

(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2006-171677

(P2006-171677A)

(43) 公開日 平成18年6月29日(2006.6.29)

(51) Int. Cl.

G02F 1/365 (2006.01)

F I

G02F 1/365

テーマコード(参考)

2K002

審査請求有 請求項の数 11 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2005-145493 (P2005-145493)
 (22) 出願日 平成17年5月18日(2005.5.18)
 (31) 優先権主張番号 特願2004-336067 (P2004-336067)
 (32) 優先日 平成16年11月19日(2004.11.19)
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(71) 出願人 503360115
 独立行政法人科学技術振興機構
 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
 (71) 出願人 000005290
 古河電気工業株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
 (74) 代理人 100090033
 弁理士 荒船 博司
 (74) 代理人 100093045
 弁理士 荒船 良男
 (72) 発明者 小関 泰之
 千葉県市原市八幡海岸通6番地 古河電気
 工業株式会社ファイテルフォトンクス研究
 所内

最終頁に続く

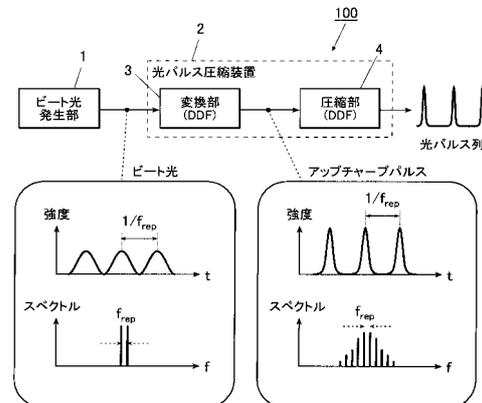
(54) 【発明の名称】 光パルス圧縮装置、光パルス発生装置及び光パルス圧縮方法

(57) 【要約】

【課題】 光パルスを圧縮するファイバの分散プロファイルを最適化し、高品質な圧縮パルスを発生可能にする。

【解決手段】 光パルス発生装置100は、ビート光を発生するビート光発生部1と、光パルス圧縮装置2により構成され、光パルス圧縮装置2は、変換部3と圧縮部4により構成される。変換部3は、入力端から出力端に向けた長手方向に異常分散値が減少するDDF(分散減少ファイバ)により構成され、ビート光発生部1から入力されたビート光をアップチャープパルスに変換し、圧縮部4は、異常分散値が長手方向の位置に比例して減少するDDFにより構成され、変換部3から入力されたアップチャープパルスの時間幅を圧縮し、光パルス列として出力する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ビート光を入力し、当該ビート光の時間幅を圧縮して光パルスを発生する光パルス圧縮装置において、

入力端から出力端の方向に異常分散値が減少し、前記ビート光をアップチャープパルスに変換する変換部と、

入力端から出力端の方向の位置に比例して異常分散値が減少し、前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮する圧縮部と、

を備えることを特徴とする光パルス圧縮装置。

【請求項 2】

前記圧縮部では、入力端における分散長の 4 倍～6 倍の距離で異常分散値が半減することを特徴とする請求項 1 に記載の光パルス圧縮装置。

【請求項 3】

前記変換部及び/又は前記圧縮部は、分散減少ファイバであることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光パルス圧縮装置。

【請求項 4】

前記変換部及び/又は前記圧縮部は、非線形ファイバと線形ファイバを交互に接続したコム状プロファイルファイバであることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光パルス圧縮装置。

【請求項 5】

前記コム状プロファイルファイバは、入力端に配置される非線形ファイバの長手方向の長さが、その次に配置される非線形ファイバよりも短いことを特徴とする請求項 4 に記載の光パルス圧縮装置。

【請求項 6】

ビート光を発生するビート光発生部と、請求項 1～5 の何れか一項に記載の光パルス圧縮装置を備えることを特徴とする光パルス発生装置。

【請求項 7】

ビート光を発生し、

入力端から出力端の方向に異常分散値が減少する変換器を用いて前記ビート光をアップチャープパルスに変換し、

入力端から出力端の方向の位置に比例して異常分散値が減少する圧縮器を用いて前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮することを特徴とする光パルス圧縮方法。

【請求項 8】

入力端における分散長の 4 倍～6 倍の距離で異常分散値が半減する圧縮器を用いて、前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮することを特徴とする請求項 7 に記載の光パルス圧縮方法。

【請求項 9】

前記変換器及び/又は前記圧縮器は、分散減少ファイバであることを特徴とする請求項 7 又は 8 に記載の光パルス圧縮方法。

【請求項 10】

前記変換器及び/又は前記圧縮器は、非線形ファイバと線形ファイバを交互に接続したコム状プロファイルファイバであることを特徴とする請求項 7 又は 8 に記載の光パルス圧縮方法。

【請求項 11】

前記コム状プロファイルファイバは、入力端に配置される非線形ファイバの長手方向の長さが、その次に配置される非線形ファイバよりも短いことを特徴とする請求項 10 に記載の光パルス圧縮方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

20

30

40

50

本発明は、光パルス圧縮装置、光パルス圧縮装置を備える光パルス発生装置及び光パルス圧縮方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、光ファイバを用いた光パルス圧縮装置は広く用いられてきた。光ファイバの特徴として、その低損失性に起因する高効率な非線形媒質であること、かつ分散の制御性に優れることが挙げられており、これらの特徴を活用した様々な光パルス圧縮装置が提案されている。

【0003】

これらの中でも、非特許文献1に示されるように、異常分散性を有し、その分散値の絶対値を長手方向に対して徐々に減少させる分散減少ファイバ（DDF：Dispersion Decreasing Fiber）は、比較的高品質な光パルスを発生可能な手段として知られている。 10

【0004】

また、特許文献1に示されるように、非線形性の高いファイバと分散性の高いファイバを適切な長さを以って交互に接続したコム状プロファイルファイバ（CPF：Comb-like Profiled Fiber）も、DDFと同様に比較的高品質な光パルスを発生可能な手段として知られている。更に、特許文献2に示されるように、DDFは、超広帯域光の発生にも使用可能であることが知られている。

【特許文献1】特開2004-117590号公報

【特許文献2】特開平10-90737号公報 20

【非特許文献1】S. V. Chernikov, E. M. Dianov, D. J. Richardson and D. N. Payne, "Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber," Opt. Lett., vol. 18, no. 7, pp. 476-478, 1993.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述したように、DDF及びCPFによる光パルス圧縮装置は、比較的高品質な光パルスを発生可能であることが知られている。しかしながら、これらDDF及びCPFは、入力パルス及び出力パルスのパラメータに合わせた分散値及び長さの設計が必要であるが、これらの分散値の長手分布が最適ではない場合、光パルスの品質が低下してしまうという問題があった。例えば、分散値の変動が急激である場合には、圧縮された光パルスに、ペDESTALと呼ばれる非圧縮成分が付随する。一方、分散値の変動が緩やかである場合には、より長いファイバが必要であるために、分散効果が累積し、タイミングジッタ等を増加させてしまう。 30

【0006】

本発明の課題は、光パルスを圧縮するファイバの分散プロファイル（分散分布）を最適化し、高品質な圧縮パルスを発生可能にすることである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するため、請求項1に記載の発明は、ビート光を入力し、当該ビート光の時間幅を圧縮して光パルスを発生する光パルス圧縮装置において、入力端から出力端の方向に異常分散値が減少し、前記ビート光をアップチャープパルスに変換する変換部と、入力端から出力端の方向の位置に比例して異常分散値が減少し、前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮する圧縮部と、を備えることを特徴としている。 40

【0008】

請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の光パルス圧縮装置において、前記圧縮部では、入力端における分散長の4倍～6倍の距離で異常分散値が半減することを特徴としている。

【0009】

請求項3に記載の発明は、請求項1又は2に記載の光パルス圧縮装置において、前記変 50

換部及び/又は前記圧縮部は、分散減少ファイバであることを特徴としている。

【0010】

請求項4に記載の発明は、請求項1又は2に記載の光パルス圧縮装置において、前記変換部及び/又は前記圧縮部は、非線形ファイバと線形ファイバを交互に接続したコム状プロファイルファイバであることを特徴としている。

【0011】

請求項5に記載の発明は、請求項4に記載の光パルス圧縮装置において、前記コム状プロファイルファイバは、入力端に配置される非線形ファイバの長手方向の長さが、その次に配置される非線形ファイバよりも短いことを特徴としている。

【0012】

請求項6に記載の発明は、ビート光を発生するビート光発生部と、請求項1～5の何れか一項に記載の光パルス圧縮装置を備えることを特徴としている。

【0013】

請求項7に記載の発明は、ビート光を発生し、入力端から出力端の方向に異常分散値が減少する変換器を用いて前記ビート光をアップチャープパルスに変換し、入力端から出力端の方向の位置に比例して異常分散値が減少する圧縮器を用いて前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮することを特徴としている。

【0014】

請求項8に記載の発明は、請求項7に記載の光パルス圧縮方法において、入力端における分散長の4倍～6倍の距離で異常分散値が半減する圧縮器を用いて、前記アップチャープパルスの時間幅を圧縮することを特徴としている。

