGを4つ具える光パルス時間拡散器から構成される光パルス時間拡散装置を取り上げた。以下の説明では、光パルス時間拡散器が具える単位FBGの数がN個であるものとして、単位FBGをアポダイズすることによって得られる効果を一般的に説明する。

【0192】

第1の光パルス時間拡散措置が具える光パルス時間拡散器を構成する第1から第N単位FBGのそれぞれの反射率 R_1 から R_N は、Nが奇数の値であるときは $R_1 < R_2 < R_3 < \dots < R_{\{(1/2)(N+1)\}} < R_{\{(1/2)(N+1)\}} > \dots > R_N$ となるように設定されており、Nが偶数の値であるときは、 $R_1 < R_2 < R_3 < \dots < R_{N/2} < R_{N/2} = R_{\{(N/2)+1\}} < R_{\{(N/2)+1\}} > \dots > R_N$ となるように設定されている。従って、光パルス時間拡散器から出力されるチップパルス列の時間軸上で両端に近いほど、その強度が弱いことになる。

10

【0193】

また、符号器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器から出力されるチップパルス列を構成するチップパルスの隣接間チップパルスの位相差を $2\pi\{a+(e-1)/N\}$ で与えられるものとし、復号器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器から出力されるチップパルス列を構成するチップパルスの隣接間チップパルスの位相差を $2\pi\{a+(f-1)/N\}$ で与えられるものとする。ここで、e及びfはそれぞれ1からsの全ての整数であり、sはs Nを満たす整数である。

【0194】

20

符号器において第1単位FBGにより生成されるチップパルスの位相に対して、第p単位FBGにより生成されるチップパルスの位相は、 $2\pi\{a+(e-1)/N\} \times (p-1)$ となる。一方、復号器において第1単位FBGにより生成されるチップパルスの位相に対して、第q単位FBGにより生成されるチップパルスの位相は、 $2\pi\{a+(f-1)/N\} \times (q-1)$ となる。ここで、p及びqはそれぞれ、1 p N及び1 q Nを満たす整数である。

【0195】

この条件下で、符号器の第p単位FBGによって生成され、復号器の第q単位FBGによって復号化されるチップパルスの位相は、次式(1)

$$2\pi\{a+(e-1)/N\} \times (p-1) + 2\pi\{a+(f-1)/N\} \times (q-1) \quad (1)$$

で与えられる。

30

【0196】

符号器の第p単位FBGの反射率を R_p とし、復号器の第q単位FBGの反射率を R_q とする。このとき、符号器に入力される光パルスの光強度を1と規格化して説明すると、符号器の第p単位FBGによって生成され、復号器の第q単位FBGによって復号化されるチップパルスの強度は、 $R_p \times R_q$ で与えられる。

【0197】

符号器及び復号器から出力されるチップパルスの時間間隔を τ とすると、符号器の第1単位FBGによって生成されるチップパルスに対する、第p単位FBGによって生成されるチップパルスの遅延時間は、 $(p-1)\tau$ となる。また、復号器の第1単位FBGによって生成されるチップパルスに対する、第q単位FBGによって生成されるチップパルスの遅延時間は、 $(q-1)\tau$ となる。

40

【0198】

符号器の第p単位FBGで生成されたチップパルスが、復号器の第q単位FBGによってブラッグ反射されて生成されるチップパルスの総遅延時間は、 $(p+q-2)\tau$ となる。

【0199】

復号器によって復号化されて出力されるチップパルスは、上述したように、時間軸上で一定の条件下で重なり合うが、時間軸上における遅延時間Tの瞬間に重なり合うチップパルスは、 $T = p + q - 2$ の関係を満たすチップパルス同士の組み合わせである。例えば、 $T = 4$ である場合を例にとると、 $(p, q) = (1, 5), (2, 4), (3, 3), (4, 2), (5, 1)$ である場合が相当する。すなわち、符号器の第1単位FBGによって生成され復号器の第5単位FBGによって復号

50

化されるチップパルス、符号器の第2単位FBGによって生成され復号器の第4単位FBGによって復号化されるチップパルス、符号器の第3単位FBGによって生成され復号器の第3単位FBGによって復号化されるチップパルス、符号器の第4単位FBGによって生成され復号器の第2単位FBGによって復号化されるチップパルス、符号器の第5単位FBGによって生成され復号器の第1単位FBGによって復号化されるチップパルスが全て時間軸上で重なり合う。

【0200】

ここで、チップパルスの時間間隔 τ を幾らに設定するかは設計的事項に属し原理的には幾らであっても良い。そこで、以下の議論では $\tau = 1$ として説明する。

【0201】

$T = p + q - 2$ は、 $q - 1 = T - p + 1$ と変形できるから、式(1)は、次式(2)となる。

$$2\pi \{(e-f)/N\}(p-1) + 2\pi \{a+(f-1)/N\}T \quad (2)$$

時間軸上で遅延時間 T の位置で重なり合うチップパルスの位相差は式(2)で与えられ、この式(2)の第1項である $2\pi \{(e-f)/N\}(p-1)$ は T に依存せず、第2項である $2\pi \{a+(f-1)/N\}T$ は T に依存することが分かる。すなわち、遅延時間 T に依存しない第1項によって、再生されるチップパルスの絶対的な位相差が確定される。

【0202】

自己相関波が生成される条件は、 $e = f$ である場合であるから、式(2)の第1項は0となる。すなわち、自己相関波が生成される条件では、時間軸上での全ての遅延時間において、チップパルスは同位相で重なり合う。

【0203】

従って、第1から第 s 光パルス時間拡散器のそれぞれを構成する第1から第 N 単位FBGのそれぞれの反射率がどのように設定されるかにはかかわらず、自己相関波のピーク強度は一義的に決定される。

【0204】

一方相互相関波が生成される条件は、 $e \neq f$ である場合であるから、式(2)の第1項で与えられる絶対的な位相差は0ではない。このため、時間軸上で同一の遅延時間において重なり合うチップパルス同士は、異なる位相で重なり合うこととなる。この場合、互いにその強度を小さくするように、すなわち、打ち消しあうように重なり合う。

【0205】

この打ち消しあいの度合いは、チップ数が多く、かつ、 $(e-f)$ の値が $N/2$ に近い同士ほど強くなる。すなわち、相互相関波形のピーク強度は、 $(e-f)$ の値が $N/2$ に近いほど弱くなる。このことは、相互相関波形を形成するチップパルス列の時間軸上で中央付近に位置するチップパルスそのピーク強度が小さくなることを意味している。

【0206】

更に、符号器における隣接する単位FBGで生成されるチップパルス間の位相差 $2\pi \{a+(e-1)/N\}$ と、復号器における隣接する単位FBGで生成されるチップパルス間の位相差 $2\pi \{a+(f-1)/N\}$ との差分が π に近いほど、相互相関波形のピーク強度は小さくなる。すなわち、第1～第 s 光パルス時間拡散器にそれぞれ第1～第 s チャンネルを割り当てた場合、チャンネル数の差が $s/2$ に近い関係にあるチャンネル同士の相互相関波形のピーク強度程小さくなる。従って、この関係にあるチャンネル同士の S/N 比が最も大きくなる。

【0207】

図8(B)あるいは図9(B)に示すように、復号器から出力される自己相関波あるいは相互相関波は、符号器において1つの光パルスが時間拡散されるチップパルスの数を N とした場合、 $(2N-1)$ 個分のチップパルスが占める時間軸上の時間幅を占有する。例えば、光パルス時間拡散器が具える単位FBGの数が N 個である場合、この光パルス時間拡散器を利用して符号器及び復号器を構成した場合、復号器から出力される自己相関波形あるいは相互相関波形は、 $(2N-1)$ 個分のチップパルスが占める時間軸上の時間幅を占有する。

【0208】

自己相関波形あるいは相互相関波形の時間軸上での両端のピークは、位相が大きくは異なるチップパルス同士が重なって生成される。しかしながら反射率が小さい単位FBG

10

20

30

40

50

で生成される少数のチップパルスが重なるので、干渉によってその強度が増強されても、それほど大きくはならない。

【0209】

一方、自己相関波形あるいは相互相関波形の時間軸上での中央部分に形成されるピークは、多数の強度の異なるチップパルス同士が重なり合って干渉した結果生成される。

【0210】

例えば、符号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差と、復号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差との差分が $2\pi/N$ である場合、時間軸上で π の位相差をもって重なり合うチップパルスは1組だけでありかつ干渉しあうチップパルス間に強度差があるために干渉による打ち消し効果が小さい。しかしながら、符号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差と、復号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差との差分が $2 \times (2\pi/N)$ である場合、時間軸上で π の位相差をもって重なり合うチップパルスは2組となり、それらのチップパルス間の干渉により弱められる打ち消し効果が大きい。従って、トータルとしての相互相関波形成分の強度は変わらない。

【0211】

以上説明した干渉の効果は、符号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差と、復号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差との差分が π に近いほど顕著になる。また、後述する第2の光パルス時間拡散装置のように、重なり合うチップパルスの数が N より大きくなる（すなわち、 jN となる。）と、時間軸上で打ち消しあうように重なり合うチップパルスの数が増え、上述した、符号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差と、復号器における隣接する単位FBGによって生成されるチップパルス間の位相差との差分が $2\pi/N$ である場合であっても、トータルとしての相互相関波形成分の強度は小さくなる。

