

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5242014号
(P5242014)

(45) 発行日 平成25年7月24日(2013.7.24)

(24) 登録日 平成25年4月12日(2013.4.12)

(51) Int.Cl. F I
G O 2 F 1/365 (2006.01) G O 2 F 1/365

請求項の数 8 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2006-47345 (P2006-47345)	(73) 特許権者	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
(22) 出願日	平成18年2月23日(2006.2.23)	(74) 代理人	100123674 弁理士 松下 亮
(65) 公開番号	特開2007-102157 (P2007-102157A)	(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
(43) 公開日	平成19年4月19日(2007.4.19)	(72) 発明者	味村 裕 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
審査請求日	平成20年11月4日(2008.11.4)	審査官	山本 貴一
(31) 優先権主張番号	特願2005-257393 (P2005-257393)		
(32) 優先日	平成17年9月6日(2005.9.6)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 CPFパルス成型器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

非線形媒体と分散媒体とを交互に複数組み合わせる構成されるCPF (Comb-like Profile d Fiber) を備えたCPFパルス成型器であって、

所定の波長 λ_0 [nm]における分散値を D_{20} [ps²/km]とし、所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ における分散値と D_{20} との差の絶対値の最大値を ΔD としたとき、

波長の変化幅 $\Delta\lambda = 40$ [nm]に対して $|\Delta D / D_{20}| = 0.193$ となるシングル

モードファイバ (SMF) と比較して、前記分散媒体の一部または全部が、前記所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ における $|\Delta D / D_{20}|$ が前記SMFより小さい値を有する

ことを特徴とするCPFパルス成型器。

10

【請求項2】

前記所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ の光パルスを出射して前記CPFに入射するパルス光源を備える

ことを特徴とする請求項1に記載のCPFパルス成型器。

【請求項3】

前記分散媒体の一部または全部が、ノンゼロ分散シフト光ファイバ (ZS-NZDSF; Zero-Slope Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) である

ことを特徴とする請求項1または請求項2に記載のCPFパルス成型器。

【請求項4】

前記分散媒体は、一部が前記ノンゼロ分散シフト光ファイバであり、残りがシングルモ

20

ードファイバ (SMF) である

ことを特徴とする請求項 3 に記載の CPF パルス成型器。

【請求項 5】

前記 CPF の上流側に、所定の長さの別の分散媒体を追加している

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の CPF パルス成型器。

【請求項 6】

前記別の分散媒体は、前記所定の波長範囲における $\left| \frac{\lambda_2}{\lambda_0} - 1 \right|$ が波長の変化幅 $= 40 \text{ [nm]}$ に対して $\left| \frac{\lambda_2}{\lambda_0} - 1 \right| = 0.193$ となるシングルモードファイバ (SMF) より小さい値を有する

ことを特徴とする請求項 5 に記載の CPF パルス成型器。

10

【請求項 7】

前記別の分散媒体は、ノンゼロ分散シフト光ファイバである

ことを特徴とする請求項 5 または請求項 6 に記載の CPF パルス成型器。

【請求項 8】

前記所定の波長範囲は、少なくとも C バンド及び L バンドを含む

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載の CPF パルス成型器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバ通信システムにおける光パルス発生技術に適用される CPF パルス成型器の技術分野に関するものであり、特に CL バンド (1530 ~ 1610nm) の波長帯で波長可変な CPF パルス成型器の技術分野に関するものである。

20

【背景技術】

【0002】

非線形媒体である高非線形ファイバ (HNLF) と、分散媒体である異常分散ファイバ (例えばシングルモードファイバ; SMF) とを交互に組み合わせて構成される CPF パルス成型器に関しては、これまでに様々な技術開発が行われてきている。上記のように構成された CPF パルス成型器は、ファイバの非線形定数と分散値の両方が長手方向に櫛状のプロファイルを形成していることから、Comb-like Profiled Fiber (CPF) パルス成型器と呼ばれている。

30

【0003】

CPF パルス成型器の特徴は、全長が短いにもかかわらず、高効率で高品質なパルス成形が可能なことである。ここでいう高品質なパルス成形とは、高次ソリトン圧縮の際に生じるような、ペダスタル増大現象や変調不安定利得による著しい雑音増幅現象、及びそれに伴うタイミングジッタ付加が発生しないパルス成形を意味する。

【0004】

CPF パルス成型器の設計方法として、例えば非特許文献 1 に示されている方法を用いることができる。非特許文献 1 の方法によれば、高精度な光パルス列を出力可能な CPF パルス成型器を容易に設計することができる。

【0005】

光ファイバの分散特性は、通常、波長によって異なり、同じファイバ長での累積分散量も波長によって異なってしまう。

40

前記累積分散量は、設計値にある程度近くなければならないが、分散特性が波長によって変化すると、波長が設計上の中心波長から離れるに従って、累積分散量も設計値から離れていくことになる。そして、累積分散量が所定の誤差以上となる波長に対しては、CPF パルス成型器は正常に動作しなくなる。

【0006】

非特許文献 1 に示されている方法を用いて設計された CPF パルス成型器においても、動作波長によって CPF パルス成型器の累積分散量が変化すれば、広帯域の動作波長に対して同一設計および同一入力条件に対して同じ特性のパルス成型が実現できなくなるという問

50

題があった。

【 0 0 0 7 】

そこで非特許文献 2 に記載の実施例では、HNLFとSMFとを組み合わせた従来構成のCPFパルス成型器において、入力パワーを調整することにより、すべての波長帯で同等の出力パルス幅が得られるようにしている。ここで報告されているCPFパルス成型器は、1570nmでパルス圧縮動作が最適化されるように設計されており、CLバンド(1530~1610nm)の波長帯で波長可変としている。入力パルスは40GHz繰り返しRZ (Return-to-Zero) パルス列を用いており、8.5psの入力パルス幅を1.8psに圧縮している。

【 0 0 0 8 】

上記従来技術は、ピコ秒オーダーで光パルスを成型するものであったが、最近ではさらにフェムト秒オーダーの光源の利用ニーズも高まっている。例えば、各種科学技術研究の分野や、エネルギーを大きくして二光子吸収などのプロセスによる加工分野での利用がある。

【 0 0 0 9 】

フェムト秒パルス光源として、従来は主にモードロックレーザが用いられていたが、これは比較的特性が不安定で、パルス繰り返し周波数や発振波長が固定されてしまうといった問題があった。そこで、非特許文献 4 に示されているように、分散フラット・分散減少ファイバを用いることにより、Cバンドにおける波長可変フェムト秒圧縮を実現した例がすでに知られている。

【 0 0 1 0 】

一方、波長変化に対する分散特性の変化量がきわめて小さいファイバの開発も進められており、例えば非特許文献 3 では、分散値 $D[\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$ の波長 $[\text{nm}]$ に対する変化量を示す、分散スロープの値が零である分散シフトファイバ (Zero-slope non-zero dispersion-shifted fiber; ZS-NZDSF) の開発について報告されている。但し、ZS-NZDSFをCPFパルス成型器に適用した実施例はこれまでに見られない。

【非特許文献 1】 T. Inoue et al., "Design of comb-like profiled fiber for efficient pulse compression based on stationary rescaled-pulse propagation," Proc. OF C2005, JWA7 (2005).

【非特許文献 2】 T. Inoue and S. Namiki, "CL-Band Tunable Optical Pulse Compression Based on Stationary Rescaled Pulse Propagation in Comb-Like Profiled Fibre," ECOC2005, Mo.3.5.2, Gragow, Scotland (2005).

【非特許文献 3】 N. Kumano, K. Mukasa, S. Matsushita, and T. Yagi, "Zero Dispersion-Slope NZ-DSF with Ultra Wide Bandwidth over 300nm", ECOC2002, PD1.4, Copenhagen, Denmark (2002).