【0015】

請求項9に記載の発明は、請求項7又は8に記載の光パルス圧縮方法において、前記変換器及び/又は前記圧縮器は、分散減少ファイバであることを特徴としている。

【0016】

請求項10に記載の発明は、請求項7又は8に記載の光パルス圧縮方法において、前記変換器及び/又は前記圧縮器は、非線形ファイバと線形ファイバを交互に接続したコム状プロファイルファイバであることを特徴としている。

【0017】

請求項11に記載の発明は、請求項10に記載の光パルス圧縮方法において、前記コム状プロファイルファイバは、入力端に配置される非線形ファイバの長手方向の長さが、その次に配置される非線形ファイバよりも短いことを特徴としている。

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、ビート光をアップチャープパルスに変換し、このアップチャープパルスの時間幅を圧縮することにより、ペDESTAL発生が抑制され、ジッタの少ない圧縮パルスを得ることができるため、圧縮される光パルスの品質を高めることができる。

【0019】

また、ビート光を種光として用いることにより、超高周波信号を容易に作成することができ、超高周波信号を活用する光パルス発生が実現可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0020】

以下、図面を参照して、本発明の第1～第3の実施の形態を詳細に説明する。

【0021】

(第1の実施形態)

図1～図12を参照して、本発明の第1の実施形態を説明する。

まず、第1の実施形態における構成について説明する。図1に、第1の実施形態に係る光パルス発生装置100の構成を示す。光パルス発生装置100は、図1に示すように、ビート光発生部1、光パルス圧縮装置2により構成される。光パルス圧縮装置2は、変換部(変換器)2及び圧縮部(圧縮器)4により構成される。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 2 】

ビート光発生部 1 は、周波数の異なる 2 つのレーザ光を重ね合わせることによって、両レーザ光の差周波数で強度変化するビート光を生成し、生成されたビート光を光増幅器（図示略）により増幅させ、光パルス圧縮装置 2 の変換部 3 に出力する。ビート光の使用による利点は、100GHz以上の超高周波信号を容易に生成できる点である。例えば、2 台の半導体レーザを用いてビート光を発生させる場合には、これらの半導体レーザへの注入電流及び温度を介してレーザ光の波長を適切に制御することによって周波数を自在に制御することができる。

【 0 0 2 3 】

変換部 3 は、入力端から出力端に向けた長手方向に異常分散値が減少する D D F（Dispersion Decreasing Fiber）により構成され、ビート光発生部 1 から入力されたビート光をアップチャープパルスに変換し、このアップチャープパルスを圧縮部 4 に出力する。

【 0 0 2 4 】

圧縮部 4 は、異常分散値が長手方向の位置（距離） z に比例して減少する D D F（図 2 参照）により構成され、変換部 3 から入力されたアップチャープパルスの時間幅を圧縮し、光パルス列として出力する。

【 0 0 2 5 】

以下、圧縮部 4 の分散プロファイルと、変換部 3 の分散プロファイルについて詳細に説明する。

【 0 0 2 6 】

<圧縮部の分散プロファイル>

まず、D D F 中のソリトン圧縮についての一般的な解釈を説明する。光パルスのファイバ伝搬に伴う波形変化は、式（1）の非線形シュレーディンガー方程式で良く記述できることが知られている。

【 数 1 】

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式（1）において、 $A(z, t)$ は光パルスの複素電界であり、 β_2 及び γ は、それぞれ、ファイバの分散値、非線形定数である。

【 0 0 2 7 】

ここで、D D F の入力端（ $z = 0$ ）における光パルスの光電界 $A(0, t)$ を、式（2）に示すようなソリトン波形と仮定する。

【 数 2 】

$$A(0, t) = \sqrt{P} \operatorname{sech}(t/T_0) \quad (2)$$

式（2）において、 P は光パルスのピークパワーであり、 T_0 はパルス幅（パルスの時間幅）である。このとき、ソリトン次数 N は式（3）のように表される。

【 数 3 】

$$N = \sqrt{\gamma P T_0^2 / |\beta_2|} \quad (3)$$

ソリトンは、ファイバ伝搬と共に $N = 1$ を保つように T_0 及び P を変化させる性質を有する。 $|\beta_2|$ が長手方向に減少する場合、ソリトンはパルス幅 T_0 を $|\beta_2|$ に比例して減少させるとともに、ピークパワー P を T_0 に反比例して高める。このようにして、D D F 中で光パルス圧縮が生ずる。

【 0 0 2 8 】

D D F の異常分散値をソリトンの伝播距離 z に対して直線的に変化させることにより、ソリトンに作用する分散減少の割合を一定に保つことができる。以下にその詳細を示す。

【 0 0 2 9 】

10

20

30

40

50

ソリトンの伝搬距離 z の基準が分散長 $L_D(z) = T_0^2(z) / \beta_2(z)$ であることを考慮すると、ソリトンに作用する分散減少の割合が一定であるという条件は式(4)で表される。

【数4】

$$\frac{1}{\beta_2(z)} \frac{d\beta_2(z)}{dz} L_D(z) = -S \quad (4)$$

式(4)において S は、分散減少の割合を表す定数(スロープ)である。式(4)の微分方程式を解くことにより、式(5)に示すように、DDFの分散値 $\beta_2(z)$ が得られる。

【数5】

$$\beta_2(z) = \beta_2(0) \left(1 - \frac{S}{L_D(0)} z \right) \quad (5)$$

10

式(5)は、 $\beta_2(0) < 0$ 、 $S > 0$ である場合、図2に示すように、 $-\beta_2(z)$ (又は $|\beta_2(z)|$) が入力端から出力端に向けた長手方向に直線的に減少する分散プロファイルであることを示している。このようにして、直線プロファイルにおいて圧縮パルスに作用する分散減少の割合が一定に保たれることがわかる。

【0030】

また、式(4)を満たす分散プロファイルを有するDDF中においては、以下に示すように自己相似圧縮パルスが存在する。自己相似圧縮パルスとは、式(4)の分散プロファイルを有するDDF中で自己相似性を保ったまま伝搬可能なパルスである。自己相似圧縮パルスを圧縮部4の入力パルスとして用いることによって、ペDESTAL発生のない光パルス圧縮が可能となる。自己相似の関係は、数学的には式(6)のように表される。

20

【数6】

$$A'(t) = \sqrt{R} A(Rt) \exp i\phi \quad (6)$$

ここで、 $A(t)$ 及び $A'(t)$ は、それぞれ、圧縮前、圧縮後の複素光電界であり、 R は光パルスの圧縮率、 ϕ は圧縮に伴う位相変化である。

【0031】

DDF中を伝播する自己相似圧縮パルスは、平均化法を用いた数値計算により求めることが可能である。図3に、平均化法のフローチャートを示す。

30

【0032】

まず、初期パルスが $A(t)$ に設定される(ステップS1)。次いで、式(1)のシュレーディンガー方程式を解くことにより、DDFによる圧縮後のパルス波形 $A_1(t)$ が算出される(ステップS2)。

【0033】

次いで、 $A(t)$ と $A_1(t)$ の位相を合わせるために、 $A_1(t) \exp[-i\{\arg A_1(0)\}]$ が、新たに $A_1(t)$ に設定される(ステップS3)。そして、 $A(t) + R^{-1/2} A_1(R^{-1}t)$ が、新たに $A(t)$ に設定される(ステップS4)。

【0034】

次いで、 $A(t)$ のエネルギーを一定に保つために、ステップS4で設定された $A(t)$ の振幅が調整される(ステップS5)。次いで、ステップS1に戻り、ステップS5で振幅が調整された $A(t)$ が初期パルスとして設定され(ステップS1)、ステップS2~S5の処理が繰り返される。図3に示した処理は、ステップS3で設定された $A_1(t)$ を圧縮後の複素光電界 $A'(t)$ として、圧縮前の光電界 $A(t)$ と、圧縮後の光電界 $A'(t)$ の関係が、式(6)の関係を満たすまで繰り返される。

40

【0035】

図4に、図3の平均化法で求めたDDF中の自己相似圧縮パルスの伝播の様子を示す。図4では、ここでの説明を一般化するため、伝播距離として規格化伝播距離 $z = z / L_D(0)$)を用い、非線形定数を $W = 1/W/km$ 、 $z = 0$ における分散値を $\beta_2(0) = -1 \text{ ps}^2/km$ 、スロープを $S = 1/10$ に設定し、パルスエネルギーを 2 pJ に設定している。図4(a)は、規格

50

化伝播距離、時間、強度の関係を表す波形を示しており、図4(b)は、規格化伝播距離、周波数、スペクトルの関係を表す波形を示している。図4の場合、異常分散値は、式(5)より、 $\beta_2(z) = 1 - S = 1 - 1/10$ となる。従って、 $S = 5$ における異常分散値及びパルス幅 T_0 は、 $z = 0$ におけるこれらの値の半分となる。

【0036】

このようにして圧縮部4のDDFにより圧縮された光パルス $A'(t)$ は、入力パルス $A(t)$ と式(6)に示すような自己相似の関係にある。従って、圧縮前の自己相似圧縮パルスが本来有するペDESTAL量と比較して、圧縮後のペDESTAL量が増大することはない。一方、ソリトン波形の入力パルスを圧縮部4のDDF中で伝播させてパルス圧縮を行う場合には、圧縮に伴って非ソリトン成分が残留するため、ペDESTAL発生は避けられない。