【0212】

図10及び図11を参照して、第1の光パルス時間拡散装置による、アボダイズによるS/N比が向上する効果について説明する。

【0213】

図10は、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの個数が16個である場合の第1単位FBG～第16単位FBGのそれぞれの反射率変調度を示す図である。図10の横軸は、第1単位FBG～第16単位FBGを指定する1～16のFBGナンバーを示し、縦軸は反射率変調度を任意スケール示している。

【0214】

ここで、反射率変調度とは、単位FBGを構成する母体である光ファイバーのコアの屈折率の極大と極小の差 Δn に起因して確定するフレネル反射率を、第1単位FBG～第16単位FBGの反射率が全て等しい場合を1.0として、アボダイズがされている場合の第1単位FBG～第16単位FBGの間の反射率の相対値で示す値である。すなわち、反射率変調度が1.0より小さい単位FBGの Δn の値は、アボダイズがされていない第1単位FBG～第16単位FBGの反射率が全て等しい場合の各単位FBGの Δn の値より小さく設定されていることを示す。また、逆に、反射率変調度が1.0より大きい単位FBGの Δn の値は、アボダイズがされていない第1単位FBG～第16単位FBGの反射率が全て等しい場合の各単位FBGの Δn の値より大きく設定されていることを示す。

【0215】

図10に示すように、第1単位FBGから第8単位FBGの順に直線的に反射率が単調増大し、第9単位FBGから第16単位FBGの順に直線的に反射率が単調減少するように設定されている。図10では、アボダイズの強さ、すなわち反射率が最大である単位FBGと反射率が最小である単位FBGとの反射率の差の大きさが4通りの光パルス時間拡散器の例を、アボダイズがされていない場合と重ねて示してある。アボダイズがされていない光パルス時間拡散器を構成する各単位FBGの反射率を白丸で示してある。アボダイズの強さが大きい光パルス時間拡散器の順に、それぞれの光パルス時間拡散器を構成する各単位FBGの反射率を、白の四

角形、黒丸、白の三角形、及び黒の三角形で示してある。

【0216】

アポダイズがされていない光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの反射率変調を変調パターンAとし、アポダイズの強さが大きい光パルス時間拡散器の順にその変調パターンをそれぞれB、C、D、及びEと表記する。

【0217】

図11を参照して、アポダイズの強さの異なる光パルス時間拡散装置による符号化及び復号化を行った場合の、自己相関波と相互相関波とのパワー比、すなわちS/N比を比較するシミュレーションの結果を説明する。図11は、アポダイズの強さに対する(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を示す図である。横軸はパターンA~Eを示し、縦軸は(自

10

【0218】

図11は、第1光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この符号化光パルス信号を第3光パルス時間拡散器によって復号化した場合の相互相関波のパワーを基準にとって示してある。

【0219】

図11に示すように、パターンAでは(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値がほぼ12であるのに対し、パターンB~Eは何れも12より大きくなっている。すなわち、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの Δn の値をアポダイズすることにより、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を向上させることが可能であることが分かる。図11に示すよ

20

【0220】

なお、図11では第1光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この符号化光パルス信号を第3光パルス時間拡散器によって復号化した場合の相互相関波のパワーを基準にとったが、第1光パルス時間拡散器と $\{a + (n-1)/N\}$ で与えられる相対位相の最小単位の差が最も大きな第8光パルス時間拡散器で復号化した場合には、アポダイズをしなくとも、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値は十分に大きな値とすることが可能

30

【0221】

図11に示すように、第1光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この第1光パルス時間拡散器の相対位相の最小単位の差が小さい第3光パルス時間拡散器との間であっても、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を、ほぼ2倍程度にすることが可能である。すなわち、パターンAでは(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値がほぼ12であるのに対し、パターンDではこの値がほぼ19となっている。

40

【0222】

以上のことから、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの Δn の値がアポダイズされているこの発明の第1の光パルス時間拡散装置によれば、相互相関波成分に対する自己相関波成分成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れるという効果が得られることが分かる。

【0223】

< 第2実施形態 >

図12(A)、(B)及び(C)を参照して、この発明による第2実施形態の光パルス時間拡散装置(以後、第2の光パルス時間拡散装置という。)の光パルス時間拡散器に利用されるSSFBGの詳細な構造を説明する。

50

【 0 2 2 4 】

図12(A)は、SSFBGの模式的な断面図であり、図12(B)は、SSFBGの屈折率変調構造を概略的に示す図である。横軸はSSFBGが形成された光ファイバー156の長手方向に沿った位置座標である。縦軸は光ファイバー156の屈折率変調構造を表しており、光ファイバー156のコア154の屈折率の最大と最小の差を Δn として表してある。また、図12(C)には、光ファイバー156のコア154の屈折率変調構造を一部拡大して描いてある。

【 0 2 2 5 】

図12(A)、(B)及び(C)では、図6(A)、(B)及び(C)を参照して説明した単位FBGの数が16個である第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位FBGを2周期分重ね、単位FBGを32個有する光パルス時間拡散器を一例として示してある。この点を除き、上述した第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器と同一であるので、重複する説明を省略する。

10

【 0 2 2 6 】

次に、図13を参照して、第2の光パルス時間拡散装置の構成及びその機能について説明する。図13は、第2の光パルス時間拡散装置の概略的構成図である。図13に示す第1から第(jN)単位FBGがそれぞれ、第1から第(jN)の位相制御手段に対応する。

【 0 2 2 7 】

第2の光パルス時間拡散装置が具える第1、第2、...、及び第s光パルス時間拡散器が具える単位FBGが、各光パルス時間拡散器の入出力端（光サーキュレータが接続されている端）から、第1から第(jN)単位FBG（図13では、第1FBG～第jNFBGと省略して示してある。）の順で並べて配置されている。

20

【 0 2 2 8 】

光サーキュレータ30-1を介して、第1光パルス時間拡散器36-1に入力された光パルス34-1は、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1から第(jN)チップパルスまでの(jN)個のチップパルスから成る、チップパルス列35-1として生成されて光サーキュレータ30-1を介して出力される。チップパルス列35-1を構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_1 (= 2\pi a)$ に等しい相対位相を与え、...、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_1$ に等しい相対位相を与え、...、第(jN-3)チップパルスに対して $2 \times (jN-3)d_1$ に等しい相対位相を与え、第(jN-2)チップパルスに対して $2 \times (jN-2)d_1$ に等しい相対位相を与え、第(jN-1)チップパルスに対して $2 \times (jN-1)d_1$ に等しい相対位相を与える。

30

【 0 2 2 9 】

光サーキュレータ30-2を介して、第2光パルス時間拡散器36-2に入力された光パルス34-2は、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1から第(jN)チップパルスまでの(jN)個のチップパルスから成る、チップパルス列35-2として生成されて光サーキュレータ30-2を介して出力される。チップパルス列35-2を構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_2 (= 2\pi (a + (1/N)))$ に等しい相対位相を与え、...、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_2$ に等しい相対位相を与え、...、第(jN-3)チップパルスに対して $2 \times (jN-3)d_2$ に等しい相対位相を与え、第(jN-2)チップパルスに対して $2 \times (jN-2)d_2$ に等しい相対位相を与え、第(jN-1)チップパルスに対して $2 \times (jN-1)d_2$ に等しい相対位相を与える。

40

【 0 2 3 0 】

以下同様に、光サーキュレータ30-nを介して、第n光パルス時間拡散器36-nに入力された光パルス34-nも、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1から第(jN)チップパルスまでの(jN)個のチップパルスから成る、チップパルス列35-nとして生成されて光サーキュレータ30-nを介して、出力される。チップパルス列35-nを構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_n (= 2\pi \{a + (n-1)/N\})$ に等しい相対位相を与え、...、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_n (= 2\pi \{a + (n-1)/N\} \times (N-1))$ に等しい相対位相を与え、...、第(jN-3)チップパルスに対して $2 \times (jN-3)d_n$ に等しい相対位相を与え、第(jN-2)チップパルスに対して $2 \times (jN-2)d_n$ に等しい相対

50

位相を与え、第 $(jN-1)$ チップパルスに対して $2 \times (jN-1)d_n$ に等しい相対位相を与える。

【0231】

光サーキュレータ30-sを介して、第s光パルス時間拡散器36-sに入力された光パルス34-sも、時間軸上に時間拡散されて順次並ぶ、第1から第 (jN) チップパルスまでの (jN) 個のチップパルスから成る、チップパルス列35-sとして生成されて光サーキュレータ30-sを介して出力される。チップパルス列35-sを構成する、第1のチップパルスに対して0に等しい相対位相を与え、第2のチップパルスに対して $2 \times d_s (= 2\pi \{a+(s-1)/N\})$ に等しい相対位相を与え、 $\dots$ 、第Nチップパルスに対して $2 \times (N-1)d_s (= 2\pi \{a+(s-1)/N\} \times (N-1))$ に等しい相対位相を与え、 $\dots$ 、第 $(jN-3)$ チップパルスに対して $2 \times (jN-3)d_s$ に等しい相対位相を与え、第 $(jN-2)$ チップパルスに対して $2 \times (jN-2)d_s$ に等しい相対位相を与え、第 $(jN-1)$ チップパルスに対して $2 \times (jN-1)d_s$ に等しい相対位相を与える。

【0232】

図13において、 $j=1$ として与えられる第1チップパルス群、 $j=2$ として与えられる第2チップパルス群、及び $j=j$ として与えられる第jチップパルス群をそれぞれ生成する単位FBG群を、それぞれ第1から第s光パルス時間拡散器ごとに矩形に破線で囲って示してある。ここで、第1チップパルス群とは、第1チップパルスから第Nチップパルスで構成されるチップパルス群であり、第2チップパルス群とは、第 $(N+1)$ チップパルスから第 $2N$ チップパルスで構成されるチップパルス群であり、第jチップパルス群とは、第 $((j-2)N+1)$ チップパルスから第 (jN) チップパルスで構成されるチップパルス群である。