【非特許文献 4】 K. R. Tamura and M. Nakazawa, "Femtosecond Soliton Generation over a 32-nm Wavelength Range Using a Dispersion-Flattened Dispersion-Decreasing Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.11, pp.319-321 (1999).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 1 】

しかしながら、上記従来技術のCPFパルス成型器では、以下のような課題があった。従来の構成、すなわちHNLFとSMFを組み合わせた構成で、1570nmでパルス圧縮動作が最適化されるようにCPFを設計した場合、入力パワーを調整することにより、すべての波長帯で同等の出力パルス幅が得られる。ただし、パワーの調整幅が全体で2~2.5dBの範囲に及び、さらにペDESTAL等のパルス品質が波長依存性を示す(具体的には、設計波長より短波長ではペDESTALが増大し、長波側ではそれが抑圧される)という問題が発生していた。願わくは、すべての波長で同じ動作パワーで、出力パルス品質も波長無依存となるのが好ましい。

【 0 0 1 2 】

この問題は主に、SMFの分散値が、光の波長もしくは周波数に対して変化することに起

10

20

30

40

50

因する。光ファイバの分散値の表し方は二通りあって、 D [ps/nm/km]と β_2 [ps²/km]であり、それぞれの値には

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad \dots \text{式 (1)}$$

【0013】

という関係がある。ここで λ は波長、 c は真空中の光速である。 D と β_2 のうち、ファイバ中の光パルス伝搬特性を決める普遍的な量は、 β_2 である。つまり同じ β_2 の値であれば、任意の波長 λ で分散の強さは同じであるが、一方で、ある D の値が示す分散の強さは、波長 λ に依存する。SMFの分散値 β_2 は典型値として、波長が1570nmのときに $\beta_2 = -22.8$ [ps²/km]である。また $\lambda = 1530$ nmのときは $\beta_2 = -18.8$ [ps²/km]、 $\lambda = 1610$ nmのときは $\beta_2 = -27.2$ [ps²/km]である。このように、SMFの分散値が波長によって変化することから、CPFにおけるパルス成型特性は、波長によって変化することになる。

【0014】

そのため、例えば1.5 μ m帯の光をSHG (Second Harmonic Generation ; 2次高調波発生) で800nm帯に波長変換するにあたって、もとの1.5 μ m帯においてより広帯域で波長可変圧縮動作するのが望ましいが、従来のCPFを用いる場合はこれを実現するのが困難となる。一方、分散フラット・分散減少ファイバを用いて波長可変なフェムト秒圧縮を行わせる従来の方法では、Cバンドでは実現できるものの、CLバンドの広帯域では四次分散の影響のため波長可変なフェムト秒圧縮を実現することは困難となる。

【0015】

そこで、本発明はこれらの問題を解決するためになされたものであり、CLバンド(1530~1610nm)の波長帯で波長可変であるCPFパルス成型器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】

【0016】

この発明のCPFパルス成型器の第1の態様は、非線形媒体と分散媒体とを交互に複数組み合わせ合わせて構成されるCPF (Comb-like Profiled Fiber) を備えたCPFパルス成型器であって、所定の波長 λ_0 [nm]における分散値を β_{20} [ps²/km]とし、所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ における分散値と β_{20} との差の絶対値の最大値を β_2 としたとき、波長の変化幅 $\Delta\lambda = 40$ [nm]に対して $|\beta_2 / \beta_{20}| = 0.193$ となるシングルモードファイバ (SMF)と比較して、前記分散媒体の一部または全部が、前記所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ における $|\beta_2 / \beta_{20}|$ が前記SMFより小さい値を有することを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0017】

この発明のCPFパルス成型器の第2の態様は、前記所定の波長範囲 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ の光パルスを出射して前記CPFに入射するパルス光源を備えることを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0018】

第3の態様は、前記分散媒体の一部または全部が、ノンゼロ分散シフト光ファイバ (ZS-NZDSF ; Zero-Slope Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) であることを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0019】

第4の態様は、前記分散媒体の一部が前記ノンゼロ分散シフト光ファイバであり、残りがシングルモードファイバ (SMF) であることを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0020】

第5の態様は、前記CPFの上流側に、所定の長さの別の分散媒体を追加していることを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0021】

第6の態様は、前記別の分散媒体が、前記所定の波長範囲における $|\beta_2 / \beta_{20}|$ が波長の変化幅 $\Delta\lambda = 40$ [nm]に対して $|\beta_2 / \beta_{20}| = 0.193$ となるシングル

モードファイバ(SMF)より小さい値を有することを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0023】

第7の態様は、前記別の分散媒体が、ノンゼロ分散シフト光ファイバであることを特徴とするCPFパルス成型器である。

【0024】

第8の態様は、前記所定の波長範囲が、少なくともCバンド及びLバンドを含むことを特徴とするCPFパルス成型器である。

【発明の効果】

【0025】

以上説明したように本発明によれば、分散媒体にZS-NZDSFを用いることにより、累積分散量が所定の波長帯域内でほぼ均等となるCPFパルス成型器を提供することができる。

【0026】

また、前記所定の波長帯域内で波長を変化させる場合には、出力パルスのパルス幅を均等にするための入力パワーの調整幅を従来より大幅に縮小できるとともに、品質が波長依存性のない均一な出力パルスを得ることが可能なCPFパルス成型器を提供することができる。

【0027】

さらに、本発明のCPFパルス成型器によれば、CLバンドで波長可変なフェムト秒圧縮を実現することができ、安定で高品質なフェムト秒パルス光源として利用可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0028】

図面を参照して本発明の好ましい実施の形態におけるCPFパルス成型器の構成について詳細に説明する。なお、同一機能を有する各構成部については、図示及び説明簡略化のため、同一符号を付して示す。

【0029】

CPFパルス成型器は、パルスに非線形効果を及ぼすHNLFFと、異常分散効果を及ぼすファイバから構成されるが、異常分散ファイバとして従来のSMFの代わりに、分散値 β_2 の波長依存性がSMFより小さいファイバ、あるいは β_2 が波長に依存しないファイバを用いれば、CPF動作特性の波長依存性は抑圧、もしくは解消される。例えば、ある波長において分散スロープが零で、分散値が異常分散領域である、ゼロスロープ分散シフトファイバ(Zero-slope dispersion-shifted fiber; ZS-NZDSF)が報告されているが、そのようなファイバを用いればよい。

【0030】

ここで分散スロープとは、分散値 $D[\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$ が波長 $[\text{nm}]$ に対して線形に変化する割合を示すもので、スロープ値は $S[\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}] = dD/d\lambda$ で定義される。また、 β_2 の周波数依存性を示す値として、 β_2 の周波数による一階微分で定義される $\beta_3 = d\beta_2/d\omega$ が用いられるが、ある波長 ω_0 において、 S と β_3 は次の関係にある。

$$\frac{(2\pi c)^2}{\lambda^3} \beta_3 = \lambda S + 2D \cdots \text{式(2)}$$

【0031】

分散スロープ値 S が零の場合でも、 β_3 は一般に零とならないが、 S が小さいファイバであれば、傾向として β_2 の波長依存性は小さくなる。SMFおよび非特許文献3で報告されているZS-NZDSFの、波長 $[\text{nm}]$ に対する分散値 $D[\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$ および β_2 $[\text{ps}^2/\text{km}]$ の値を図1と2に示す。図1から、ZS-NZDSFはSMFより分散スロープ値 S の絶対値が小さく、ある波長においてはスロープ値 S が零となっている。また図2においてSMFと比較して、ZS-NZDSFの β_2 の波長依存性が小さいことがわかる。

【0032】

ある波長 ω_0 $[\text{nm}]$ において最適に動作するように設計したCPFパルス成型器に対して、

10

20

30

40

50

$\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ [nm]の範囲で波長可変動作を行う際の、SMFもしくはZS-NZDSFの分散値 D_2 の波長依存性を評価する値として、以下に定義する値を用いる。まず、波長 λ_0 [nm]における分散値を D_{20} とする。次に、 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ [nm]の波長範囲で、ファイバの分散値と D_{20} との差の絶対値の最大値を ΔD_2 とおく。このとき、 $|\Delta D_2 / D_{20}|$ の値は $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ [nm]の波長範囲におけるファイバ分散値の波長依存性を示し、値が小さいほど、波長依存性が小さいと言える。