10

【0037】

式(5)における最適な S の範囲を求めるため、様々な S の値で得られる自己相似圧縮パルスを算出した結果を図5に示す。図5(a)は、時間、強度(実線)及び瞬時周波数(点線)の関係を表す波形を示し、図5(b)は、対数軸における時間及び強度の関係を表す波形を示し、図5(c)は、周波数とスペクトルの関係を表す波形を示す。

【0038】

図5に示した算出結果より、以下の知見が得られる。

[1] 図5(a)の瞬時周波数(点線)より、自己相似圧縮パルスはアップチャープを有するパルスである。

[2] S が小さくなるほど(即ち、分散減少の割合が小さくなるほど)、自己相似圧縮パルスはソリトン波形に近づく。

20

[3] $S < 1/8$ の場合の自己相似圧縮パルスは、線形なアップチャープを有するソリトンパルスで良く近似でき、またスペクトル形状が滑らかである。なお、 S が小さいほどこれらの特徴が強いようであるが、 $S < 1/12$ の場合には判別できるほどの変化はない。

[4] $1/8 < S < 1/6$ の場合、図5(b)から明らかなように、強度波形はペDESTALを有する。また、図5(a)及び(c)より、それぞれ、チャープが線形でないことと、スペクトルに大きな歪みが存在することが見てとれる。従って、 $1/8 < S < 1/6$ における自己相似圧縮パルスを用いる場合、ペDESTAL発生は避けられない。

[5] $S > 1/6$ の場合、自己相似圧縮パルスは非常に不安定であるか、又は存在できない。

【0039】

30

以上の点から、 $S < 1/8$ のDDF及び自己相似圧縮パルスを用いることにより、ペDESTAL発生が抑制された高品質なパルス圧縮が可能であることがわかる。一方で、 S を小さくしすぎると、DDFの総分散量(即ち、 $|\beta_2(z)|$ を長手方向に積分して得られる値)が増大する。このようなファイバを用いてパルス圧縮を行うと、パルスのタイミングジッタが増大することが知られている。このことは、下記の文献に示されている。

K. Tamura and M. Nakazawa, "Timing jitter of solitons compressed in dispersion-decreasing fibers," Opt. Lett., vol. 23, no. 17, pp. 1360-1362, 1998.

【0040】

以上の理由から、圧縮部4を構成するDDFの設計における最適条件は、 $1/12 < S < 1/8$ であるといえる。式(5)より、圧縮部4におけるDDFの異常分散値が、入力端($z = 0$)の分散長 $L_D(0)$ の $1/2 S$ 倍の距離で半減することを考慮すると、この最適条件は、入力端の分散長の4倍から6倍の距離を以って異常分散値が半減することを意味する。

40

【0041】

なお、図5に示す数値計算は、特定の非線形定数、分散値 $\beta_2(0)$ 、パルスエネルギーに基づいて行ったものであるが、上記の結果はスケーリングによって他のパラメータの場合にも適用可能である。また、 S が無次元量であることに注意すれば、上記の S に関する議論はスケーリングによらない一般的な議論である。

【0042】

次に、圧縮部4のDDFによるパルス圧縮においてアップチャープパルスの使用が有効な理由について、図6及び図7を参照して説明する。

50

【0043】

図6(a)に、自己相似圧縮パルスを用いた場合の時間-強度波形、周波数-スペクトル波形を示し、図6(b)に、ソリトンパルスを用いた場合の時間-強度波形、周波数-スペクトル波形を示す。図6に示すように、DDFの入力パルスとしてチャープの無い(即ち、瞬時周波数が一定の)ソリトンパルスを用いる場合、DDFから出力されるパルスにペDESTALが発生する。以下、ペDESTALが発生する原因を定性的に説明する。

【0044】

光ファイバ中でのパルス形状の変化は分散効果によってもたらされる。パルス波形が圧縮されるためには、入力された光パルスがアップチャープを有し、そのアップチャープが異常分散で補償される必要がある。

10

【0045】

一方、入力パルスとしてチャープの無い光パルスを用いる場合、図7の曲線aに示すように、DDFの入力端においては圧縮が生じない。光パルスの入力後、光パルスが伝播するにつれてカー効果による過剰なアップチャープが生じ、そのアップチャープが異常分散で補償されることによってパルス圧縮が生じる。即ち、異常分散値の減少に対してパルス圧縮の遅れが生じる。このときの過剰なカー効果が、ペDESTAL発生の原因となる。従って、入力パルスに予めアップチャープを付加することによって、図7の曲線b(異常分散値に比例してパルス幅が減少する直線)に示すように、DDFの入力端からパルス圧縮を生じさせることができる。

【0046】

入力パルスが過剰なアップチャープを有する場合、図7の曲線cに示すように、DDFの入力端において過剰なパルス圧縮が生じる。即ち、異常分散値の減少に対してパルス圧縮の進みが生じ、この場合もペDESTALが発生する。

20

【0047】

以上のように、入力パルスのアップチャープの値には最適値がある。このアップチャープの最適値は、図3に示した平均化法によって求められる自己相似圧縮パルスにより得られる。

【0048】

なお、上述の[3]で示したように、 $S < 1/8$ の場合の自己相似圧縮パルスは、式(7)に示すようなリニアチャープソリトン波形で良くフィッティングできる。

30

【数7】

$$A(t) = A_0 \operatorname{sech}\left(\frac{t}{T_0}\right) \exp\left(-i \frac{Ct^2}{2T_0^2}\right) \quad (7)$$

ここで、 A_0 、 T_0 、 C は、それぞれ、ピーク振幅、時間幅、チャープパラメータを表す。自己相似圧縮パルスは、 S と C がほぼ等しい値を取るという性質を有する。従って、 $S < 1/8$ の圧縮部4に入力するパルスとして、 S と等しい C を有するリニアチャープソリトンパルスを使用することもできる。

【0049】

<変換部の分散プロファイル>

本発明のように、ビート光を種光として用い、光パルス圧縮装置により短パルスが発生する場合には、ビート光を圧縮部4のDDFへの入力光として用いることはできない。これは、ビート光の強度時間波形は正弦波であり、自己相似圧縮パルスの強度時間波形と大きく異なることによる。このため、ビート光を圧縮部4のDDFに入力すると、非圧縮成分が残留し、ペDESTALが発生する。従って、ビート光を種光とする光パルス圧縮装置2においては、変換部3により、ビート光発生部1から入力されたビート光を自己相似圧縮パルスに一旦変換する必要がある。

40

【0050】

なお、ビート光をアップチャープパルスに変換する変換部の有用性については、特許文

50

献 1 に記載されているが、本発明の変換部では、特許文献 1 よりも高精度の D D F の設計を提供する。

【 0 0 5 1 】

第 1 の実施形態では、ビート光を自己相似圧縮パルスに変換する変換部 3 を構成する D D F の分散プロファイルを見出すため、逆方向伝搬のアプローチをとることにする。図 8 に、このアプローチの模式図を示す。変換部 3 の最適化された D D F は、図 8 (a) に示すように、ビート光を自己相似圧縮パルス列に変換するが、本アプローチでは、図 8 (b) に示すように、自己相似圧縮パルス列をビート光に変換する分散プロファイルを探す。

【 0 0 5 2 】

以下、変換部 3 の D D F の分散プロファイルを最適化する手順を説明する。

10

まず、変換部 3 の D D F の分散プロファイルを式 (8) のように、伝播距離 z' の n 次の多項式で表す。

【 数 8 】

$$\beta_2(z') = \sum_{k=0}^n a_k z'^k \quad (8)$$

式 (8) では、図 8 (b) に示すように、伝播距離 z' を D D F の出力端から入力端の方向に定義している。

【 0 0 5 3 】

20

次に、式 (8) の分散プロファイルを有する D D F 中を、逆方向 (出力端から入力端の方向) に伝播する光パルス $A(z', t)$ を、自己相似圧縮パルスを入力パルス $A(0, t)$ として、式 (1) の非線形シュレーディンガー方程式により求め、ビート光との誤差の発展を求める。ここでの誤差とは、逆方向に伝播している光パルスとビート光との、複素電界の差の絶対値の 2 乗を時間積分し、この積分値を光パルスのエネルギーで規格化することによって求められる値である。

【 0 0 5 4 】

逆方向伝播している光パルスとビート光との誤差は、ある伝播距離において極小値をとる。式 (8) の分散プロファイルの m 次の係数 a_m のみを微小に変化させ、逆方向伝播する光パルスとビート光との誤差の極小値を求める。このプロセスを 0 から n までの各次数に対して行うことによって、ビート光との誤差が小さくなるように a_m を変化させることにより、最適な分散プロファイルを求めることができる。

30

【 0 0 5 5 】

図 9 に、逆方向伝搬法を用いて最適化された分散プロファイルと、逆方向伝播する光パルスとビート光との誤差の発展を示す。但し、入力パルスは、 $S = 1/10$ の直線プロファイルを有する D D F において平均化法により求めた自己相似圧縮パルスであり、この自己相似圧縮パルスを 16 p s 間隔で互いに逆位相に配置させたものを、逆方向伝搬における入力パルスとしている。この場合、図 9 に示すように、最適な分散プロファイルにおいては、伝播距離 $z' = z_0' = 11.9\text{km}$ において、逆方向伝播する光パルスとビート光との誤差が最小 ($\sim 2 \times 10^{-5}$) となり、この伝播距離で、自己相似圧縮パルスのエネルギーの 99.99 40 8% がビート光に変換される。図 10 に、最適化された分散プロファイルにおける光パルス強度波形の発展の様子を示す。図 10 より、自己相似圧縮パルスが逆方向に伝播するにつれ、ビート光に変換されていくことがわかる。