【0233】

また、第1～第s光パルス時間拡散器のそれぞれを構成する第1～第jN単位FBGのそれぞれの反射率 $R_1 \sim R_{jN}$ は以下の通りに設定されている。

【0234】

jNが奇数の値であるときは、 R_1 から $R_{\{(1/2)(jN+1)\}}$ の順に単調に増大するように、かつ $R_{\{(1/2)(jN+1)\}}$ から R_{jN} の順に屈折率変調の大きさを単調減少するように形成されている。また、jNが偶数の値であるときは、 R_1 から $R_{jN/2}$ の順に単調に増大するように、かつ $R_{\{(jN/2)+1\}}$ から R_{jN} の順に単調に減少させ、 $R_{jN/2}$ の大きさと $R_{\{(jN/2)+1\}}$ の大きさとを互いに等しく形成されている。

【0235】

図14、図15(A)及び(B)を参照して、同一の屈折率変調構造を作りつけた一組のSSFBGを利用したこの発明の第2の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理について説明する。図14は動作原理の説明に供する図であり、図15(A)は、単位FBG 66a、66b、66c、66d、66e、66f、66g及び66hからそれぞれブラッグ反射されるチップパルスa'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'の時間波形を示す図であり、図15(B)は、SSFBG 66で復号化された入力光パルスの自己相関波を示している。

【0236】

図14では、この発明の一方の第2の光パルス時間拡散装置が具えるSSFBG 60をチップパルス変換器とし、他方の第2の光パルス時間拡散装置が具えるSSFBG 66を光パルス復元器とした例を示している。すなわち、図14に示すSSFBG 60を第1光パルス時間拡散器として、SSFBG 66をこの第1光パルス時間拡散器と同一の屈折率変調構造を有するSSFBGとして示してある。SSFBG 66は、SSFBG 60と屈折率周期構造が同一であることに加えて、入出力端も同一に設定されている。

【0237】

図14では、位相制御手段を8つ具える光パルス時間拡散器、すなわち $N=4$ 、 $j=2$ である場合を、一例として取り上げて示しているが、以下の説明は、 $N=4$ 、 $j=2$ 以外の場合であっても、チップパルスの数が異なるだけで、チップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理については、同様である。すなわち、図14、図15(A)及び(B)を参照して、説明する第2の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器は、 $R_1 < R_2 < R_3 < R_4$ 、 $R_4 = R_5$ 、 $R_5 > R_6 > R_7 > R_8$ の関係を満たすように、第1単位FBG～第8単位F

BGのそれぞれの反射率が設定されている。後述する図16、図17(A)及び(B)を参照して、説明する第2の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器においても同様である。

【0238】

図14に示すように、入力光パルスが光サーキュレータ62を介してSSFBG 60に入力されて時間拡散されて、再び光サーキュレータ62を介して、チップパルス列として出力される。図14に示すSSFBG 60は、光ファイバーの導波方向に沿って8つの単位FBGが配列されて構成されたSSFBGである。従って、SSFBG 60から出力される、時間軸上に並ぶチップパルスの数は8個となる。SSFBG 60を構成する単位FBG 60a、60b、60c、60d、60e、60f、60g及び60hは、それぞれ、上述の光位相符号の第1番目のチップaから第8番目のhと、それぞれ対応する。

10

【0239】

図14に示すこの発明の第2の光パルス時間拡散装置の第1光パルス時間拡散器の例では、 $n=1$ 、 $N=4$ 、 $a=0.25$ 、 $j=2$ である場合に相当する。 j はチップパルス群の数であり、図14に示す第1光パルス時間拡散器に対応するSSFBG 60及びSSFBG 66は、2つのチップパルス群の繰り返しパターンとして構成されている。第1光パルス時間拡散器の相対位相の最小単位は、 $a + (n-1)/N = 0.25 + (1-1)/4 = 0.25$ である。従って、第1光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列の、第1番目のチップパルス群は、 $(0, 0.25, 0.5, 0.75)$ で与えられる。これに続く第2番目のチップパルス群も、 $(0, 0.25, 0.5, 0.75)$ で与えられる。従って、第1光パルス時間拡散器の相対位相は、 $(0, 0.25, 0.5, 0.75, 0, 0.25, 0.5, 0.75)$ となる。

20

【0240】

一方、この発明の第2の光パルス時間拡散装置の第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列は、次のようになる。第2光パルス時間拡散器の例では、 $n=2$ 、 $N=4$ 、 $a=0.25$ 、 $j=2$ である場合に相当する。第2光パルス時間拡散器の相対位相の最小単位は、 $a + (2-1)/N = 0.25 + (2-1)/4 = 0.5$ である。従って、第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数列の、第1番目のチップパルス群は、 $(0, 0.5, 0, 0.5)$ で与えられる。これに続く第2番目のチップパルス群も、 $(0, 0.5, 0, 0.5)$ で与えられる。従って、第2光パルス時間拡散器の相対位相は、 $(0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5)$ となる。

30

【0241】

次に、光パルスが符号器で符号化されてチップパルス列に変換され、そのチップパルス列が復号器で復号化されて自己相関波が形成される過程を説明する。すなわち、光パルスがSSFBG 60で時間拡散されてチップパルスの列に変換され、そのチップパルスの列がSSFBG 66によって自己相関波（復元された光パルス）が形成される過程を説明する。

【0242】

図14に示す単一の光パルスが光サーキュレータ62を介してSSFBG 60に入力されると、単位FBG 60a、60b、60c、60d、60e、60f、60g及び60hからのブラッグ反射光が生成される。そこで、単位FBG 60a、60b、60c、60d、60e、60f、60g及び60hからのブラッグ反射光をそれぞれa、b、c、d、e、f、g及びhとする。すなわち、図14に示す単一の光パルスが、ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhとして時間拡散されてチップパルス列に変換される。

40

【0243】

ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhは、時間軸に対して表すと、図14の送信側と受信側とをつなぐ光ファイバー伝送路68の上側に示すように、8つの光パルスに時間拡散されて、時間軸上で単位FBG 60a、60b、60c、60d、60e、60f、60g及び60hに依存する特定のチップパルスの列を構成する。

【0244】

チップパルスの列を構成するこれらのブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhの相対位相は、SSFBG 60が、この発明の第2の光パルス時間拡散装置の第1光パルス時間拡散器を利用されているものであるから、 $(0, 0.25, 0.5, 0.75, 0, 0.25, 0.5, 0.75)$ で示すよ

50

うになっている。ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhの中で隣接するブラッグ反射光同士の間隔は0.25となっている。

【0245】

光サーキュレータ62から出力されるチップパルスの列は、光ファイバー伝送路68を伝播して、光サーキュレータ64を介して復号器のSSFBG 66に入力される。SSFBG 66はSSFBG 60と同一の構造であり、入出力端も同一であり、どちらも、この発明の第2の光パルス時間拡散装置の第1光パルス時間拡散器である。

【0246】

図15(A)及び(B)を参照して、SSFBG 60から出力されるチップパルス列が、SSFBG 66に入力されて自己相関波として生成されて出力される過程を説明する。図15(A)及び(B)は、チップパルス列から自己相関波が生成される過程の説明に供する図である。

10

【0247】

図15(A)は、単位FBG 66a、66b、66c、66d、66e、66f、66g及び66hからそれぞれブラッグ反射されて生成されるチップパルスa'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1から15を付して時刻の前後関係を表示してあり、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

【0248】

チップパルス列は復号器のSSFBG 66に入力されると、まず単位FBG 66aでブラッグ反射される。単位FBG 66aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光a'と表すこととする。同様に単位FBG 66b、単位FBG 66c、単位FBG 66d、単位FBG 66e、単位FBG 66f、単位FBG 66g及び単位FBG 66h、でブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'と表すこととする。

20

【0249】

チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c、d、e、f、g及びhが、単位FBG 66aによって、ブラッグ反射されて、図15(A)においてa'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列になる。単位FBG 66aによってブラッグ反射されたチップパルスa'は、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 66aによってブラッグ反射されたチップパルスb'は、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。以下同様に、単位FBG 66aによってブラッグ反射されたチップパルスh'は、時間軸上で8と示してある位置にピークをもつチップパルスである。

30

【0250】

単位FBG 66bによっても、チップパルスの列を構成する光パルスa、b、c、d、e、f、g及びhがブラッグ反射されて、図15(A)においてb'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列になる。単位FBG 66bから反射されるブラッグ反射光b'は、ブラッグ反射光a'と比べて0.25だけ増えている。したがって、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列に対して、b'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列は、各チップパルスの相対位相に0.25だけ加えられた値となっている。すなわち、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列の右側から左側に向って相対位相が(0、0.25、0.5、0.75、0、0.25、0.5、0.75)となっているのに対して、b'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列の相対位相値は、右側から左側に向って、0.25がそれぞれ加えられて、(0.25、0.5、0.75、0、0.25、0.5、0.75、0)となっている。

40

【0251】

図15(B)はSSFBG 66で復元された入力光パルスの自己相関波を示している。横軸は時間軸であり、図15(A)に示した図と時間軸を合わせてある。自己相関波は、SSFBG 66の各単位FBGからのブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'で与えられるので、図15(A)に示した、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'を全て足し合わせたものとなっている。図15(B)の時間軸上で8と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'に関連する光パルスが全て同位相で足しあわさるので、最大のピークを構成する。