【0033】

例えば $\lambda_0 = 1570$ [nm]、 $\Delta\lambda = 40$ [nm]としたとき、SMFの場合 $D_{20} = -22.8$ [ps²/km]、 $D_2 = 4.4$ [ps²/km]であるから、 $|\Delta D_2 / D_{20}| = 0.193$ である。一方、図2に示したZS-NZDSFの#1, #2, および#3の場合は、それぞれ $D_{20} = -6.712, -8.595, -11.572$ [ps²/km]、 $D_2 = 0.29, 0.74, 1.01$ [ps²/km]、 $|\Delta D_2 / D_{20}| = 0.043, 0.086, 0.087$ である。よっていずれのZS-NZDSFも、SMFと比較して $|\Delta D_2 / D_{20}|$ が小さいことがわかる。また、ZS-NZDSF #1が最も波長依存性が小さいことがわかる。

10

【0034】

式(2)において $\beta_3 = 0$ 、すなわちすべての周波数 ω あるいは波長 λ に対して D_2 が一定となるためには、左辺を零とおいて、分散値 D と波長 λ に対する微分方程式

$$\lambda \frac{dD}{d\lambda} + 2D = 0$$

を解き、 D [ps/nm/km]が

20

$$D = \frac{C}{\lambda^2}$$

【0035】

なる式で表すことができればよい。ただし C は任意定数である。例えば $\lambda = 1580$ nmで $D = 5$ ps/nm/kmの場合、 $C = D \lambda^2 = 5 \times 1580^2$ [ps²nm/km]となる。このとき、1580nmにおけるスロープ値は $S = -2C / \lambda^3 = -2D / \lambda = -0.0063$ [ps/nm²/km]と計算される。なお図1および図2に示したZS-NZDSFの#1に関しては、この条件にほぼ一致し、波長 $\lambda = 1580$ nm付近では、 D_2 の値が波長に対して一定である。

【実施例1】

30

【0036】

40GHz繰り返しRZパルス列の幅を圧縮し、電力半値幅(FWHM)を8.5psから1.8psに圧縮するためのCPFを設計する。そして、非線形シュレディンガー方程式を用いた数値シミュレーションによって、パルス圧縮の結果を示す。

【0037】

入力パルスは、波長可変光源より出力される連続光を、ZカットLN強度変調器によって変調して得られるパルスを想定する。図3に自己相関波形を示す。このパルスは、フーリエ変換限界の場合にFWHMが6.1psとなる帯域を持つパルスがアップチャージしたもので、自己相関波形をsech関数でフィッティングしてFWHMを算出すると、8.5psになるように設定している。以下では、このパルス列を入力として用いた場合のパルス圧縮結果を示す。

40

【0038】

従来型CPFは、HNLfとSMFを交互に接続して構成される。これに対して、ZS-NZDSFを用いた本発明のCPFの効果を明らかにするため、簡単のためSMFとZS-NZDSFの非線形性と損失をそれぞれ零と仮定する。従来型および本発明のCPFを設計し、パルス圧縮結果を数値計算により検証する。図4に、CPFを構成するために用いるHNLf、SMF、ZS-NZDSFの分散値、分散スロープ値、非線形定数、そして損失を示す。ここでZS-NZDSFの分散スロープ値はすべての波長で零であり、またSMFとZS-NZDSFの非線形定数と損失を零としている。

【0039】

従来型CPFの設計と圧縮結果

従来の構成、すなわちHNLfとSMFを交互に接続したCPFの構成で、HNLfとSMFの組が六段

50

の場合の設計と、これを用いたパルス圧縮特性の計算結果を示す。

【 0 0 4 0 】

図 5 は、中心波長 $\lambda_0 = 1570\text{nm}$ のときに平均パワー 19.5dBm でパルスを入力する際に、出力パルス幅が 1.8ps で最適化されるように設計した六段 CPF パルス成型器の構成を示している。ただし、SBS (誘導ブリルアン散乱) の抑圧を目的として、1 段目と 2 段目の後にアイソレータを挿入することを考え、それぞれ挿入損失 0.5dB を加えている。なお、通常アイソレータの挿入損は波長依存性を持っているが、ここでは簡単のため無視した。

【 0 0 4 1 】

入力パワーを 19.5dBm に固定し、入力パルスの中心波長 λ_0 を 1530nm から 20nm おきに 1610nm まで変化させたときの、六段 CPF 出力パルスの時間幅とピークペDESTAL 比の値を図 6

10

【 0 0 4 2 】

また、出力パルスの自己相関波形を図 7 および図 8 に示す。なお点線は時間幅 1.8ps 相当の sech パルスを示している。

図 6 と図 7 および図 8 から、同じ入力パワーのもとでは、出力パルスの時間幅とピークペDESTAL 比が大きな波長依存性を持つことがわかる。これは SMF の分散値が、波長によって変化するためである。

【 0 0 4 3 】

一方、非特許文献 2 で示されているように、各波長に対して入力パワーを調整すること

20

で、出力パルスの時間幅を所望の値に調整することができる。図 5 に設計を示した従来型 CPF パルス成型器に対して、各波長において出力幅が約 1.8ps となるように最適化した入力パワーと、そのときの出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL 比を図 9 に示す。

【 0 0 4 4 】

図 9 および図 10 と図 11 から、設計波長である 1570nm より短い波長では、入力パワーを減少させることにより、設計した出力幅である 1.8ps に近い値を得ることができる。逆に 1570nm より長い波長では、入力パワーを増加させることで、約 1.8ps の幅が得られる。ただし、ピークペDESTAL 比は依然として波長依存性を持っている。また動作波長を変化

30

【 0 0 4 5 】

本発明の CPF の設計と圧縮結果

パルス圧縮特性に対する SMF の分散スロープの影響を低減するため、SMF の代わりに ZS-NZDSF を用いて CPF を構成する。図 5 に設計を示した従来型 CPF において、一部の SMF のみを ZS-NZDSF に置き換える方法も考えられるが、ここでは HNLF と ZS-NZDSF のみで CPF を構成することを考える。本発明の CPF の構成として、HNLF と ZS-NZDSF の組が六段の場合の設計と、これを用いたパルス圧縮特性の計算結果を以下に示す。

【 0 0 4 6 】

図 12 は、中心波長 1570nm のときに平均パワー 19.5dBm でパルスを入力する際に、出力パルス幅が 1.8ps で最適化されるように設計した本発明の六段 CPF パルス成型器の構成を示しており、SMF の代わりに ZS-NZDSF を用いたことを除いては、図 5 と同様の構成である。図 5 に示した従来型 CPF の設計と比較すると、SMF 長と ZS-NZDSF 長のみが異なっており、SMF と ZS-NZDSF の分散値の比に応じて、各段の ZS-NZDSF が長く設定されている。

40

【 0 0 4 7 】

入力パワーを 19.5dBm に固定し、入力パルスの中心波長 λ_0 を 1530nm から 20nm おきに 1610nm まで変化させたときの、六段 CPF 出力パルスの時間幅とピークペDESTAL 比の値を図 13 に示す。

また、出力パルスの自己相関波形を図 14 および図 15 に示す。なお点線は時間幅 1.8ps

50

相当のsechパルスを示している。

【0048】

図13と図14および図15から、HNLfとZS-NZDSFを用いてCPFを構成することで、出力パルスの時間幅とピークペダスタル比の波長依存性が、従来型CPFの場合と比較して、大きく抑圧されていることがわかる。わずかな波長依存性の原因は、先に述べたとおり、ZS-NZDSFの普遍的な分散量である β_2 [ps²/km]が、波長 λ [nm]によって変化するためである。

【0049】

本発明のCPFを用いる場合でも、各波長に対して入力パワーを最適化することで、より設計値に近い出力パルス幅を実現することができる。

10

各波長において最適化した入力パワーと、そのときの出力パルスの時間幅およびピークペダスタル比を図16に示す。

また、出力パルスの自己相関波形を図17および18に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0050】

図16の結果と、図9に示した従来型CPFを用いた場合の結果を比較すると、本発明のCPFを用いることで、入力パワーの調整幅と、ピークペダスタル比の波長依存性が大きく低減されたことがわかる。

【0051】

以上のように、HNLfとZS-NZDSFを交互に接続して構成する本発明のCPFを用いることで、HNLfとSMFからなる従来のCPFと比較して、出力パルス特性の波長依存性を低減できることが確認できた。

20

【実施例2】

【0052】

これまででは、本発明の効果を検証するために、すべての波長でZS-NZDSFの分散スローブを零とおき、またSMFとZS-NZDSFの非線形性と損失をそれぞれ零と仮定してきた。そこで、より現実的な条件設定を行った場合でも、本発明のCPFが効果的であることを数値シミュレーションによって示す。