【 0 0 5 6 】

このように、逆方向伝搬法を用いて最適化された分散プロファイルでは、自己相似圧縮パルスがビート光に変換される。従って、この最適化された分散プロファイルを順方向に用いることによって、ビート光を自己相似圧縮パルスに変換することが可能となる。

【 0 0 5 7 】

逆方向伝播法を用いて最適化された分散プロファイルは、スケーリングによって様々な繰り返し周波数、エネルギーの光パルスに対しても適用可能である。一例として、図 11 50

に、繰り返し周波数160 GHzのビート光を自己相似圧縮パルスに変換するための分散プロファイルを示す。図11では、変換部3のDDFの非線形定数を20 /W/km、ビート光の強度を250 mWに設定した場合を示している。また、図11では、変換部3のDDFで変換された自己相似圧縮パルスを更に圧縮する圧縮部4のDDFの分散プロファイル(線形プロファイル)も示している。

【0058】

図11に示した構成では、変換部3の出力端における分散値及び分散値の勾配と、圧縮部4の入力端における分散値及び分散値の勾配がそれぞれ等しくなっている。この理由は以下のように説明できる。変換部3ではビート光をソリトンに変換しつつ、同時にパルスの圧縮も行っている。従って、変換部3の出力端から圧縮部4の入力端にかけて、分散値や分散値の勾配が不連続であると、図7のa、cに示されるような圧縮の遅れや進みが生じ、ペDESTALが発生する。従って、図11の構成では、変換部3の出力端における分散値及び分散値の勾配と、圧縮部4の入力端における分散値及び分散値の勾配がそれぞれ等しくなっている。このようにすることにより、変換部3での圧縮と圧縮部4での圧縮が連続的に生じ、ペDESTALの発生を抑制できる。

10

【0059】

図12(a)に、図11に示した変換部3及び圧縮部4の分散プロファイルを用いて得られる圧縮パルスの強度波形を示す。図12(a)に示すように、主パルスの周辺にサテライトパルスが付随するが、その強度は主パルスと比較して50 db程度抑圧されており、ペDESTAL発生がほとんど無いことがわかる。比較のため、変換部3を使用せずに圧縮部4のみで得られる圧縮パルスの強度波形を図12(b)に示す。圧縮部4に入力されるビート光が自己相似圧縮パルスと異なるために分散波が発生し、圧縮パルスの周辺にペDESTALとして残留する。結果として、ピーク・ペDESTAL比は28 db程度しか実現できない。

20

【0060】

以上のように、第1の実施形態の光パルス発生装置100によれば、異常分散値が長手方向に減少するDDFを用いてビート光を自己相似圧縮パルスに変換し、この自己相似圧縮パルスの時間幅を、異常分散値がDDFの長手方向の位置に比例して減少するDDFにより圧縮することにより、ペDESTAL発生が抑制され、ジッタの少ない圧縮パルスを得ることができるため、圧縮される光パルスの品質を高めることができる。

30

【0061】

また、ビート光を種光として用いることにより、超高周波信号を容易に作成することができ、超高周波信号を活用する光パルス発生が実現可能となる。

【0062】

(第2の実施形態)

次に、図13及び図14を参照して、本発明の第2の実施形態を説明する。

第2の実施形態では、第1の実施形態の変換部3及び圧縮部4を構成するDDFの代わりに、非線形ファイバと線形ファイバを交互に接続したCPF(Comb-like Profiled Fiber)を用いるものであり、第1の実施形態で示したDDFに近い特性が得られるようにCPFを設計するものである。

40

【0063】

なお、第2の実施形態及び後述する第3の実施形態においては、非線形ファイバ及び線形ファイバを以下のように定義する。下記では、非線形定数を γ 、分散値を β_2 としている。

非線形ファイバ： $\gamma > 5$ /W/km (典型値： $\gamma \sim 15$ /W/km)、
 $-3 < \beta_2 < 3$ ps²/km (典型値： $\beta_2 \sim -1$ ps²/km)；

線形ファイバ： $\gamma < 5$ /W/km (典型値： $\gamma \sim 1$ /W/km)、
 $\beta_2 < -3$ ps²/km (典型値： $\beta_2 \sim -22$ ps²/km)。

【0064】

まず、第2の実施形態における構成について説明する。図13に、第2の実施形態に係

50

る光パルス発生装置 200 の構成を示す。なお、図 13 の光パルス発生装置 200 において、第 1 の実施形態において図 1 に示した光パルス発生装置 100 と同一の構成要素には同一の符号を付し、その機能説明を省略する。

【0065】

光パルス発生装置 200 は、図 13 に示すように、ビート光発生部 1、光パルス圧縮装置 5 により構成される。光パルス圧縮装置 5 は、変換部（変換器）6 及び圧縮部（圧縮器）7 により構成される。

【0066】

変換部 6 は、非線形ファイバと線形ファイバを長手方向に交互に配置した CPF により構成され、ビート光発生部 1 から入力されたビート光をアップチャープパルスに変換し、このアップチャープパルスを圧縮部 7 に出力する。変換部 6 の CPF は、第 1 の実施形態における光パルス発生装置 100 の変換部 3 の DDF に類似した分散特性を有するように設計される。

【0067】

圧縮部 7 は、変換部 6 と同様に、非線形ファイバと線形ファイバを長手方向に交互に配置した CPF により構成され、変換部 6 から入力されたアップチャープパルスの時間幅を圧縮し、光パルス列として出力する。圧縮部 7 の CPF は、第 1 の実施形態における光パルス発生装置 100 の圧縮部 4 の DDF に類似した分散特性を有するように設計される。

【0068】

以下、変換部 6 及び圧縮部 7 を構成する CPF の設計法について説明する。

まず、第 1 の実施形態の光パルス発生装置 100 において設計された DDF の分散値を $\beta_2(z)$ 、非線形定数を γ 、DDF の長手方向の長さを L 、光パルスの圧縮率を R とする。次に、この DDF を N 個のセクションに分割し、 m 番目のセクションの長さを L_m とする。各セクションのファイバ長 L_m の決定方法は後述する。

【0069】

まず、DDF の各セクションの長さ L_m が設定されていると仮定して、各セクションに対応する CPF の非線形ファイバと線形ファイバの長さを決定する方法について説明する。第 2 の実施形態における CPF は、図 14 に示すように非線形ファイバと線形ファイバのペア（対）を複数接続した構成を有する。以下では、CPF の m 番目の非線形ファイバ及び線形ファイバの長さを、それぞれ、 $L_{NL,m}$ 、 $L_{L,m}$ とする。また、CPF の m 番目の非線形ファイバの非線形定数、分散値を、それぞれ、 γ_{NL} 、 $\beta_{2,NL}$ とし、CPF の m 番目の線形ファイバの非線形定数、分散値を、それぞれ、 γ_L 、 $\beta_{2,L}$ とする。

【0070】

第 2 の実施形態では、DDF の m 番目のセクションと、対応する CPF の非線形ファイバ及び線形ファイバとの関係が、式（9）及び式（10）を満たすように、 $L_{NL,m}$ 及び $L_{L,m}$ を決定する。

【数 9】

$$\beta_{2,NL} L_{NL,m} + \beta_{2,L} L_{L,m} = \int_{z_m}^{z_m + L_m} \beta_2(z) dz \quad (9)$$

【数 10】

$$\gamma_{NL} L_{NL,m} + \gamma_L L_{L,m} = \gamma L_m \quad (10)$$

式（9）において、 z_m は、DDF の m 番目のセクションの開始位置であり、式（11）のように定義される。

【数 11】

$$z_m = \sum_{i=1}^{m-1} L_i \quad (11)$$

【0071】

10

20

30

40

50

式(9)は、CPFの非線形ファイバと線形ファイバにおける分散効果の総和が、対応するDDFのセクションの分散効果に一致する条件を表す。また、式(10)は、CPFの非線形ファイバと線形ファイバにおける非線形効果の総和が、対応するDDFのセクションの非線形効果に一致する条件を表す。式(9)及び式(10)を全てのセクション($m=1, \dots, N$)について連立させると、 $2N$ 個の連立一次方程式となり、各セクションに対応する $L_{NL,m}$ 及び $L_{L,m}$ を容易に算出することができる。

【0072】

次に、DDFの各セクションの長さ L_m の決定方法について説明する。

まず、DDFを分割する際、各セクションにおける光パルスへの作用を均等にするように、各セクションにおいて、パルス幅とセクションの長さの関係が同一である方が好ましい。その理由は以下のように考えられる。