【0252】

50

以上説明したように、光パルスがSSFBG 60で時間拡散されてチップパルスの列となり、このチップパルスの列がSSFBG 66に入力されることによって、自己相関波が生成される。ここで取り上げた例では8ビットの相対位相(0、0.25、0.5、0.75、0、0.25、0.5、0.75)を用いたが、相対位相がこれ以外の場合であっても上述した説明は同様に成り立つ。

【0253】

図15(B)に示す自己相関波は、図8(B)あるいは図9(B)を参照して説明した、自己相関波あるいは相互相関波が生成されるメカニズムと同様であるので、その説明を省略する。図15(B)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。これらのピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1から15と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+3+4+5+6+7+8+7+6+5+4+3+2+1=64$ となる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して4096倍(=64²倍)となる。すなわち、自己相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの4096倍である。また、自己相関波のピーク(パルスの尖塔値)の振幅は、チップパルス1つ分の8倍であるから、エネルギーに換算すると64倍となる。

【0254】

以上の説明では、符号器に類似する役割を果たすSSFBG 60と復号器に類似する役割を果たすSSFBG 66とを構成する各単位FBGのそれぞれに設定された相対位相が同一である場合について説明した。すなわち、SSFBG 60によってチップパルス列として時間拡散された後、このチップパルスの列がSSFBG 66に入力されて、自己相関波として生成されて出力される場合を説明した。

【0255】

次に、符号器に類似する役割を果たすSSFBGと復号器に類似する役割を果たすSSFBGとに設定された符号が異なる場合について説明する。図16、図17(A)及び(B)は、相異なる屈折率変調構造を作りつけた一組のSSFBGを利用した第2の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理の説明に供する図である。

【0256】

図16、図17(A)及び(B)においても、図14、図15(A)及び(B)における場合と同様に、位相制御手段を8つ具える光パルス時間拡散器、すなわち $N=4$ 、 $j=2$ である場合を、一例として取り上げて示している。

【0257】

図16は動作原理の説明に供する図であり、図17(A)は、単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hからそれぞれブラッグ反射されるチップパルスa、b、c、d、e、f、g及びhの時間波形を示す図であり、図17(B)は、復号器のSSFBG 76で復号化された入力光パルスの相互相関波を示している。

【0258】

図16、図17(A)及び(B)を参照して、相異なる屈折率周期構造を作りつけた一組のSSFBGを利用した第2の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理について説明する。図16は動作原理の説明に供する図であり、図17(A)は、単位FBG 76a、76b、76c、76d、76e、76f、76g及び76hからそれぞれブラッグ反射されるチップパルスa'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'の時間波形を示す図であり、図17(B)は、復号器のSSFBG 76で復号化された入力光パルスの相互相関波を示している。

【0259】

図16では、第2の光パルス時間拡散装置の1組の一方が具えるSSFBG 70をチップパルス変換器とし、他方が具えるSSFBG 76を光パルス復元器とした例を示している。すなわち、SSFBG 70は、一方のチップパルス変換器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器であり、SSFBG 76は、他方の光パルス復元器である光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器である。

【 0 2 6 0 】

図16に示すように、入力光パルスが光サーキュレータ72を介してSSFBG 70に入力されて時間拡散されて、再び光サーキュレータ72を介して、チップパルス列として出力される。図16に示すSSFBG 70は、光ファイバーの導波方向に沿って8つの単位FBGが配列されて構成されたSSFBGである。従って、SSFBG 70から出力される、時間軸上に並ぶチップパルスの数は8個となる。SSFBG 70を構成する単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hは、それぞれ、上述の光位相符号の第1番目のチップaから第8番目のチップhと、それぞれ対応する。

【 0 2 6 1 】

SSFBG 70に光パルスを入力すると、単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hから、それぞれブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhが生成されて、出力される。SSFBG 70は、第2光パルス時間拡散器に対応するから、ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhのそれぞれの相対位相は0、0.5、0、0.5、0、0.5、0、0.5となっている。これを、相対位相値の数値として表すと、(0、0.5、0、0.5、0、0.5、0、0.5)となる。すなわち、第2光パルス時間拡散器に対応する、SSFBG 70は、 $n=2$ 、 $N=4$ 、 $a=0.25$ である場合に相当する。すなわち、相対位相の最小単位 $a+(n-1)/N$ は、 $a+(n-1)/N=0.25+(2-1)/4=0.5$ である。第2光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数値は、(0、0.5、0、0.5、0、0.5、0、0.5)で与えられることになる。

【 0 2 6 2 】

これに対して、SSFBG 76は、第1光パルス時間拡散器に対応するから、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'のそれぞれの相対位相を表す数値は(0、0.25、0.5、0.75、0、0.25、0.5、0.75)となる。すなわち、第1光パルス時間拡散器に対応する、SSFBG 76は、 $n=1$ 、 $N=4$ 、 $a=0.5$ である場合に相当する。すなわち、相対位相の最小単位 $a+(n-1)/N$ は、 $a+(n-1)/N=0.25+(1-1)/4=0.25$ である。従って、第1光パルス時間拡散器のSSFBGを構成する単位FBGに設定される相対位相値の数値は、(0、0.25、0.5、0.75、0、0.25、0.5、0.75)で与えられることになる。

【 0 2 6 3 】

次に、光パルスが第2光パルス時間拡散器に対応するSSFBG 70で時間拡散されてチップパルスの列に変換され、そのチップパルスの列が第1光パルス時間拡散器に対応するSSFBG 76によって相互相関波が形成される過程を説明する。

【 0 2 6 4 】

図16に示す単一の光パルスが光サーキュレータ72を介して符号器のSSFBG 70に入力されると、単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hからのブラッグ反射光が生成される。そこで、単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hからのブラッグ反射光をそれぞれa、b、c、d、e、f、g及びhとする。すなわち、図16に示す単一の光パルスが、ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhとして時間拡散されてチップパルス列に変換される。

【 0 2 6 5 】

ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhは、時間軸に対して表すと、図16の送信側と受信側とをつなぐ光ファイバー伝送路78の上側に示すように、8つの光パルスに時間拡散されて、時間軸上で単位FBG 70a、70b、70c、70d、70e、70f、70g及び70hに依存する特定のチップパルスの列を構成する。

【 0 2 6 6 】

チップパルスの列を構成するこれらのブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhの相対位相は、(0、0.5、0、0.5、0、0.5、0、0.5)で示すようになっている。ブラッグ反射光a、b、c、d、e、f、g及びhの中で隣接するブラッグ反射光同士の位相差は0.5となっている。

【 0 2 6 7 】

光サーキュレータ72から出力されるチップパルスの列は、光ファイバー伝送路78を伝播して、光サーキュレータ74を介してSSFBG 76に入力される。

10

20

30

40

50

【 0 2 6 8 】

図17(A)及び(B)を参照して、SSFBG 70から出力されるチップパルス列が、SSFBG 76に入力されて相互相関波として生成されて出力される過程を説明する。図17(A)及び(B)は、チップパルス列から相互相関波が生成される過程の説明に供する図である。

【 0 2 6 9 】

図17(A)は、単位FBG 76a、76b、76c、76d、76e、76f、76g及び76hからそれぞれブラッグ反射されて生成されるチップパルスa'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'の時間波形を示す図であり、横軸に時間軸をとってある。そして便宜的に1から15を付して時刻の前後関係を表示してあり、この数値が小さいほど、先の時刻であることを示している。

【 0 2 7 0 】

チップパルス列は復号器のSSFBG 76に入力されると、まず単位FBG 76aでブラッグ反射される。単位FBG 76aでブラッグ反射される反射光をブラッグ反射光a'と表すこととする。同様に単位FBG 76b、単位FBG 76c、単位FBG 76d、単位FBG 76e、単位FBG 76f、単位FBG 76g及び単位FBG 76hでブラッグ反射される反射光を、それぞれブラッグ反射光b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'と表すこととする。

【 0 2 7 1 】

チップパルス列を構成するチップパルスa、b、c、d、e、f、g及びhが、単位FBG 76aによって、ブラッグ反射されて、図17(A)においてa'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列になる。単位FBG 76aによってブラッグ反射されたチップパルスa'は、時間軸上で1と示してある位置にピークをもつ光パルスである。単位FBG 76aによってブラッグ反射されたチップパルスbは、時間軸上で2と示してある位置にピークをもつ光パルスである。同様に、単位FBG 76aによってブラッグ反射されたチップパルスcからhは、それぞれ時間軸上で3から8と示してある位置にピークをもつチップパルスである。

【 0 2 7 2 】

単位FBG 76bによっても、チップパルスの列を構成する光パルスa、b、c、d、e、f、g及びhがブラッグ反射されて、図17(A)においてb'と示した時間軸上に並ぶ。単位FBG 76bから反射されるブラッグ反射光b'は、ブラッグ反射光a'と比べて0.25だけ増えている。したがって、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列に対して、b'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列は、各チップパルスの相対位相に0.25だけ加えられた値となっている。すなわち、a'と示した時間軸上に並ぶチップパルスの列の右側から左側に向って相対位相が(0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5)となっているのに対して、b'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列の相対位相値は、右側から左側に向って、0.25がそれぞれ加えられて、(0.25, 0.75, 0.25, 0.75, 0.25, 0.75, 0.25, 0.75)となっている。