【0053】

まず、現実のZS-NZDSFの波長分散特性として、図1および2に測定結果を示したZS-NZDSFのうち、#2のファイバの値を用いる。なお分散値の波長依存性の観点からは、先に述べた $|\beta_2/\beta_0|$ の値から、#2のZS-NZDSFよりも#1が有利であるが、#1のファイバは分散値が小さいことから、ファイバ長が長くなり、さらに非線形効果が出やすいという問題点がある。

30

【0054】

次にSMFとZS-NZDSFの非線形定数と損失として現実的な値を考慮する。HNLf、SMF、ZS-NZDSFそれぞれの1570nmにおける分散値、分散スローブ値、非線形定数、そして損失の値を図19に示す。ただし、ZS-NZDSFの分散スローブ値は、図1で1570nmにおける値を示している。以下では、各ファイバのパラメータとして、図19と図1に示した値を用いてCPFの設計、およびパルス圧縮の計算を行う。

40

【0055】

従来型CPFの設計と圧縮結果

まず従来構成のCPFを用いた場合の設計と、パルス圧縮計算結果を示す。

図20は、中心波長1570nmのときに平均パワー19.5dBmでパルスを入力する際に、出力パルス幅が1.8psで最適化されるように設計した六段CPFパルス成型器の構成を示している。ただし、SBSの抑圧を目的として、1段目と2段目の後にアイソレータを挿入することを考え、それぞれ挿入損失0.5dBを加えている。なお、通常アイソレータの挿入損は波長依存性を持っているが、ここでは簡単のため無視した。

【0056】

入力パワーを19.5dBmに固定し、入力パルスの中心波長 λ_0 を1530nmから20nmおきに1610

50

nmまで変化させたときの、六段CPF出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比の値を図2-1に示す。

また、出力パルスの自己相関波形を図2-2および図2-3に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0057】

図2-1と図2-2および図2-3から、入力パワーを固定した場合に波長を変化させると、出力パルスの幅とピークペDESTAL比が大きな波長依存性を持つことがわかる。これは、図6と図7および図8に示した結果と同様である。

【0058】

一方、図2-1に設計を示した従来型CPFパルス成型器に対して、各波長において出力パルスの時間幅が等しくなるように最適化した入力パワーと、そのときの出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL比を図2-4に示す。また、出力パルスの自己相関波形を図2-5および図2-6に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0059】

このように、現実的な条件設定を行った場合でも、従来型CPFにおいて各波長に対する入力パワーを最適化することで所望のパルス幅を得ることはできる。ところがパワーの調整範囲は1.7dBにおよび、さらにピークペDESTAL比は依然として波長依存性を持つ。

【0060】

本発明のCPFの設計と圧縮結果

ZS-NZDSFのパラメータとして、図1-9と図1-10に示した値を用いる際、CPFを構成する上で慎重に考察すべき点は、ZS-NZDSFで発生する非線形効果がSMFと比較して大きいということである。そもそもZS-NZDSFはSMFよりも大きな非線形定数を持っているが、加えてZS-NZDSFの分散値はSMFの約1/3であることから、CPFを構成するためにSMFと同じ分散量を与えるために、ファイバ長をより長く設定する必要があるが、結果的に非線形効果の蓄積量も増大するのである。非線形性と損失を無視した場合は、図5と図1-2に示したように、従来型および本発明のCPF設計の相違点が、SMF長とZS-NZDSF長のみであった。これに対して、図1-9と図1-10に示したファイバパラメータを用いてCPFを設計する場合、段数やHNL長などが、図2-10に設計を示した従来型CPFとは異なる結果となる。

【0061】

図2-7に、HNLとZS-NZDSFの組が四段で構成される本発明のCPFパルス成型器の設計を示す。ただし、SBSの抑圧を目的として、一段目と二段目の後にアイソレータを挿入することを考え、それぞれ挿入損失0.5dBを加えている。なお、通常アイソレータの挿入損は波長依存性を持っているが、ここでは簡単のため無視した。

【0062】

入力パワーを19.5dBmに固定し、入力パルスの中心波長 λ_0 を1530nmから20nmおきに1610nmまで変化させたときの出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を図2-8に示す。また、出力パルスの自己相関波形を図2-9および図3-0に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0063】

図2-8と図2-9および図3-0から、出力特性に波長依存性が見られるものの、図2-1と図2-2および図2-3と比較すると、本発明のCPFを用いることで波長依存性が抑圧されていることがわかる。

【0064】

一方、図2-7に設計を示した本発明のCPFパルス成型器に対して、各波長において出力パルスの時間幅が等しくなるように最適化した入力パワーと、そのときの出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL比を図3-1に示す。また、出力パルスの自己相関波形を図3-2および図3-3に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0065】

図3-1の結果と、図2-4に示した従来型CPFを用いた場合の結果を比較すると、本発明のCPFを用いることにより、入力パワーの調整幅と、ピークペDESTAL比の波長依存性が

10

20

30

40

50

大きく低減されたことがわかる。

以上より、現実的なパラメータ設定を行った場合でも、HNLFとZS-NZDSFを交互に接続して構成する、本発明のCPFの効果を確認できた。

【実施例3】

【0066】

図19にパラメータを示したZS-NZDSFにおいて、幅6psで40GHz繰り返しのsechパルス列が光ソリトンとして伝搬するために必要なパワーは約18.1dBmと計算される。つまり19.5dBmの入力パワーで図3に示したパルスをZS-NZDSFに入力すると、ソリトン効果によってパルスの幅が圧縮されることになる。その結果、図27に設計を示したCPFにおいて、一段目のHNLFを除去した構成でも、ZS-NZDSFのみでパルスのスペクトルを広げ、同時に時間幅を圧縮することが可能である。以下に数値シミュレーションによって得た結果を示す。

【0067】

例えば、図27に示したCPFの一段目について、HNLF長を零とし、代わりにZS-NZDSF長を1.7kmとおいた場合に、ほぼ同じ出力波形が得られる。入力パワーを19.5dBm、波長を1570nmとしたときに、図27の一段目を伝搬したパルスと、ZS-NZDSF1.7kmを伝搬したパルスの自己相関波形を重ねてプロットし、図34と図35にそれぞれ線形軸と対数軸で示す。なお点線は、時間幅3.34ps相当のsechパルスを示している。図34と図35から、図27に示したCPFの一段目について、HNLF長を零とし、代わりにZS-NZDSF長を1.7kmとおいた場合でも、一段目出力波形がほぼ同じであることがわかる。

【0068】

図27に示したCPFにおいて、一段目のHNLF長を零とし、ZS-NZDSF長を1700mに変更すると、構成は図36のようになる。図36において、一段目はZS-NZDSFのみであるから、HNLFとZS-NZDSFからなるCPFの一段とは異なるが、ここでは便宜上CPFの一段と言い、図36の構成を四段CPFパルス成型器と言う。

【0069】

入力パワーを19.5dBmに固定し、入力パルスの中心波長 λ_0 を1530nmから20nmおきに1610nmまで変化させたときの出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を図37に示す。また、出力パルスの自己相関波形を図38および図39に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0070】

図28と図29および図30とほぼ同じ結果が得られた。一方、図36に設計を示した本発明のCPFパルス成型器に対して、各波長において出力パルスの時間幅が等しくなるように最適化した入力パワーと、そのときの出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL比を図40に示す。また、出力パルスの自己相関波形を図41および図42に示す。なお点線は時間幅1.8ps相当のsechパルスを示している。

【0071】

図31と図32および図33とほぼ同じ結果が得られた。このように、CPF一段目のHNLF長を零として、ZS-NZDSFのみの構成とすることで、出力特性を保持しながら、構成が簡略化されたCPFを実現することができる。

【実施例4】

【0072】

上記実施例では、いずれも本発明のCPFパルス成型器を用いて光パルスの電力半値幅を8.5psから1.8psに圧縮している。これに加えて、本発明のCPFパルス成型器によれば、CLバンド帯で波長可変なフェムト秒圧縮を実現することが可能となる。CLバンド帯での波長可変フェムト秒圧縮は、HNLFとSMFを組み合わせた従来のCPFでは実現不可能であった。