【0073】

DDFのあるセクションの長さが短い場合には、そのセクションに対応するCPFの非線形効果及び線形効果は小さいため、伝播する光パルスには両効果の平均が作用する。その結果として、CPFとDDFは略同一の特性を示し、高品質なパルス圧縮が可能となる。一方、DDFのあるセクションのみを長くしてしまうと、そのセクションに対応するCPFの非線形効果及び線形効果が増大してしまい、非線形効果及び線形効果がそれぞれ独立して光パルスに作用するため、CPFとDDFが異なる特性を示してしまう。その結果として圧縮後の光パルスの品質が低下する。従って、光パルスの伝搬距離の基準となるファイバ長が分散長であることを考慮すれば、各セクションの長さ L_m は、パルス圧縮に伴って短くする方がよい。

【0074】

更に、第1の実施形態に従って設計されるDDFにおいては、光パルスの圧縮過程全体において、光パルスの自己相似性が保たれるため、DDFの各セクションも自己相似的に分割することができる。従って、各セクションの長さは式(12)のように、光パルスの圧縮率 R を用いて等比数列で表される。

【数12】

$$L_m = R^{-1/N} L_{m-1} \quad (12)$$

【0075】

更に、DDFの各セクションの長さ L_m の和がDDFの全長 L に等しいという条件を用いると、各セクションの長さ L_m は、式(13)のように表される。

【数13】

$$L_m = L \frac{1 - R^{-1/N}}{1 - R^{-1}} R^{-(m-1)/N} \quad (13)$$

【0076】

上述の説明では、光損失の影響を考慮せずにCPFの設計を行う場合を示した。しかしながら、実際のCPFの設計に際しては、光損失の影響を考慮する必要がある。即ち、ファイバ中の伝搬損失及び異種ファイバの接続損失のために、CPFの各セクションにおける光強度は異なってしまふ。光損失の影響を補償するためには、式(10)を下記の式(14)のように変更すればよい。

【数14】

$$\gamma_{NL} P_{NL,m} L_{NL,m} + \gamma_L P_{L,m} L_{L,m} = \gamma P_m L_m \quad (14)$$

式(14)において、 $P_{NL,m}$ はCPFの m 番目の非線形ファイバを伝播する光の強度、 $P_{L,m}$ はCPFの m 番目の線形ファイバを伝播する光の強度であり、 P_m はDDFの m 番目のセクションを伝播する光の強度である。式(9)及び式(14)を満たすようにCPFを設計することにより、光損失の影響を排除することができる。

10

20

30

40

50

【0077】

以上のように、第2の実施形態の光パルス発生装置200によれば、第1の実施形態の光パルス発生装置100を構成するDDFと同様の性質を有するCPFを設計するため、CPFにおいても、高品質な圧縮パルスを得ることができる。

【0078】

(第3の実施形態)

次に、図15～図17を参照して、本発明の第3の実施形態を説明する。

【0079】

上述の第2の実施形態においては、CPFを構成する非線形ファイバと線形ファイバのペア数を増大させるにつれて、CPFの特性はDDFの特性に近づく。一方で、非線形ファイバと線形ファイバのペア数が少なくなるにつれて、非線形ファイバにおける非線形効果及び線形ファイバにおける線形効果は増加せざるを得ない。その結果として、CPF中では、非線形効果及び線形効果が、各々独立して光パルスに作用するため、CPFの特性はDDFの特性と異なるものとなり、光パルスの品質が低下してしまう。即ち、非線形ファイバと線形ファイバのペア数と、光パルスの品質の間にトレードオフの関係がある。第3の実施形態では、第2の実施形態で示したCPFにおける線形ファイバと線形ファイバのペア数を維持したまま、発生するペDESTAL量を低減することが可能なCPFを設計する。

10

【0080】

第3の実施形態では、入力端(1番目($m=1$)のセクションの開始位置)に配置される非線形ファイバの長さを、その次($m=2$)に配置される非線形ファイバの長さよりも短くするようにCPFを設計する。このようにすると、実質的に1番目のセクションは、非線形ファイバの長さを短くした分だけ、次のセクションに配置される非線形ファイバを含むのと等価になる。

20

【0081】

このようにして設計されたCPFは、各セクション内で見した場合、図15(a)に示すように、同一セクション内で、最初に配置されている非線形ファイバの一部(図中の)が線形ファイバの後ろ(図中の ')に配置されることによって、同一セクション内で、線形ファイバの両側に非線形ファイバが配置されることになる。この場合、図15(a)に示すように、長手方向の分散プロファイルが、同一セクション内で対称性の良い形状を有するため、以後、これを対称型CPFと呼ぶことにする。また、第2の実施形態におけるCPFは、各セクション内で見した場合、図15(b)に示すように、非線形ファイバに続いて線形ファイバが配置され、長手方向の分散プロファイルは、同一セクション内で非対称な形状となるため、以後、これを非対称型CPFと呼ぶことにする。

30

【0082】

次に、第3の実施形態に係る対称型CPFによる効果を説明する。あるセクション内の光パルスへの作用を考えると、非対称型CPFでは、必ず非線形効果が線形効果よりも先に光パルスに作用する。このため、非線形効果と線形効果のバランスが崩れてしまう。一方、対称型CPFでは、あるセクション内で、非線形効果が線形効果よりも先に光パルスに作用するが、先に作用する非線形ファイバ長は短くなっているため、続けて線形効果が作用した後、更に非線形効果が作用する構成となる。このため、同一セクション内で光パルスに作用する非線形効果と線形効果のバランスを、非対称型CPFよりも高めることが可能である。

40

【0083】

対称型CPFは、例えば、第2の実施形態に従って設計されるペア数(セクションの数)NのCPFにおいて、入力端の非線形ファイバの長さ $L_{NL,1}$ を、2番目に配置される非線形ファイバの長さ $L_{NL,2}$ の半分にするにより得ることができる。

【0084】

図16に、変換部6においてペア数 $N=50$ のCPFを使用し、繰り返し周波数が160 GHzビート光を、パルス幅が100 fsのパルス列に圧縮する場合のシミュレーション結果

50

を示す。図16(a)は、対称型CPFを使用した場合の圧縮パルスの強度波形を示し、図16(b)は、非対称型CPFを使用した場合の圧縮パルスの強度波形を示す。図16により、対称型CPFを用いると、非対称型CPFを用いる場合より、光パルスの周辺のペDESTALが減少することがわかる。

【0085】

図17に、様々なペア数Nの値に対して、対称型CPFを用いた場合と非対称型CPFを用いた場合のピーク・ペDESTAL比(ペDESTAL/ピーク)を調べた結果を示す。図17により、ペア数が同一の対称型CPFと非対称型CPFを比べると、対称型CPFを用いた場合の方が、ペDESTALが約6dB減少することがわかる。

【0086】

また、ペDESTAL量が同一であるとき、非対称型CPFより対称型CPFを用いたときの方が、CPFのペア数Nが少ない。対称型CPFを用いた場合のペア数の低減率をrとすると、ペア数Nの非対称型CPFと、ペア数rNの対称型CPFのペDESTAL量が等しいことから、図17より、 $22.5 - 35 \log_{10}(N) = 16.5 - 35 \log_{10}(rN)$ が成り立つ。この条件を満たす低減率rの値は約0.67となる。従って、対称型CPFを用いた場合、非対称型CPFを用いた場合よりも、CPFのペア数は2/3に低減できる。

【0087】

なお、第2の実施形態及び第3の実施形態の光パルス圧縮装置5を構成するCPFに入力されるビート光は、しばしば、ビート光発生部1内の光増幅器中の増幅過程において、非線形効果及び線形効果を受けている。これらの効果を考慮せずにCPFを設計すると、CPF中の圧縮過程が影響を受け、ペDESTAL等が増加する可能性がある。この影響を排除するためには、ビート光発生部1内の光増幅器をCPFの1番目(入力端)の非線形ファイバとみなしてCPFを設計すればよい。

【0088】

以上のように、第3の実施形態によれば、第2の実施形態の光パルス圧縮装置5を構成するCPFの入力端(m=1)の非線形ファイバの長さを、その次(m=2)に配置される非線形ファイバの長さよりも短く(例えば、半分の長さ)設計することにより、ペDESTALの発生が一層低減され、より高品質な圧縮パルスを得ることができる。

【0089】

(第4の実施形態)

次に、図18~図20を参照して、本発明の第4の実施形態を説明する。

第4の実施形態では、第1~第3の実施形態に基づいて設計されるCPFを使用して行う光パルス発生実験について説明する。

【0090】

図18に、第4の実施形態のパルス発生装置におけるビート光発生部10及び変換部11の構成を示す。ビート光発生部10は、2台のDFB-LD(分布帰還型レーザダイオード)12、13と、偏波保持カプラ14と、EDFA(エルビウム添加ファイバ増幅器)15により構成される。

【0091】

ビート光発生部10では、DFB-LD12及び13から出力される連続光を、偏波保持カプラ14によって合波し、合成された光をEDFA15によって増幅してビート光を発生する。ビート光の繰返し周波数、中心波長、平均パワーは、それぞれ、160GHz、1555nm、500mWである。

【0092】

変換部11は、高非線形性ファイバ(HNLF)とシングルモードファイバ(SMF)を交互に配置したCPFにより構成され、ビート光発生部10から入力されたビート光をアップチャープパルスに変換する。第4実施形態で適用されるCPFは、40ペアのHNLFとSMFから構成される。