【 0 2 7 3 】

同様に、c'と示す時間軸上に並ぶチップパルスの列は、a'と示した列のチップパルスの列の相対位相値(0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5)に0.5が加えられて、(0.5, 0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0.5, 0)となっている。以下、d'からh'と示す時間軸上に並ぶそれぞれのチップパルスの列についても同様である。

【 0 2 7 4 】

図17(B)はSSFBG 76で復元された入力光パルスの相互相関波を示している。横軸は時間軸であり、図17(A)に示した図と時間軸を合わせてある。相互相関波は、SSFBG 76の各単位FBGからのブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'で与えられるので、図17(A)に示した、ブラッグ反射光a'、b'、c'、d'、e'、f'、g'及びh'を全て足し合わせたものとなっている。

【 0 2 7 5 】

図17(B)の時間軸上で1と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'の内、最も右側にあるチップパルスだけで形成されるピークであるから、その振幅はチップパルス1つ分の振幅に等しい。時間軸上で2と表示してある時刻では、ブラッグ反射光a'の内、右側から2番目にあるチップパルスと、ブラッグ反射光b'の内、最も右側にあるチップパルスの和として形成されるピークである。両者のチップパルスの位相は、それぞれ、0.5、0.25である

10

20

30

40

50

ので、その和として形成されるピークは、その振幅はチップパルス2つ分より小さい。このことを、図17(B)では、(<2)と示してある。

【0276】

図17(B)において、それぞれのピーク波形の振幅が、チップパルスの振幅の何倍となっているかを、括弧で括って、ピーク波形のそれぞれのピーク位置に示してある。これらのピーク波形の振幅の合計は、時間軸上で1から15と示す位置に形成されるピーク波形の順に合計すると、 $1+2+1+0+1+2+1+0+1+2+1+0+1+2+1=16$ よりも小さくなる。これをエネルギーに換算すると、チップパルス1つ分に対して256倍($=16^2$ 倍)より小さい値となる。すなわち、相互相関波の総エネルギーは、チップパルス1つ分のエネルギーの256倍より小さい。また、相互相関波のピーク(パルスの尖塔値)の振幅は、最大でもチップパルス1つ分に対してほぼ2倍であり、エネルギーに換算してチップパルス1つ分に対してほぼ4倍である。上述した相互相関波形では、ピーク強度はチップパルス1つ分に対してほぼ64倍であったのに比較して、 $1/16$ 以下の強度となっていることが言える。

【0277】

従って、第1光パルス時間拡散器で時間拡散して、第1光パルス時間拡散器で光パルスを復元した場合、自己相関波エネルギーがチップパルス1つ分のエネルギーの4096倍であったのに対して、第2光パルス時間拡散器で時間拡散して、第1光パルス時間拡散器で光パルスを復元した場合、相互相関波エネルギーがチップパルス1つ分のエネルギーの256倍となる。すなわち、この発明の第2の光パルス時間拡散装置によって、光パルスの時間拡散及び光パルスの復元を行った場合、自己相関波のエネルギーを相互相関波のエネルギーの16($=4096/256$)倍となることを示している。

【0278】

以上のことから、この発明の第2の光パルス時間拡散装置によれば、この発明の第1の光パルス時間拡散装置以上に、更に相互相関波成分に対する自己相関波成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れることが分かる。

【0279】

上述した自己相関波及び相互相関波のエネルギーの大きさは、単位FBGの反射率が全て等しいものとして評価したものである。上述したこの発明の第1の光パルス時間拡散装置の場合同様、単位FBGの反射率を変調すると、自己相関波のエネルギーと相互相関波のエネルギーとのエネルギー比(S/N比)は一層大きくなる。

【0280】

図18及び図19を参照して、第2の光パルス時間拡散装置における、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの反射率をアポダイズすることにより、S/N比を向上させる効果が得られることについて説明する。

【0281】

図18は、単位FBGの数が16個である第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位FBGを2周期分重ね、単位FBGの個数が32個である場合の第1単位FBG～第32単位FBGのそれぞれの反射率変調度を示す図である。図18の横軸は、第1単位FBG～第32単位FBGを指定する1～32のFBGナンバーを示し、縦軸は反射率変調度を任意スケール示している。

【0282】

ここで、反射率変調度とは、単位FBGを構成する母体である光ファイバーのコアの屈折率の極大と極小の差 Δn に起因して確定するフレネル反射率を、第1単位FBG～第32単位FBGの反射率が全て等しい場合を1.0として、アポダイズがされている場合の第1単位FBG～第32単位FBGの間の反射率の相対値で示す値である。すなわち、反射率変調度が1.0より小さい単位FBGの Δn の値は、アポダイズがされていない第1単位FBG～第32単位FBGの反射率が全て等しい場合の各単位FBGの Δn の値より小さく設定されていることを示す。また、逆に、反射率変調度が1.0より大きい単位FBGの Δn の値は、アポダイズがされていない第1単位FBG～第32単位FBGの反射率が全て等しい場合の各単位FBGの Δn の値より大きく設定されて

いることを示す。

【0283】

図18に示すように、第1単位FBGから第16単位FBGの順に直線的に反射率が単調増大し、第17単位FBGから第32単位FBGの順に直線的に反射率が単調減少するように設定されている。図18では、アボダイズの強さ、すなわち反射率が最大である単位FBGと反射率が最小である単位FBGとの反射率の差の大きさが4通りの光パルス時間拡散器の例を、アボダイズがされていない場合と重ねて示してある。アボダイズがされていない光パルス時間拡散器を構成する各単位FBGの反射率を白丸で示してある。アボダイズの強さが大きい光パルス時間拡散器の順に、それぞれの光パルス時間拡散器を構成する各単位FBGの反射率を、白の四角形、黒丸、白の三角形、及び黒の三角形で示してある。

10

【0284】

上述の第1の光パルス時間拡散装置の場合と同様に、アボダイズがされていない光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの反射率変調を変調パターンAとし、アボダイズの強さが大きい光パルス時間拡散器の順にその変調パターンをそれぞれB、C、D、及びEと表記する。

【0285】

図19を参照して、アボダイズの強さの異なる光パルス時間拡散装置による符号化及び復号化を行った場合の、自己相関波と相互相関波とのパワー比、すなわちS/N比を比較するシミュレーションの結果を説明する。図19は、アボダイズの強さに対する(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を示す図である。横軸はパターンA~Eを示し、縦軸は(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を示している。

20

【0286】

図19は、第2光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この符号化光パルス信号を第1光パルス時間拡散器によって復号化した場合の相互相関波のパワーを基準にとって示してある。

【0287】

図19に示すように、パターンAでは(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値がほぼ13であるのに対し、パターンB~Eは何れも13より大きくなっている。すなわち、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの Δn の値をアボダイズすることにより、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を向上させることが可能であることが分かる。図19に示すようにパターンCに対する(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値が極大となっているが、アボダイズの強度をどの程度にするのが最適であるかは、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの数等に依存し、一般的に言うことはできない。アボダイズの強度は、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの数等に基づき確定すべき値である。

30

【0288】

なお、図19では第2光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この符号化光パルス信号を第1光パルス時間拡散器によって復号化した場合の相互相関波のパワーを基準にとったが、第1光パルス時間拡散器と $\{a + (n-1)/N\}$ で与えられる相対位相の最小単位の差が最も大きな第8光パルス時間拡散器あるいは第24光パルス時間拡散器で復号化した場合には、アボダイズをしなくとも、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値は十分に大きな値とすることが可能である。従って、この発明の第2の光パルス時間拡散装置において、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を十分大きくとりにくい、相対位相の最小単位の差が小さい光パルス時間拡散器間(ここで取り上げる第1光パルス時間拡散器と第2光パルス時間拡散器間等)における符号化及び復号化において、その効果が発揮される。

40

【0289】

図19に示すように、第2光パルス時間拡散器によって光パルス信号を符号化し、この第1光パルス時間拡散器の相対位相の最小単位の差が小さい第1光パルス時間拡散器との間であっても、(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値を、ほぼ1.8倍程度にすることが可能である。すなわち、パターンAでは(自己相関波パワー)/(相互相関波パワー)の値がほ

50

ば13であるのに対し、パターンDではこの値がほぼ23となっている。

【0290】

以上のことから、光パルス時間拡散器を構成する単位FBGの Δn の値がアボダイズされているこの発明の第2の光パルス時間拡散装置によれば、相互相関波成分に対する自己相関波成分成分へのエネルギー分配比が大きく取れ、自己相関波のピーク強度が、相互相関波のピーク強度に比べて十分に大きく取れるという効果が得られることが分かる。

【0291】

<光多重伝送システム>

この発明の第1及び第2の光パルス時間拡散装置は、この発明の光多重伝送システムに適用して好適である。すなわち、この発明の光パルス時間拡散装置を符号器及び復号器として採用することで、この発明の光多重伝送システムが実現できる。

10

【0292】

図20を参照して、この発明の光多重伝送システムの構成及びその機能について説明する。図20は、この発明の光多重伝送システムの概略的ブロック構成図である。図20において信号の経路に付された番号は、経路そのものを指示するほか、それぞれの経路を伝播する光パルスあるいはチップパルスの列等の信号を意味することもある。

【0293】

この発明の光多重伝送システムは、送信側装置140に符号器150-1～150-4を具え、受信側装置180に復号器184-1～184-4を具え、符号器150-1～150-4及び復号器184-1～184-4は、この発明の第1あるいは第2の光パルス時間拡散装置の同一の光パルス時間拡散器が使われる。