【0073】

本発明のCPFパルス成型器により波長可変フェムト秒圧縮を実現するための構成例を図43に示す。同図では、光パルス生成部110において電力半値幅約8.5psの40GHz繰り返しパルス列を生成し、本発明のCPFパルス成型器101を含むパルス成型器100が、前記パルス列を入力して電力半値幅を圧縮する構成を示している。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 4 】

本実施例のパルス成型器100は、1.8km長ZS - NZDSF 102と、低分散スロープを有するHNL Fと零分散スロープのZS - NZDSFからなるCPF101とで構成されている。CPF101は、前記HNL FとZS - NZDSFとを5段組み合わせて構成されており、本実施例ではCPF101の前段にさらに1.8km長のZS - NZDSF 102を備えている。1.8km長ZS - NZDSF 102は、ソリトン効果によりパルス圧縮を行うソリトン変換器として機能するものであり、光パルス生成部110から入力した電力半値幅約8.5psのパルス列を幅約4ps (sech関数でフィッティングしたときの電力半値幅) に圧縮している。

【 0 0 7 5 】

1.8km長ZS - NZDSF 102で電力半値幅が約4psに圧縮されたパルス列は、アイソレータ103 10
を經由してCPF101に入力される。ここでアイソレータ103は、CPF101におけるSBSを抑圧することを目的に、1.8km長ZS - NZDSF 102とCPF101との間に設置されている。

【 0 0 7 6 】

CPF101は、前記HNL FとZS - NZDSFとを交互に5段組み合わせて構成されている。CPF101に用いられるZS - NZDSF、および1.8km長のZS - NZDSF 102のそれぞれの分散値の測定結果を図44に示す。 $\beta_2 = 1570$ [nm]、 $\beta_3 = 40$ [nm]としたとき、図44に示したZS-NZDSFの1.8km NZDSF, CPF1,2段目のNZDSF, およびCPF3~5段目のNZDSFについて、それぞれ $\beta_2 = -10.14, -8.16, -3.44$ [ps²/km]、 $\beta_3 = 1.028, 0.662, 0.622$ [ps²/km]、 $|\beta_2 / \beta_3| = 0.101, 0.081, 0.181$ である。CPF101は、分散値の異なる2種類のNZDSFを用いており、1、2段目のNZDSFは、3~5段目のNZDSFよりも高い分散値を有している。また、1.8km長ZS - NZ 20
DSF 102には、上記のCPF101に用いられる2種類のNZDSFよりもさらに高い分散値を有するNZDSFを用いている。

【 0 0 7 7 】

1.8km長ZS - NZDSF 102に用いられるNZDSF、およびCPF101に用いられる2種類のNZDSFは、図44に見られるとおり、いずれも分散スロープがほぼゼロとなっているのが特徴である。図44には、参考としてSMFの分散値も併せて示している。同図に示したSMF は、波長1550nmのときの分散値が16.264ps/nm/kmで、分散スロープ値が0.0586ps/nm²/kmのものである。

【 0 0 7 8 】

図44に示す分散値を有するNZDSFを用いて構成されたCPF101は、その分散値と非線形定数が図45に示すようなプロファイルを形成する。なおCPFの後段ではファイバ長が数mのオーダーであるが、分散値の小さなNZDSFを用いることで、ファイバ長に高い精度が要求されず、調整を容易にできるようにしている。CPF101の分散値と非線形定数のプロファイルをこのように形成することにより、1.8km長ZS - NZDSF 102から入力した電力半値幅約4psのパルス列を、電力半値幅100fs程度のフェムト秒オーダーのパルス列に変換することができる。

【 0 0 7 9 】

一方、光パルス生成部110は、TLS (Tunable Laser Source ; 波長可変光源) 111と、40GHz正弦波電気信号発振器112と、LNM (Lithium Niobate Modulator ; LN変調器) 113と、EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier ; エルビウム添加ファイバ増幅器) 114と、BPF (Band Pass Filter) 115と、PC (Polarization Controller ; 偏波コントローラ) 116と、VOA (Variable Optical Attenuator ; 可変光減衰器) 117とから構成されている。 40

【 0 0 8 0 】

TLS111は、連続光であるレーザー光を波長可変に出力させるものであり、前記レーザー光の位相を変調するためのCC (Coherence Control) 機能を持たせている (図中ではTLS (w/CC) と表記)。該CC機能は、1.8km長 ZS - NZDSF 102でのSBSを抑圧するために備えられたものである。1.8km長 ZS - NZDSF 102を複数に分割し、その間にアイソレータを挿入することで、前記CC機能を用いないようにすることも可能である。

【 0 0 8 1 】

LNM113は、TLS111から出力されるレーザー光を40GHz正弦波電気信号発振器112から印加 50

された40GHzの電気信号に従って強度変調することによって、繰り返し周波数が40GHzのパルス列を出力する。ここでは、パルス列の繰り返し周波数を40GHzとしたが、40GHz正弦波電気信号発振器112からLNM113に印加する電気信号の繰り返し周波数を変化させることで、パルス列の繰り返し周波数を可変とすることができる。

【0082】

TLS111から出力されるレーザー光として、CLバンド帯の広帯域の波長のものを対象とする本実施例では、EDFA114として2段構成のものと3段構成のものの2種類を用いている。すなわち、例えば前記波長がCバンドの1530nmとLバンドの1570nmのときには2段構成とし、Lバンドの1610nmのときには3段構成としている。

【0083】

上記構成の光パルス生成部110と本発明のCPFパルス成型器101を含むパルス成型器100を用いて実現したフェムト秒圧縮の例を、実験結果にもとづいて以下に説明する。図46は、CPFパルス成型器100の入力光の波長が1530nmのときの自己相関波形とスペクトルの測定結果を示している。図46に示す入力光の電力半値幅（FWHM）は、8.56psとなっている。

【0084】

図46に示す入力光を1.8km長ZS - NZDSF 102に入力して成型されたパルス波形の測定結果を図47に示す。同図より、電力半値幅8.56psの入力光が3.30psに圧縮されて1.8km長ZS - NZDSF 102から出力されることがわかる。なお、上記結果は、1.8km長ZS - NZDSF 102への入力パワー（すなわち、パルス成型器100への入力パワー）を20.0dBmとしたときの結果である。

【0085】

1.8km長ZS - NZDSF 102からの出力光を、さらにCPF101に入力して成型したパルスの測定結果を図48に示す。図48(a)に示す自己相関波形では、CPF101からの出力パルスの波形をガウス関数でフィッティングして電力半値幅を求めている。その結果、CPF101の出力パルスのパルス幅は、108fsに圧縮されていることがわかる。また図48(b)からは、CPF101の出力パルスのスペクトルが十分広がっていることがわかる。

【0086】

同様にして、パルス成型器100の入力光の波長が1570nmのときと1610nmのときの測定結果を、それぞれ図49～51と図52～54に示す。波長が1570nmのときには、パルス成型器100への入力光のパルス幅は8.69psであり、入力パワーは19.5dBmとしている。その結果、1.8km長ZS - NZDSF 102からの出力光の電力半値幅は、3.98psに圧縮され、さらにCPF101で97.1fsまで圧縮されている。

【0087】

また、パルス成型器100への入力光の波長が1610nmのときには、前記入力光のパルス幅は8.56psであり、入力パワーは21dBmとしている。その結果、1.8km長ZS - NZDSF 102からの出力光の電力半値幅は、3.72psに圧縮され、さらにCPF101で104fsまで圧縮されている。

【0088】

一方、図51(b)、図54(b)に示すスペクトルからは、図48(b)と同様に、中心波長を大きく変化させてもCPF101の出力パルスのスペクトルが十分広がっていることがわかる。

【0089】

上記の通り、本実施例のCPFパルス成型器101を含むパルス成型器100によれば、LNM113の出力光である波長1530nm～1610nmのCLバンドの光パルスに対し、電力半値幅を約8.5psから100fs程度にフェムト秒圧縮することが可能となる。これは、本実施例のパルス成型器100で、ZS-NZDSFを用いてCPF101を形成させるようにしたことによるものである。なお、CPFパルス成型器101の出力光にペDESTALの発生が見られる場合には、CPF101の段数を増やして精密に設計することで、該ペDESTALを低減することができる。