【0093】

図19に、第4の実施形態におけるCPFの分散プロファイル(上段)と非線形プロフ

10

20

30

40

50

ファイル（下段）を示す。このC P FのH N L Fの非線形定数は $14.2 / W / \text{km}$ であり、分散 β_2 の平均値は $0.32 \text{ ps}^2 / \text{km}$ である。第4の実施形態におけるC P Fの設計に際しては、第1の実施形態で得られた分散プロファイル（図11参照）を、第2及び第3の実施形態の指針に基づいてC P Fによって模擬するように各ファイバの長さが決定される。このC P Fの総長、光損失は、それぞれ684 m、4.1 dBである。

【0094】

図20に、第4の実施形態におけるC P Fの出力パルスの測定結果を示す。図20(a)により、強度自己相関波形は、半値全幅324 fsの sech^2 パルスを仮定するフィッティング曲線に合致する。ピーク・ベデスタル比の測定値は測定系により制限され、21 dBである。図20(b)より、スペクトルは帯域幅1.0 THzの sech^2 曲線に良く一致し、スペクトルの歪が発生しないことが判る。なお、時間帯域幅積は0.32である。

10

【0095】

以上の第4の実施形態によれば、第1～第3の実施形態の指針に基づいて設計されるC P Fを使用することによって、極めて純度の高い光ソリトン列を得ることができる。

【0096】

（第5の実施形態）

次に、図21～図24を参照して、本発明の第5の実施形態を説明する。

第5の実施形態では、第1～第3の実施形態に基づいて設計されるC P Fを使用して行うテラヘルツ繰り返し光パルス発生実験について説明する。

20

【0097】

図21に、第5の実施形態のパルス発生装置におけるビート光発生部20及び変換部21の構成を示す。ビート光発生部20は、2台のD F B - L D（分布帰還型レーザダイオード）22、23と、2台のO B P F（Optical Band Pass Filter）24、25と、偏波保持カプラ26と、E D F A（エルビウム添加ファイバ増幅器）27により構成される。

【0098】

ビート光発生部20では、D F B - L D 22及び23によってそれぞれ出力される連続光から、O B P F 24、25によって特定の波長の光を抽出し、抽出された2つの光を偏波保持カプラ26によって合波し、合成された光をE D F A 27によって増幅してビート光を発生する。ビート光の繰り返し周波数、中心波長、平均パワーは、それぞれ、1.0 T 30

30

【0099】

変換部21は、H N L FとS M Fを交互に配置したC P Fにより構成され、ビート光発生部20から入力されたビート光をアップチャープパルスに変換する。図22に、H N L F及びS M Fのファイバ数とファイバ長との関係を示す。図22において、 $L_{\text{HNL F}}$ はH N L Fのファイバ長を示し、 $L_{\text{SM F}}$ はS M Fのファイバ長を示す。第5実施形態で適用されるC P Fは、15ペアのH N L FとS M Fから構成される。H N L Fの非線形定数は $14 / W / \text{km}$ であり、また分散の平均値は $0.54 \text{ ps}^2 / \text{km}$ である。各ファイバの長さの決定方法は、第4の実施形態と同様である。このC P Fの総長、光損失は、それぞれ、115 m、1.9 dBである。

40

【0100】

図23及び図24に、第5の実施形態におけるC P Fの出力パルスの測定結果を示す。図23(a)は、スキャン範囲5 psの強度自己相関波形を示し、図23(b)、(c)は、それぞれ、当該強度自己相関波形の一波形の中心部分の拡大図と、その対数プロット図を示す。図23に示す強度自己相関波形は、半値全幅97 fsの sech^2 パルスを仮定するフィッティング曲線によく一致する。図24の上段は、繰り返し周波数1.0 THzのビート光のスペクトルを示し、図24の下段は、C P Fの出力パルスのスペクトルを示す。図24の下段に示すように、C P Fの出力パルスのスペクトルは100 nm以上に亘って広がり、その半値全幅は3.5 THzである。時間帯域幅積は0.34である。

【0101】

50

以上の第5の実施形態によれば、第1～第3の実施形態で示したCPFの設計指針は、テラヘルツ繰り返し超短光ソリトン列の発生にも適用可能であり、極めて純度の高い光ソリトン列を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0102】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る光パルス発生装置の構成を示すブロック図。

【図2】図1の圧縮部(DDF)の分散プロファイルを示す図。

【図3】平均化法を用いて自己相似圧縮パルスを算出する処理を示すフローチャート。

【図4】自己相似圧縮パルスのDDFにおける伝播の数値計算結果を示す図。

【図5】様々なS(分散の長手方向におけるスロープ)に対する自己相似圧縮パルスを示す図。 10

【図6】自己相似圧縮パルスの時間-強度波形及び周波数-スペクトル波形(a)と、ソリトンパルスの時間-強度波形及び周波数-スペクトル波形(b)を示す図。

【図7】光パルスの伝播距離と、異常分散値及びパルス幅の関係を示す図。

【図8】図1の変換部(DDF)における順方向伝播(a)及び逆方向伝播(b)を示す図。

【図9】逆方向伝播法によって最適化された分散プロファイル及び自己相似圧縮パルスとビート光との誤差の発展を示す図。

【図10】逆方向伝播(自己相似圧縮パルス ビート光)の様子を示す図。

【図11】第1の実施形態の変換部及び圧縮部の分散プロファイルを示す図。 20

【図12】第1の実施形態の変換部を用いて得られるパルスの強度(a)と、距離に対して線形に分散値が減少する分散プロファイルを有するDDFを用いて得られるパルスの強度(b)を示す図。

【図13】本発明の第2の実施形態に係る光パルス発生装置の構成を示すブロック図。

【図14】第1の実施形態のDDFと、第2の実施形態のCPFの模式図。

【図15】対称型CPFの異常分散値(a)と非対称型CPFの異常分散値(b)を示す図。

【図16】対称型CPFを用いた場合の圧縮パルス(a)と、非対称型CPFを用いた場合の圧縮パルス(b)を示す図。

【図17】CPFにより圧縮されたパルスのピーク・ペDESTAL比のペア数依存性を示す図。 30

【図18】第4の実施形態のパルス発生装置におけるビート光発生部及び変換部の構成を示す図。

【図19】第4の実施形態におけるCPFの分散プロファイル(上段)と非線形プロファイル(下段)を示す図。

【図20】第4の実施形態におけるCPFの出力パルスの測定結果を示す図。

【図21】第5の実施形態のパルス発生装置におけるビート光発生部及び変換部の構成を示す図。

【図22】第5の実施形態における高非線形性ファイバ(HNLF)及びシングルモードファイバ(SMF)のファイバ数とファイバ長との関係を示す図。 40

【図23】第5の実施形態におけるCPFの出力パルスの測定結果を示す図。

【図24】第5の実施形態におけるCPFの出力パルスの測定結果を示す図。

【符号の説明】

【0103】

1, 10, 20 ビート光発生部

2, 5 光パルス圧縮装置

3 変換部(DDF)

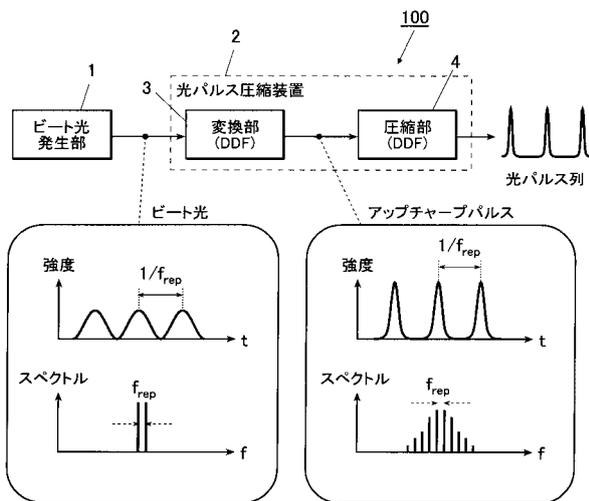
4 圧縮部(DDF)

6, 11, 21 変換部(CPF)

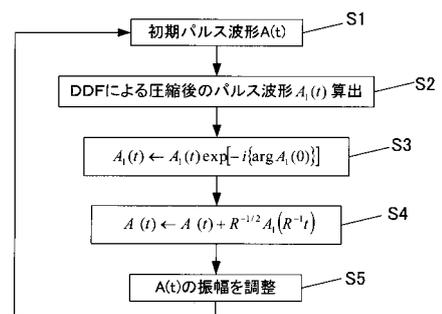
7 圧縮部(CPF)