20

【0294】

第1～第nチャンネルは、それぞれ第1～第4光パルス時間拡散器に対応付けられている。

【0295】

送信側装置140において、符号器150-1～150-4によって第1～第4チャンネルの光パルス信号を符号化して符号化光パルス信号を生成し、第1～第4チャンネルの符号化光パルス信号を多重して多重光パルス信号を生成し、受信側装置180において、復号器184-1～184-4によって多重光パルス信号をチャンネルごとに復号化して第1～第4チャンネルのそれぞれの光パルス信号を再生する機能具备している。

【0296】

30

図20では4チャンネル構成の例が示してあるが、この発明の光多重伝送システムは、4チャンネルに限られるものではなく、チャンネル数がいくつの構成であっても、以下の説明は同様に成立する。図20で、符号器150-1から150-4と示されている部分の構成要素が、送信側に設置されるこの発明の第1あるいは第2の光パルス時間拡散装置が具える、第1から第4光パルス時間拡散器に対応する。また、復号器184-1から復号器184-4と示されている部分の構成要素が、受信側に設置されるこの発明の第1あるいは第2の光パルス時間拡散装置が具える、第1から第4光パルス時間拡散器に対応する。

【0297】

この発明の光多重伝送システムは、送信側装置140でチャンネルごとにチップパルスの列を生成して、合波器170で全てのチャンネルのチップパルスの列を多重して送信信号172aとして、光伝送路172を伝播させて受信側装置180に伝送する構成である。

40

【0298】

受信側装置180に伝送された全てのチャンネルのチップパルスの列が多重された送信信号172aは、分岐器182によって、チャンネル数と等しい数に強度分割される。そして強度分割された多重化されたチップパルスの列181a、181b、181c及び181dはそれぞれ、受信側装置180の受信部第1チャンネル200、受信部第2チャンネル202、受信部第3チャンネル204及び受信部第4チャンネル206に入力される。

【0299】

まず、各チャンネルの送信信号である光パルス信号を生成するための基となる光パルス列を発生させてその光パルス列を各チャンネルに供給する機能部分について説明する。こ

50

の部分はパルス光源142と分岐器144を具えて構成される。

【0300】

パルス光源142は、例えば、分布帰還形半導体レーザ（DFB-LD）を用いて構成することができる。このDFB-LDから出力される連続波光を光変調器（図示せず。）で光パルス列に変換してこの光パルス列を一本の光ファイバー端から出力するように構成された光源が、パルス光源142である。パルス光源142の出力光143は分岐器144によって、チャンネル数分（ここでは4つ）に強度分割されて、各チャンネルに分配される。すなわち第1から第4チャンネルに対してそれぞれ、光パルス列145a、光パルス列145b、光パルス列145c及び光パルス列145dとして強度分割されて供給される。

【0301】

以下で行なうチップパルス生成部の説明は、各チャンネル共通の事項であるので、ここでは第1チャンネルを例にとって説明する。第1チャンネルの符号化部である送信部第1チャンネル160は、変調電気信号発生部146と、変調器148と、符号器150-1とを具えて構成される。送信部第2チャンネル162、送信部第3チャンネル164及び送信部第4チャンネル166は、送信部第1チャンネル160と同様の構造である。異なるのは、それぞれのチャンネルが具える符号器（第1あるいは第2の光パルス時間拡散器）に設定されているチャンネル識別パラメータ n である。チャンネル識別パラメータ n は、チャンネルごとに相異なるものが設定される。例えば、第1から第4チャンネルのそれぞれに、 $n=1$ から4を割り当てる。これによって、チャンネルごとに独立して光パルス信号を送受信できる。

【0302】

図20において、符号器150-1から符号器150-4は、光パルス時間拡散装置を構成する光パルス時間拡散器36-1から36-4（ $s=4$ に相当する。）に、それぞれ対応する。

【0303】

送信部第1チャンネル160は、第1チャンネルの光パルス信号を、第1チャンネル用に設置された符号器を用いて時間拡散して、チップパルス列を生成するチップパルス変換ステップを実行する部分である。

【0304】

上述したように、送信部第1チャンネル160を構成するための必須構成要素は、変調電気信号発生部146、変調器148及び符号器150-1である。この符号器150-1には、チャンネル識別パラメータ n が1に設定されたSSFBGによる光パルス時間拡散器が使われている。同様に第2、第3及び第4チャンネルに設置されている符号器には、それぞれ、チャンネル識別パラメータ $n=2$ 、 $n=3$ 及び $n=4$ が設定されたSSFBGによる光パルス時間拡散器が使われている。

【0305】

変調電気信号発生部146は、送信信号を担う電気パルス信号147を発生させる。電気パルス信号147は、第1チャンネルに割り当てられた送信情報が反映された2値デジタル電気信号として生成された電気信号である。変調器148は、光パルス列145aを、電気パルス信号147によって、光パルス信号149に変換する。光パルス列145aは、変調器148によって電気パルス信号147を反映したRZフォーマットに強度変調されて、光パルス信号149として生成される。

【0306】

符号器150-1は、光パルス信号149を、時間拡散してチップパルスの列161を生成する。また、受信側装置180の受信部第1チャンネル200に具えられる復号器184-1には、符号器150-1と同一の相対位相の構造が設定された（チャンネル識別パラメータ $n=1$ が設定された）光パルス時間拡散器が使われる。すなわち、復号器184-1は、強度分割されて第1チャンネルに割り当てられた符号化光パルス信号181aを、第1チャンネルの符号器と同一のチャンネル識別パラメータ $n=1$ が設定された光パルス時間拡散器を用いて、チップパルスの列を復号化する。その結果、復号器184-1では、第1チャンネルの光パルス信号の自己相関波成分及び第2から第4チャンネルの光パルス信号の相互相関波成分を含む再生光パルス信号が生成される。

10

20

30

40

50

【 0 3 0 7 】

図20において、復号器184-1から復号器184-4は、光パルス時間拡散装置を構成する光パルス時間拡散器36-1から光パルス時間拡散器36-4 ($s = 4$ に相当する。)に、それぞれ対応する。

【 0 3 0 8 】

復号器184-1において、再生された自己相関波成分185は、受光器190によって電気信号に変換されて、第1チャンネルの受信信号191が生成される。この受信信号191の波形は、送信側装置140の送信部第1チャンネル160が具えている変調電気信号発生部146から出力される電気パルス信号147を反映した信号である。こうして、第1チャンネルを通じて送信されるべき電気パルス信号147は、受信側装置180によって第1チャンネルの受信信号191として受信される。

10

【 0 3 0 9 】

受信側装置180の受信部第2チャンネル202、受信部第3チャンネル204及び受信部第4チャンネル206においても、受信側装置第1チャンネル200と同様に、それぞれの多重化されたチップパルスの列から自己相関波が再生される。この自己相関波から、それぞれのチャンネルを通じて送信された電気パルス信号が生成される過程は同一であるので、その説明を省略する。

【 0 3 1 0 】

以上説明したように、この発明の光信号伝送方法及びこの発明の光多重伝送システムは、この発明の第1あるいは第2の光パルス時間拡散装置を利用して実現される。したがって、この発明の光多重伝送システムによれば、チャンネル数が増えてもS/N比が小さくなりにくいという効果が得られる。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 3 1 1 】

【 図 1 】 同一の符号が設定されたSSFBGを利用した符号器及び復号器の動作原理の説明に供する図である。

【 図 2 】 チップパルス列から自己相関波が生成される過程の説明に供する図である。(A)は、単位FBG 16a、16b、16c、16d、16e、16f及び16gからそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 e' 、 f' 及び g' の時間波形を示す図であり、(B)は、復号器のSSFBG 16で復号化された入力光パルスの自己相関波の時間波形を示す図である。

30

【 図 3 】 相異なる符号が設定されたSSFBGを利用した符号器及び復号器の動作原理の説明に供する図である。

【 図 4 】 チップパルス列から相互相関波が生成される過程の説明に供する図である。(A)は、単位FBG 26a、26b、26c、26d、26e、26f及び26gからそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 e' 、 f' 及び g' の時間波形を示す図であり、(B)は、復号器のSSFBG 26で復号化された入力光パルスの相互相関波の時間波形を示す図である。

【 図 5 】 この発明による各実施形態の光パルス時間拡散器に利用されるSSFBGの概略的構造を説明する図である。(A)はSSFBGの模式的な断面図であり、(B)は図5(A)に示されたSSFBGが具える第1から第N単位FBGの反射率変調度を第1から第N単位FBGの順にそれぞれ示した図である。

40

【 図 6 】 第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成するSSFBGの模式的な図であり、(A)はSSFBGの模式的な断面図であり、(B)はSSFBGの屈折率変調構造を概略的に示す図であり、(C)は、光ファイバーのコアの屈折率変調構造を一部拡大して示す図である。

【 図 7 】 この発明の第1の光パルス時間拡散装置の概略的構成図である。

【 図 8 】 同一の符号が設定された1組のSSFBGを利用した第1の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理の説明に供する図である。(A)は動作原理の説明に供する図であり、(B)は、単位FBG 46a、46b、46c及び46dからそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a' 、 b' 、 c' 及び d' の時間波形を示す図であり、(C)は、SSFBG 46で生成された入力光パルスの

50

自己相関波の時間波形を示す図である。

【図 9】相異なる符号が設定された一組の SSFBG を利用した第 1 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理の説明に供する図である。(A) は動作原理の説明に供する図であり、(B) は、単位 FBG 56a、56b、56c 及び 56d からそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a'、b'、c' 及び d' の時間波形を示す図であり、(C) は、SSFBG 56 で生成された入力光パルスの相互相関波の時間波形を示す図である。