【0090】

分散フラット・分散減少ファイバを用いて波長可変なフェムト秒圧縮を行う従来の方法

10

20

30

40

50

に比べて、本実施例のCPFパルス成型器101は、HNLFとZS-NZDSFとを組み合わせることで実現できることから、高い生産性が得られる。また、本実施例のCPFパルス成型器101は、非線形媒体と分散媒体の両方に広帯域で分散フラットなHNLFとZS-NZDSFを用いているので、CLバンドの広帯域で波長可変なフェムト秒圧縮を実現することが可能となっている。

【0091】

また、フェムト秒パルス光源として従来から用いられているモードロックレーザでは、パルス繰り返し周波数や発振波長が固定されていたのに対し、本発明のCPFパルス成型器では、パルス繰り返し周波数、発振波長とも可変とすることができるだけでなく、データ変調を行うことも可能となり、かつ安定した特性のパルス列を成型することができる。

【0092】

さらに、本発明のCPFパルス成型器によれば、高次ソリトン圧縮と比較して雑音増幅を低く抑えることができ、CPFの段数を増やすことでペDESTALを低減することも可能である。

【0093】

以上に示したように、ZS-NZDSFを用いることで、パルス圧縮動作の波長依存性を大幅に低減できる。なお本実施例では、1530nmから1610nmまでの範囲における計算結果や実験結果を示したが、さらに短波長側（Sバンド）や、長波長側でも動作可能である。

【図面の簡単な説明】

【0094】

【図1】図1は、波長 [nm] に対する、ZS-NZDSFとSMFの分散値 D [ps/nm/km]を示すグラフである。

【図2】図2は、波長 [nm] に対する、ZS-NZDSFとSMFの分散値 D_2 [ps²/km]を示すグラフである。

【図3】図3は、入力パルス列の自己相関波形を示すグラフである。

【図4】図4は、CPFを構成するファイバのパラメータを示す表である。

【図5】図5は、従来型六段CPFパルス成形器の設計値を示す表である。

【図6】図6は、各波長に対する従来型六段CPFパルス成形器出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図7】図7は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、従来型六段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図8】図8は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、従来型六段CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図9】図9は、従来型CPFを用いた場合の各波長に対する最適入力パワーと、出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL比を示す表である。

【図10】図10は、入力パワーを各波長で最適化したときの、従来型六段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図11】図11は、入力パワーを各波長で最適化したときの、従来型六段CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図12】図12は、本発明の六段CPFパルス成形器の設計値を示す表である。

【図13】図13は、各波長に対する本発明の六段CPFパルス成形器出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図14】図14は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の六段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図15】図15は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の六段CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図16】図16は、本発明の六段CPFを用いた場合の、各波長に対する最適入力パワーと、出力パルスの時間幅およびピークペDESTAL比を示す表である。

【図17】図17は、入力パワーを各波長で最適化したときの、本発明の六段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図18】図18は、入力パワーを各波長で最適化したときの、本発明の六段CPFの出力

10

20

30

40

50

パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 1 9】図 1 9 は、CPFを構成するファイバのパラメータを示す表である。

【図 2 0】図 2 0 は、従来型六段CPFパルス成形器の設計値を示す表である。

【図 2 1】図 2 1 は、各波長に対する従来型六段CPFパルス成形器出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図 2 2】図 2 2 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの従来型CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図 2 3】図 2 3 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの従来型CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 2 4】図 2 4 は、各波長における従来型六段CPFパルス成形器の入力パワーと、出力パルスの幅とピークペDESTAL比を示す表である。

10

【図 2 5】図 2 5 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、従来型六段CPF出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図 2 6】図 2 6 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、従来型六段CPF出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 2 7】図 2 7 は、ZS-NZDSFを用いた本発明の四段CPFパルス成形器の設計値を示す表である。

【図 2 8】図 2 8 は、各波長に対する本発明の四段CPFパルス成形器出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図 2 9】図 2 9 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の四段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

20

【図 3 0】図 3 0 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の四段CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 3 1】図 3 1 は、各波長における本発明の四段CPFパルス成形器の入力パワーと、出力パルスの幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図 3 2】図 3 2 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、本発明の四段CPF出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図 3 3】図 3 3 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、本発明の四段CPF出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 3 4】図 3 4 は、入力パワーを19.5dBm、波長を1570nmとしたときに、図 2 7 の一段目と、ZS-NZDSF1.7kmのそれぞれを伝搬したパルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

30

【図 3 5】図 3 5 は、入力パワーを19.5dBm、波長を1570nmとしたときに、図 2 7 の一段目と、ZS-NZDSF1.7kmのそれぞれを伝搬したパルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 3 6】図 3 6 は、ZS-NZDSFを用い、一段目のHNLFL長を零とした本発明の四段CPFパルス成形器の設計値を示す表である。

【図 3 7】図 3 7 は、各波長に対する、表 1 7 0 の四段CPFパルス成形器出力パルスの時間幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図 3 8】図 3 8 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の四段CPFの出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

40

【図 3 9】図 3 9 は、入力パワーを19.5dBmに固定したときの、本発明の四段CPFの出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 4 0】図 4 0 は、各波長における、図 3 6 の四段CPFパルス成形器の入力パワーと、出力パルスの幅とピークペDESTAL比を示す表である。

【図 4 1】図 4 1 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、図 3 6 の四段CPF出力パルスの自己相関波形（線形軸表示）を示すグラフである。

【図 4 2】図 4 2 は、入力パワーを各波長で最適化したときの、図 3 6 の四段CPF出力パルスの自己相関波形（対数軸表示）を示すグラフである。

【図 4 3】図 4 3 は、波長可変フェムト秒圧縮を実現する本発明のCPFパルス成形器の実

50

施例を示す構成図である。

【図44】図44は、CPF101に用いられるZS - NZDSF、および1.8km長ZS - NZDSF 102のそれぞれの分散値を示す図である。

【図45】図45は、CPF101の分散値と非線形定数のプロファイルを示す図である。

【図46】図46は、入力光波長が1530nmのとき、パルス成型器100の入力パルスの自己相関波形とスペクトルの測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図47】図47は、入力光波長が1530nmのとき、1.8km長ZS - NZDSF 102で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図48】図48は、入力光波長が1530nmのとき、CPF101で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

10

【図49】図49は、入力光波長が1570nmのとき、パルス成型器100の入力パルスの自己相関波形とスペクトルの測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図50】図50は、入力光波長が1570nmのとき、1.8km長ZS - NZDSF 102で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図51】図51は、入力光波長が1570nmのとき、CPF101で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図52】図52は、入力光波長が1610nmのとき、パルス成型器100の入力パルスの自己相関波形とスペクトルの測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

20

【図53】図53は、入力光波長が1610nmのとき、1.8km長ZS - NZDSF 102で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【図54】図54は、入力光波長が1610nmのとき、CPF101で成型された波形の測定結果を示す図である。(a)が自己相関波形であり、(b)がスペクトルである。

【符号の説明】

【0095】

100・・・CPFパルス成型器

101・・・CPF

102・・・1.8km長ZS-NZDSF

30

103・・・アイソレータ

110・・・光パルス生成部

111・・・TLS

112・・・40GHz正弦波電気信号発振器

113・・・LNM

114・・・EDFA

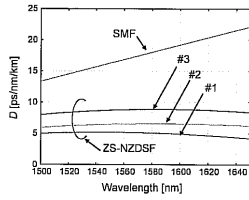
115・・・BPF

116・・・PC

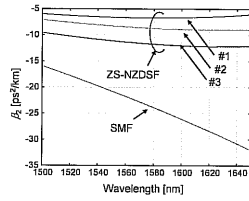
117・・・VOA

40

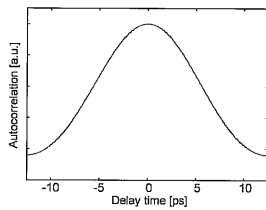
【 図 1 】



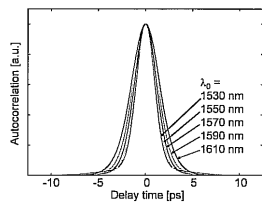
【 図 2 】



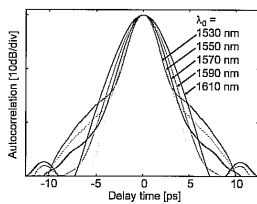
【 図 3 】



【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 4 】

	HNLF	SMF	ZS-NZDSF
1570nm における分散値 [ps/nm/km]	-0.305	17.4357	6.368
分散スロープ値 [ps/nm²/km]	0.0028	0.0386	0
非線形定数 [1/W/km]	13.5	0	0
損失 [dB/km]	1.27	0	0