100, 200 光パルス発生装置

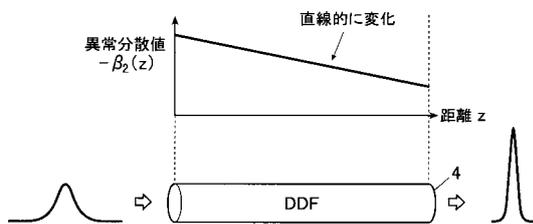
【図1】



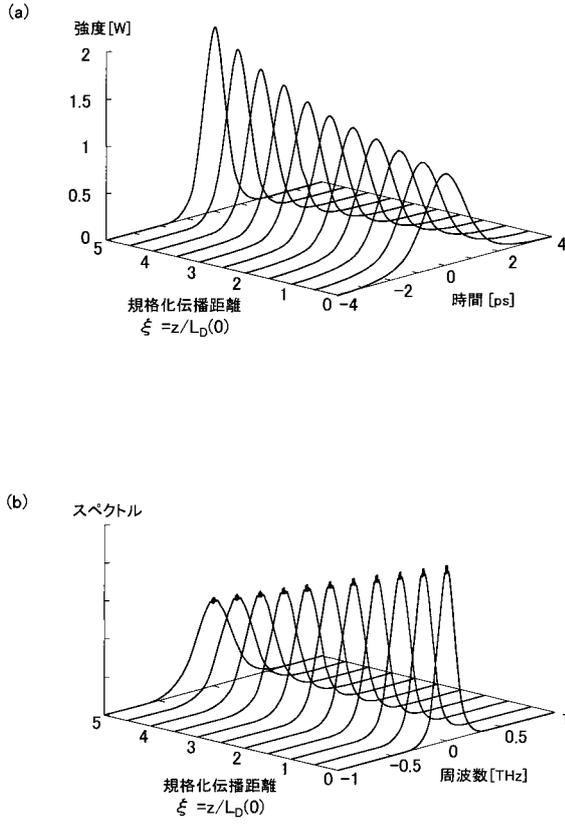
【図3】



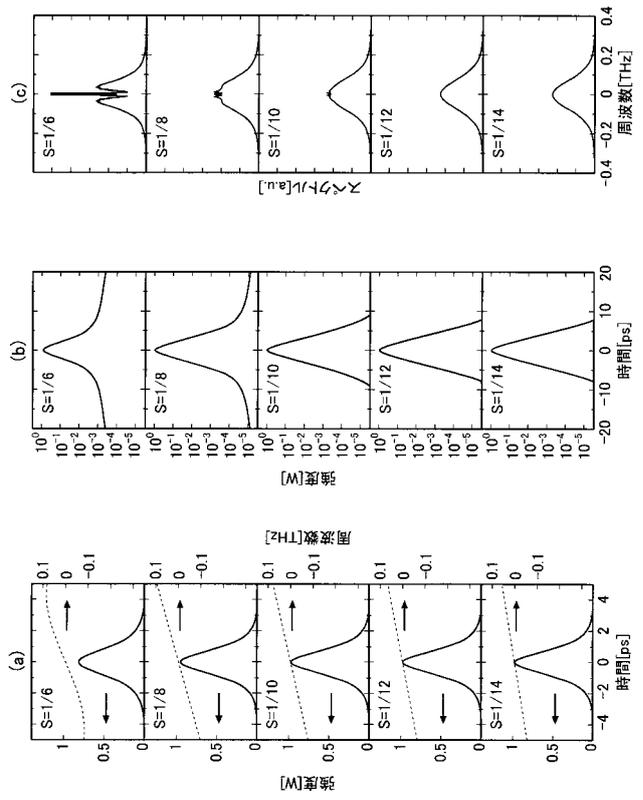
【図2】



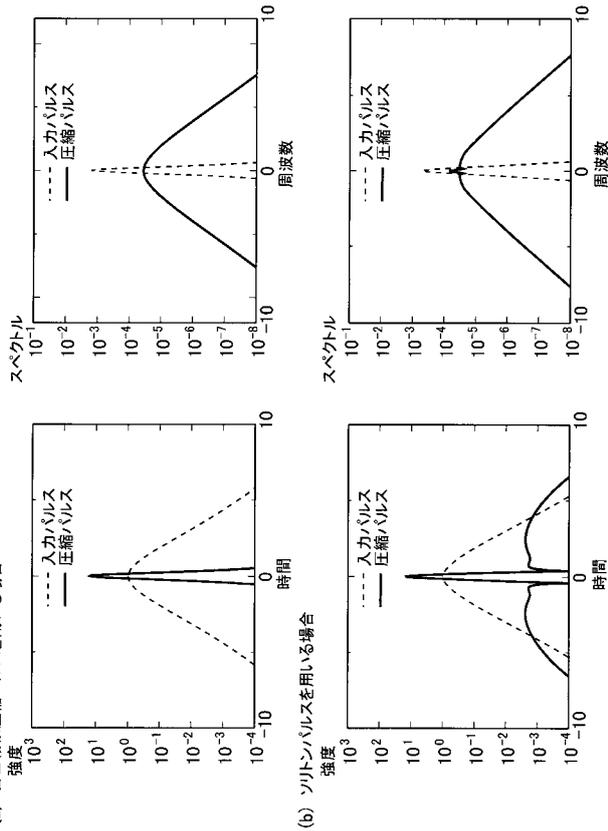
【 図 4 】



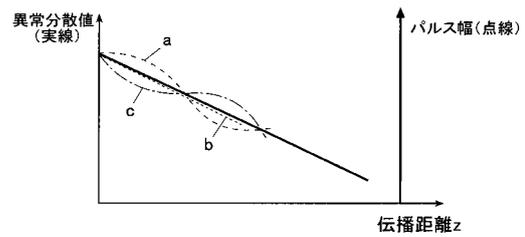
【 図 5 】



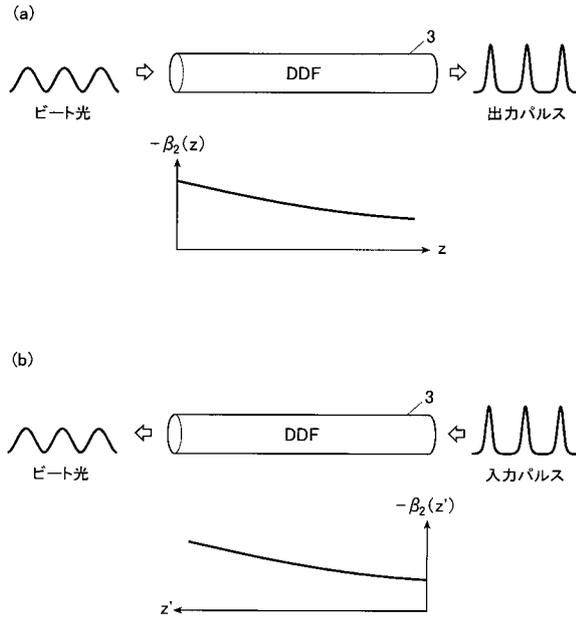
【 図 6 】



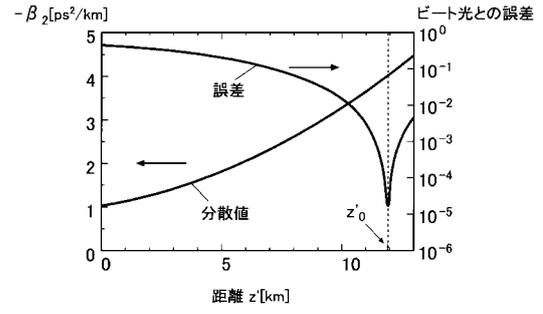
【 図 7 】



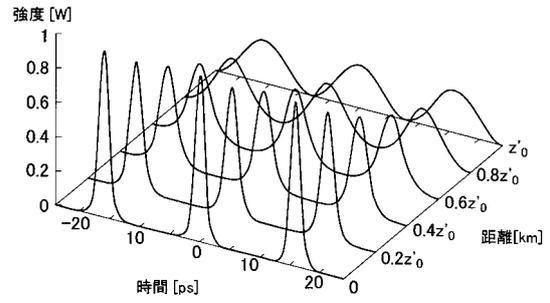
【 図 8 】



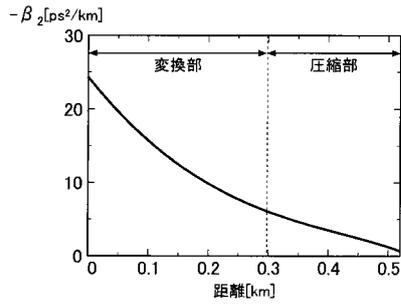
【 図 9 】



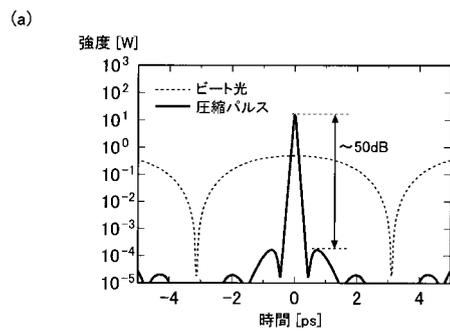
【 図 10 】



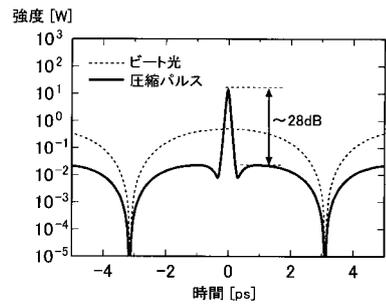
【 図 11 】



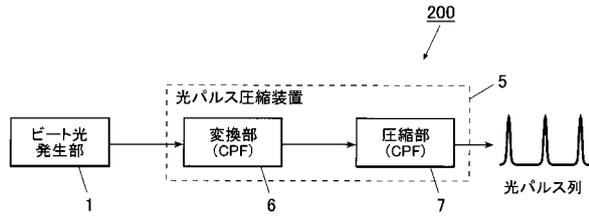
【 図 12 】



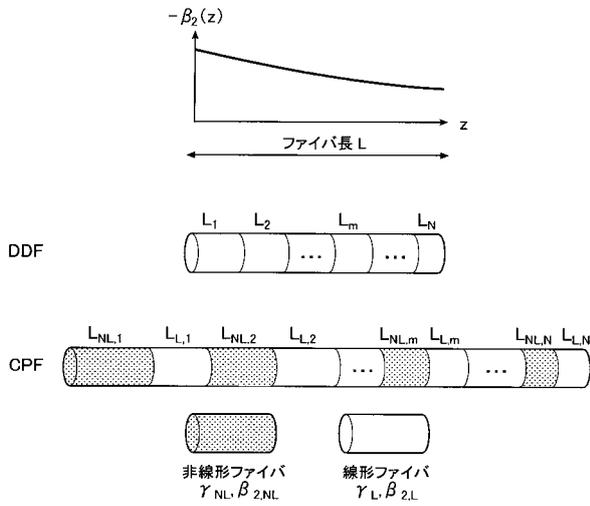
(b)