【図 10】第 1 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位 FBG の個数が 16 個である場合の第 1 単位 FBG ~ 第 16 単位 FBG のそれぞれの反射率変調度を示す図である。

【図 11】第 1 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位 FBG のアポダイズの強さに対する (自己相関波パワー) / (相互相関波パワー) の値を示す図である。

【図 12】第 2 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する SSFBG の模式的な断面図であり、(A) は SSFBG の模式的な断面図であり、(B) は SSFBG の屈折率変調構造を概略的に示す図であり、(C) は、光ファイバーのコアの屈折率変調構造を一部拡大して示す図である。

【図 13】第 2 の光パルス時間拡散装置の概略的構成図である。

【図 14】同一の屈折率周期構造を作りつけた一組の SSFBG を利用したこの発明の第 2 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理についての説明に供する図である。

【図 15】(A) は、単位 FBG 66a、66b、66c、66d、66e、66f、66g 及び 66h からそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a'、b'、c'、d'、e'、f'、g' 及び h' の時間波形を示す図であり、(B) は、復号器の SSFBG 66 で復号化された入力光パルスの自己相関波を示す図である。

【図 16】相異なる屈折率周期構造を作りつけた一組の SSFBG を利用した第 2 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器によるチップパルス列の生成及び、チップパルス列から光パルスを復元する動作原理についての説明に供する図である。

【図 17】(A) は、単位 FBG 76a、76b、76c、76d、76e、76f、76g 及び 76h からそれぞれブラッグ反射されるチップパルス a'、b'、c'、d'、e'、f'、g' 及び h' の時間波形を示す図であり、(B) は、復号器の SSFBG 76 で復号化された入力光パルスの相互相関波を示している。

【図 18】第 2 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位 FBG の個数が 32 個である場合の第 1 単位 FBG ~ 第 32 単位 FBG のそれぞれの反射率変調度を示す図である。

【図 19】第 2 の光パルス時間拡散装置が具える光パルス時間拡散器を構成する単位 FBG のアポダイズの強さに対する (自己相関波パワー) / (相互相関波パワー) の値を示す図である。

【図 20】この発明の光多重伝送システムの概略的ブロック構成図である。

【符号の説明】

【0312】

10、20、40、50、60、70：符号器の SSFBG

12、14、22、24、30-1、30-2、30-n、30-s、42、44、52、54、62、64、72、74：光サーキュレータ

16、26、46、56、66、76：復号器の SSFBG

18、28、48、58、68、78：光ファイバー伝送路

36-1：第 1 光パルス時間拡散器

36-2：第 2 光パルス時間拡散器

36-n：第 n 光パルス時間拡散器

36-S：第 s 光パルス時間拡散器

10

20

30

40

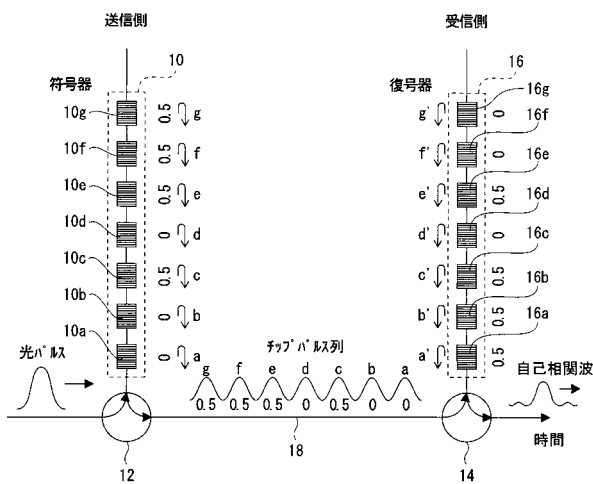
50

140 : 送信側装置
 142 : パルス光源
 144、182 : 分岐器
 146 : 変調電気信号発生部
 148 : 変調器
 150 : SSFBG
 150-1、150-2、150-3、150-4 : 符号器
 152 : クラッド
 154 : コア
 156 : 光ファイバー
 160 : 送信部第1チャンネル
 162 : 送信部第2チャンネル
 164 : 送信部第3チャンネル
 166 : 送信部第4チャンネル
 170 : 合波器
 172 : 光伝送路
 180 : 受信側装置
 184-1、184-2、184-3、184-4 : 復号器
 200 : 受信部第1チャンネル
 202 : 受信部第2チャンネル
 204 : 受信部第3チャンネル
 206 : 受信部第4チャンネル