【 図 5 】

	HNLF長 [m]	SMF長 [m]
一段目	174	350
二段目	156	180
三段目	162	100
四段目	137	68.3
五段目	122	46.7
六段目	111	31.9

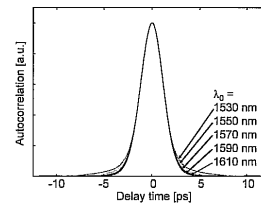
【 図 6 】

波長 [nm]	時間幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	1.52	11.8
1550	1.64	14.3
1570	1.81	17.3
1590	2.03	21.2
1610	2.31	30.4

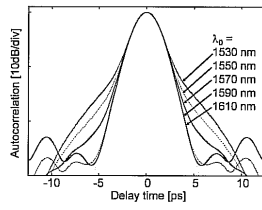
【 図 9 】

波長 [nm]	入力パワー [dBm]	出力幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	19.05	1.79	9.02
1550	19.2	1.81	11.9
1570	19.5	1.81	17.3
1590	20.0	1.80	26.4
1610	20.7	1.79	27.5

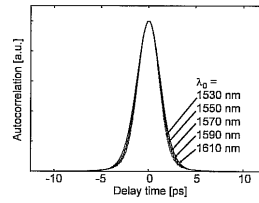
【 図 10 】



【図 1 1】



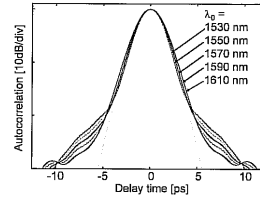
【図 1 4】



【図 1 2】

	HNLF長 [m]	ZS-NZDSF長 [m]
一段目	174	929
二段目	156	478
三段目	162	266
四段目	137	181
五段目	122	124
六段目	111	84.6

【図 1 5】



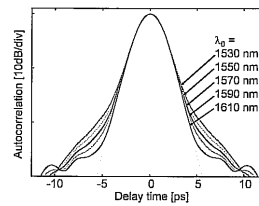
【図 1 3】

波長 [nm]	時間幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	1.71	15.3
1550	1.76	16.3
1570	1.81	17.3
1590	1.87	18.4
1610	1.94	19.6

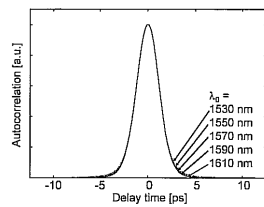
【図 1 6】

波長 [nm]	入力パワー [dBm]	出力幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	19.3	1.81	13.5
1550	19.4	1.81	15.3
1570	19.5	1.81	17.3
1590	19.6	1.82	19.4
1610	19.8	1.80	22.9

【図 1 8】



【図 1 7】



【図 1 9】

	HNLF	SMF	ZS-NZDSF
1570nm における分散値 [ps/nm/km]	-0.305	17.4357	6.568
分散スロープ値 [ps/nm ² /km]	0.0028	0.0586	0.0022
非線形定数 [1/W/km]	13.5	1.3	3
損失 [dB/km]	1.27	0.2	0.241

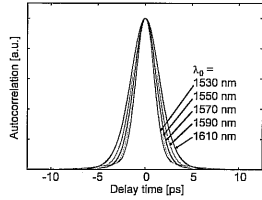
【図 2 0】

	HNLF長 [m]	SMF長 [m]
一段目	142	350
二段目	141	200
三段目	186	103
四段目	165	70.1
五段目	153	48.0
六段目	145	32.7

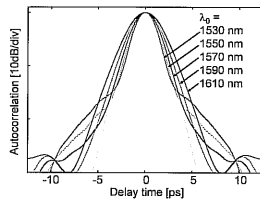
【 2 1 】

波長 [nm]	時間幅 [ps]	ピークベデスタル比 [dB]
1530	1.49	12.5
1550	1.62	15.1
1570	1.80	17.7
1590	2.04	20.7
1610	2.33	24.5

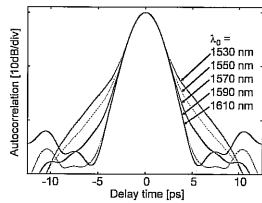
【 2 2 】



【 2 3 】



【 2 6 】



【 2 7 】

	HNLF長 [m]	ZS-NZDSF長 [m]
一段目	106	1500
二段目	110	250
三段目	115	166
四段目	115	110

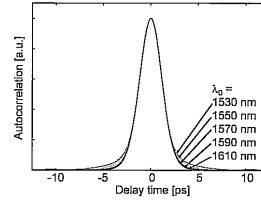
【 2 8 】

波長 [nm]	時間幅 [ps]	ピークベデスタル比 [dB]
1530	1.61	19.0
1550	1.69	20.9
1570	1.77	22.8
1590	1.83	24.5
1610	1.87	25.5

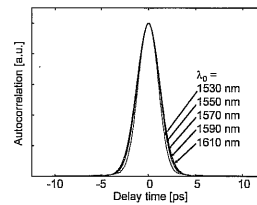
【 2 4 】

波長 [nm]	入力パワー [dBm]	出力幅 [ps]	ピークベデスタル比 [dB]
1530	19.0	1.78	9.28
1550	19.15	1.81	12.1
1570	19.5	1.80	17.7
1590	20.0	1.80	26.5
1610	20.7	1.79	28.2

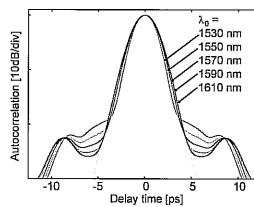
【 2 5 】



【 2 9 】



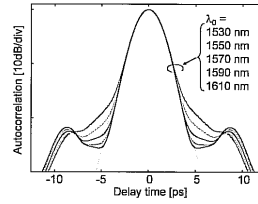
【 3 0 】



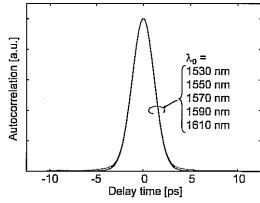
【 3 1 】

波長 [nm]	入力パワー [dBm]	出力幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	19.1	1.78	16.3
1550	19.3	1.77	19.8
1570	19.5	1.77	22.8
1590	19.6	1.79	24.7
1610	19.7	1.80	25.6

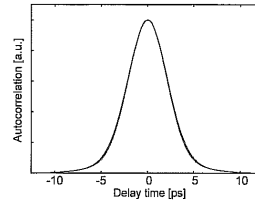
【 3 3 】



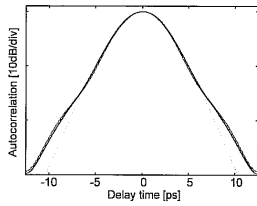
【 3 2 】



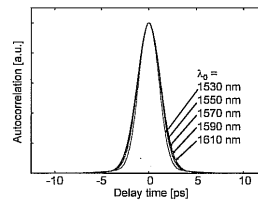
【 3 4 】



【 3 5 】



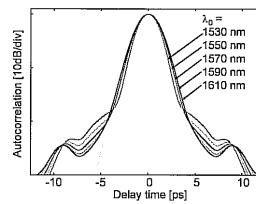
【 3 8 】



【 3 6 】

	HNLFF長 [m]	ZS-NZDSF長 [m]
一段目	0	1700
二段目	110	250
三段目	115	166
四段目	115	110

【 3 9 】



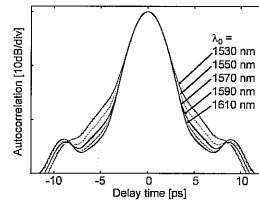
【 3 7 】

波長 [nm]	時間幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	1.61	17.5
1550	1.70	18.8
1570	1.78	19.9
1590	1.84	20.9
1610	1.88	21.6