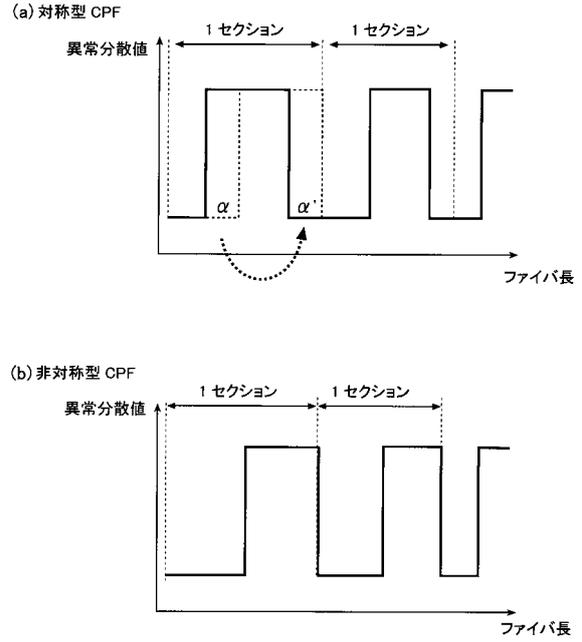
【図 13】



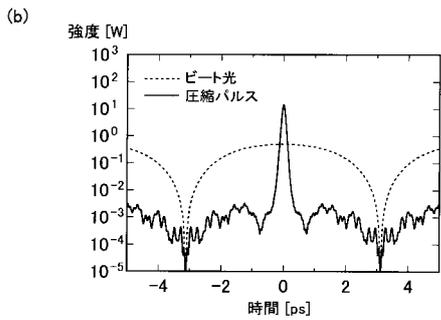
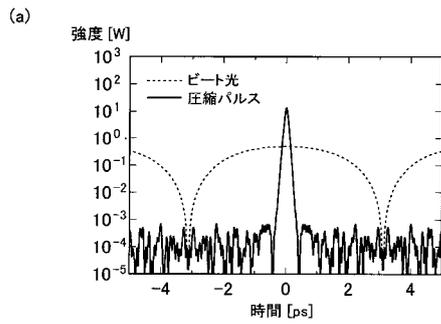
【図 14】



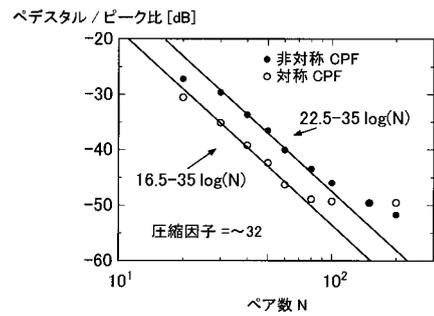
【図 15】



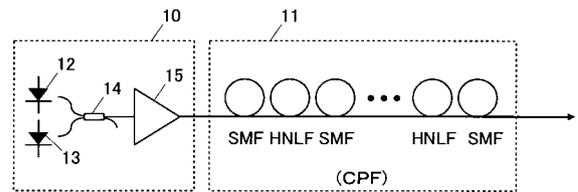
【図 16】



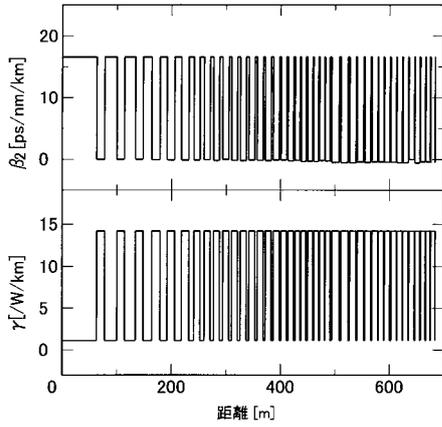
【図 17】



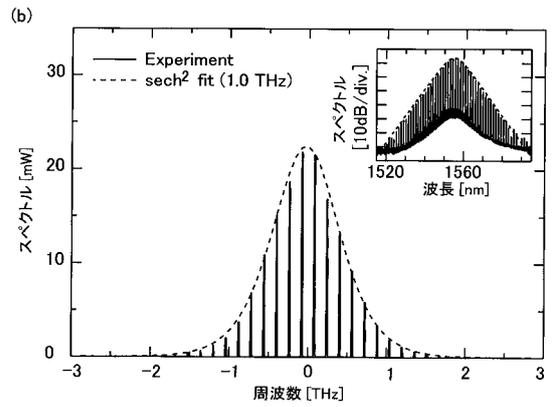
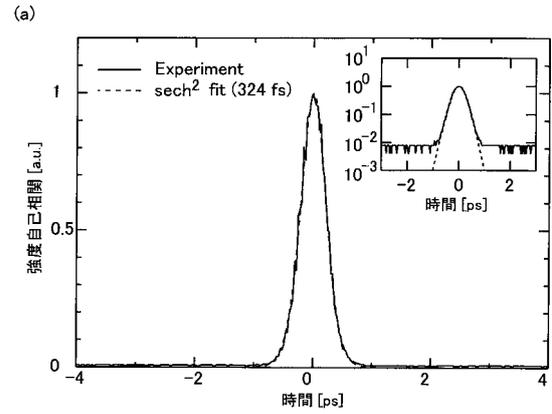
【図 18】



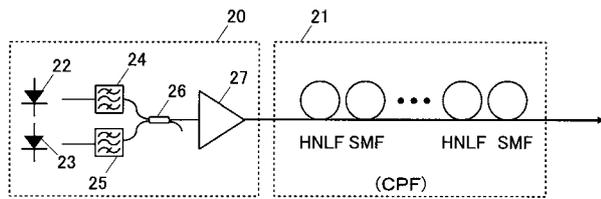
【 図 19 】



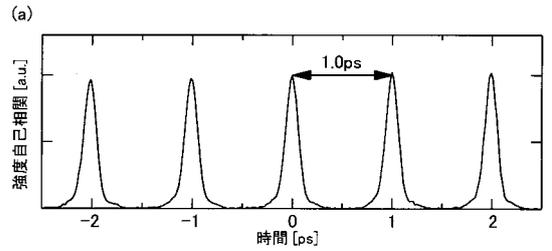
【 図 20 】



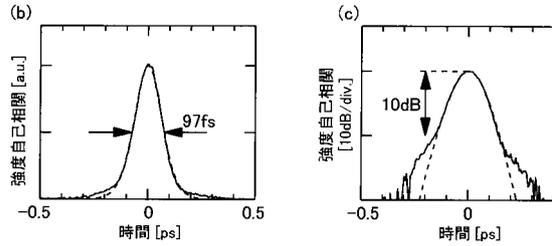
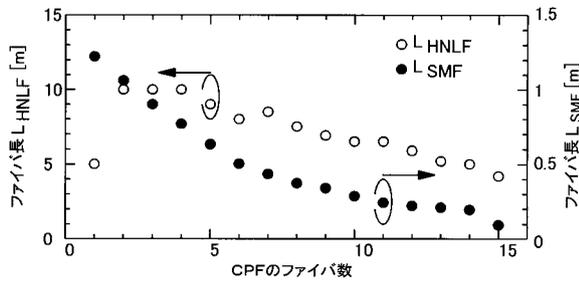
【 図 21 】



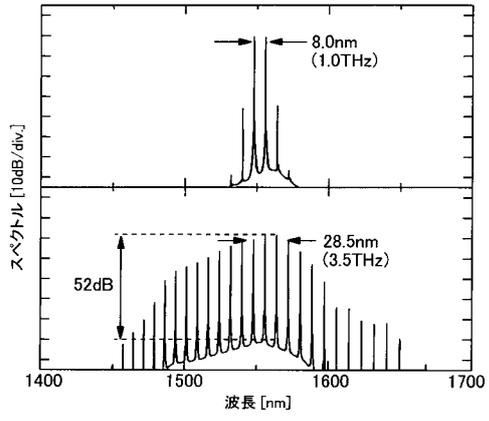
【 図 23 】



【 図 22 】



【 図 2 4 】



フロントページの続き

(72)発明者 五十嵐 浩司

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内

(72)発明者 井上 崇

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内

Fターム(参考) 2K002 AB33 BA02 DA10 HA25