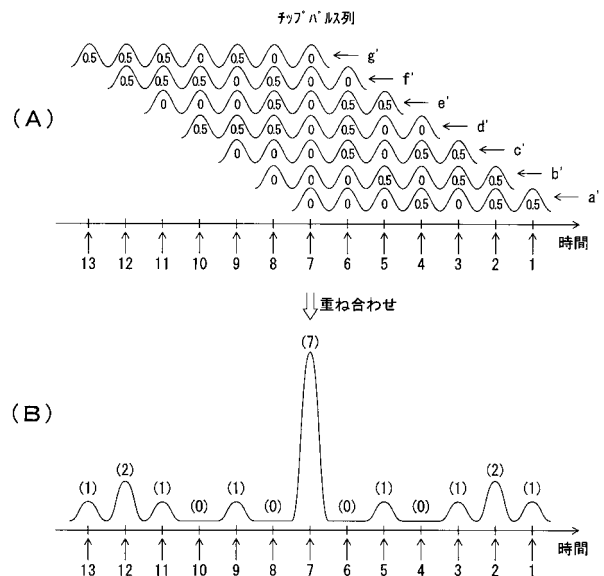
10

20

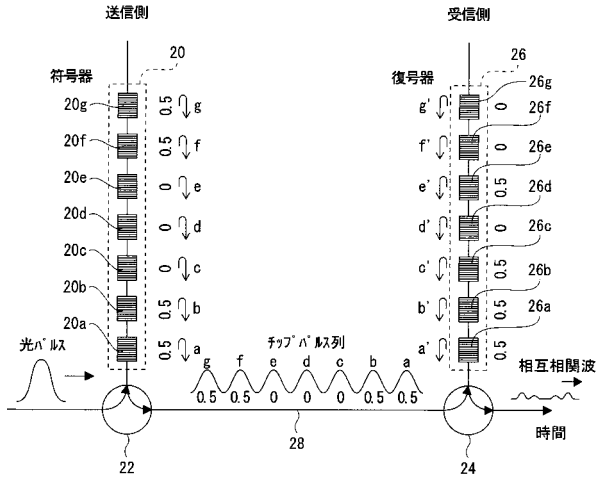
【図 1】



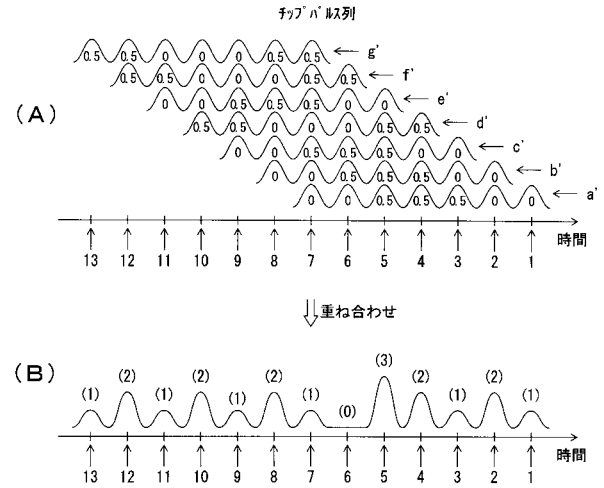
【図 2】



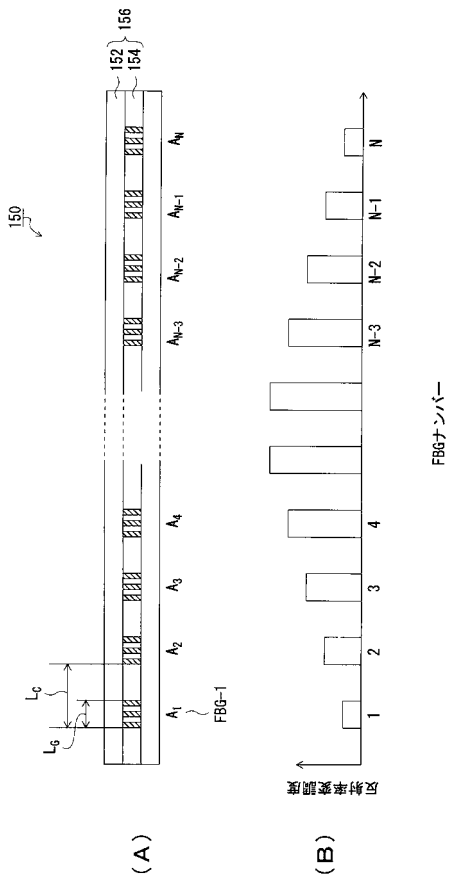
【図 3】



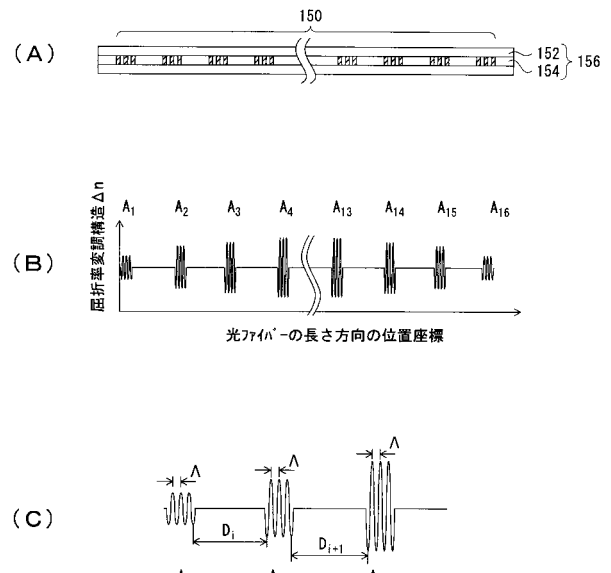
【図 4】



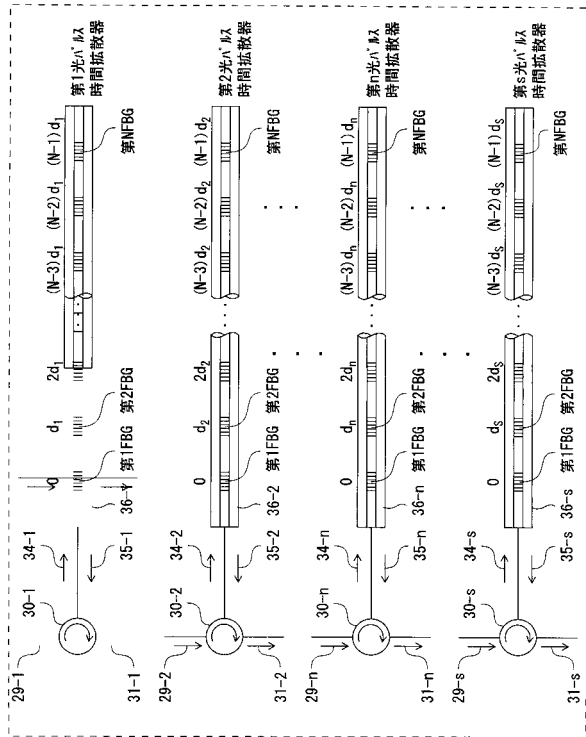
【図 5】



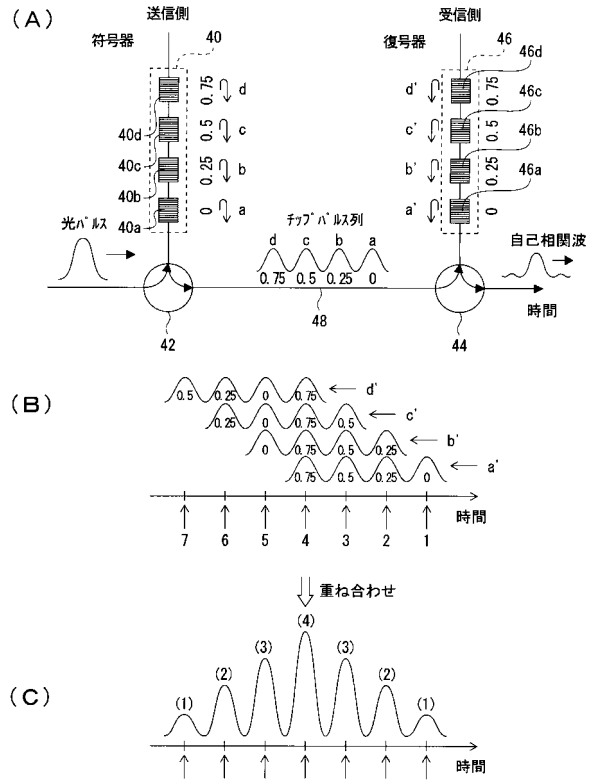
【図 6】



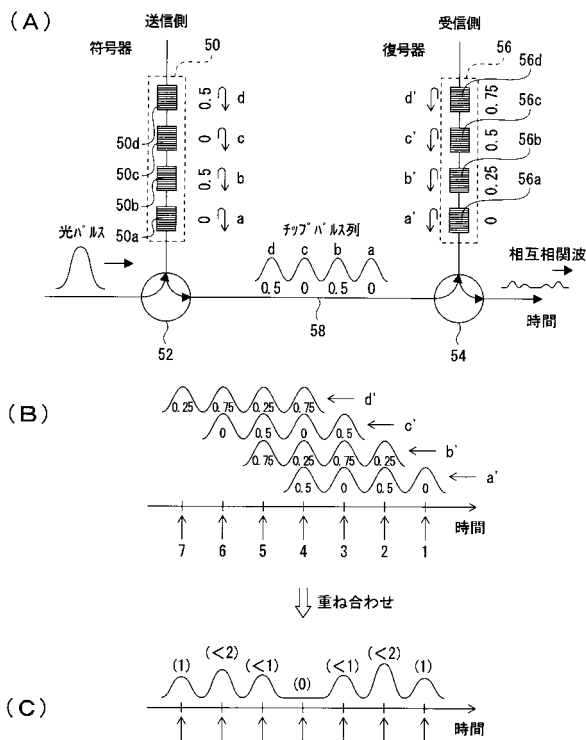
【図 7】



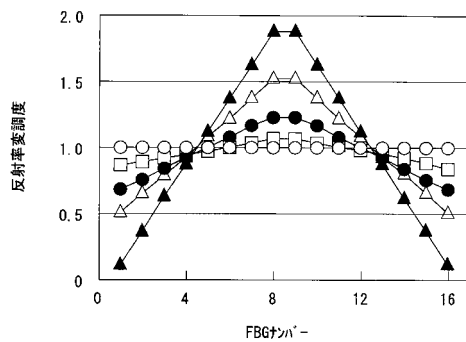
【図 8】



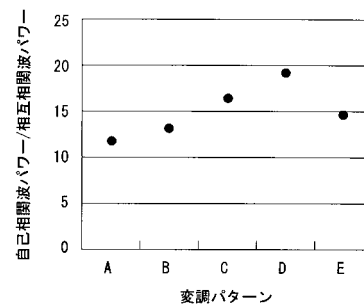
【図 9】



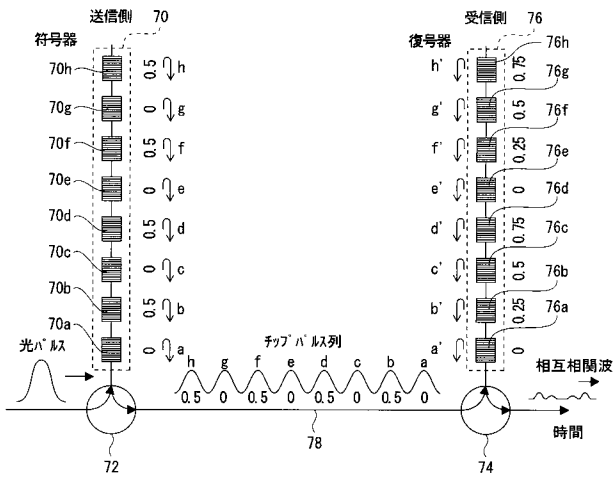
【図 10】



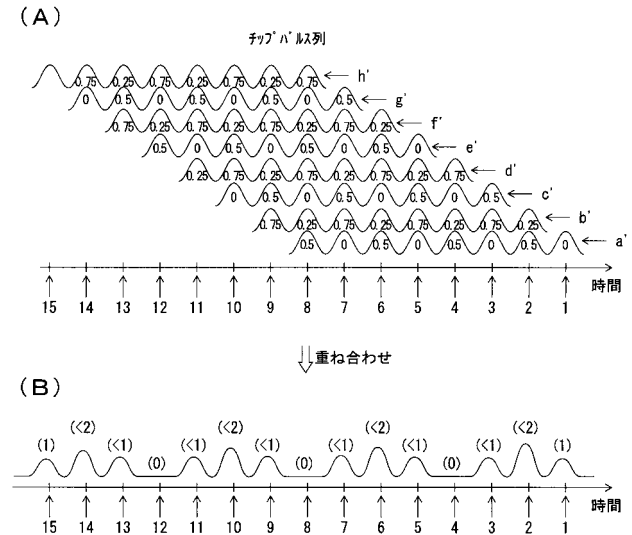
【図 11】



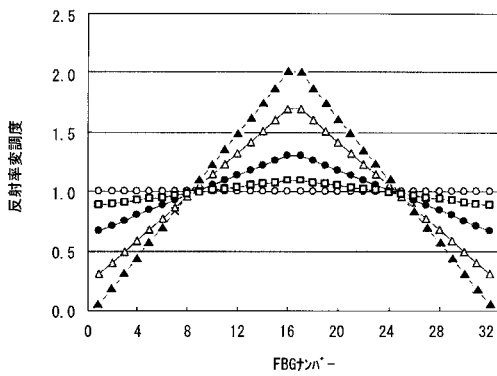
【図 16】



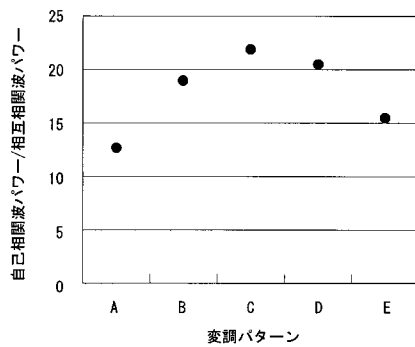
【図 17】



【図 18】



【図 19】



【図 20】