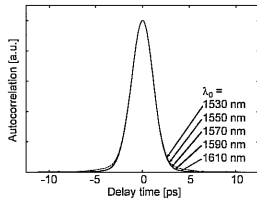
【 図 4 0 】

波長 [nm]	入力パワー [dBm]	出力幅 [ps]	ピークベダスタル比 [dB]
1530	19.1	1.80	14.4
1550	19.3	1.79	17.3
1570	19.5	1.78	19.9
1590	19.6	1.80	21.6
1610	19.7	1.80	22.9

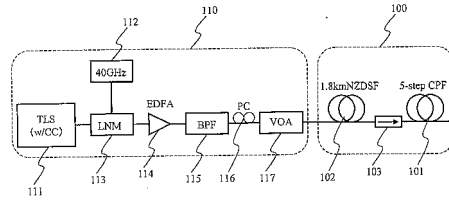
【 図 4 2 】



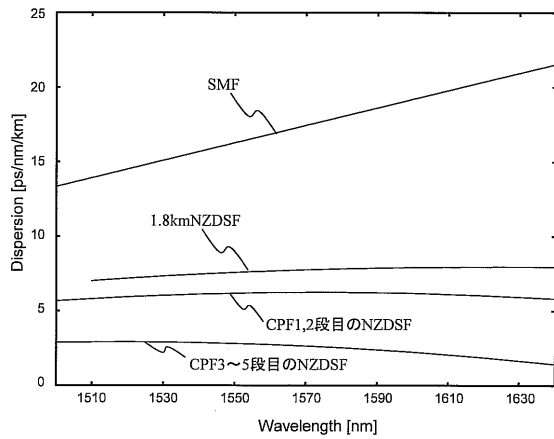
【 図 4 1 】



【 図 4 3 】

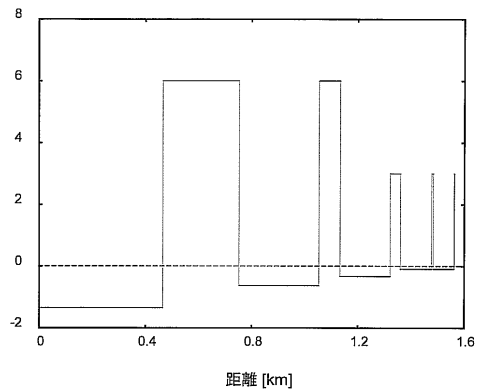


【 図 4 4 】

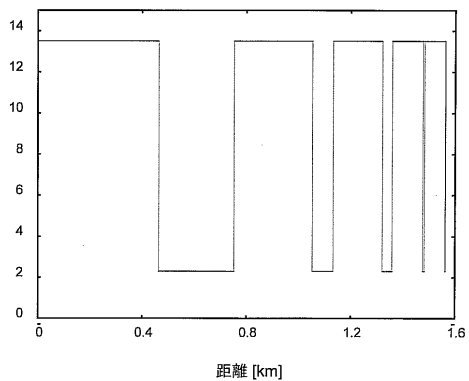


【 図 4 5 】

(a) 波長1570nmのときの分散値 [ps/nm/km]

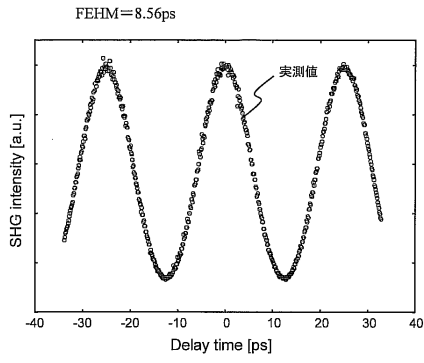


(b) 非線形定数 [1/W/km]

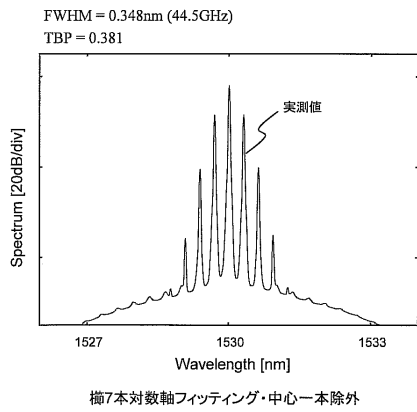


【 図 4 6 】

(a) 自己相関波形

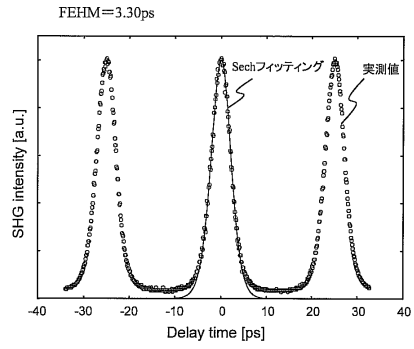


(b) スペクトル

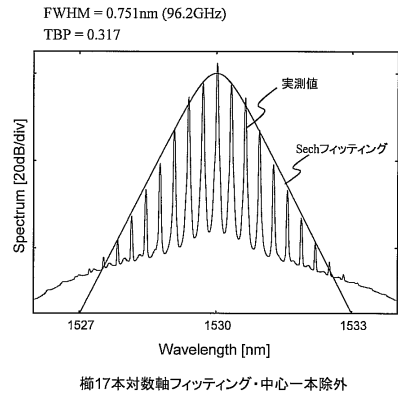


【 図 4 7 】

(a) 自己相関波形

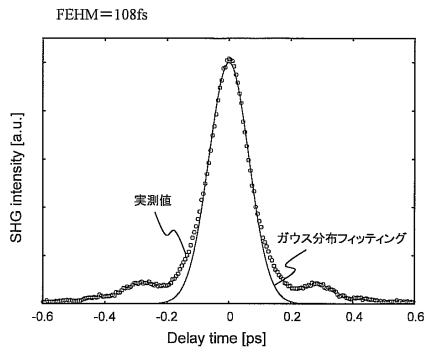


(b) スペクトル

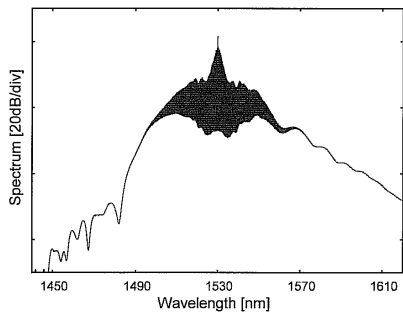


【 図 4 8 】

(a) 自己相関波形

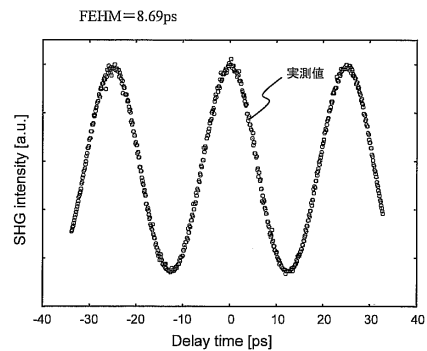


(b) スペクトル

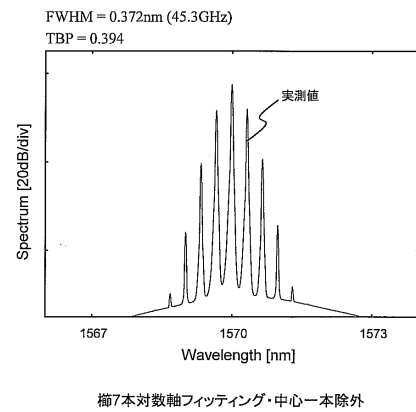


【 図 4 9 】

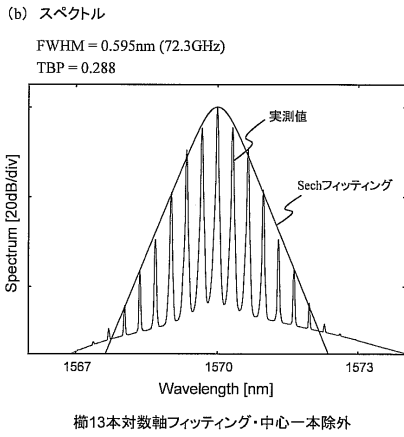
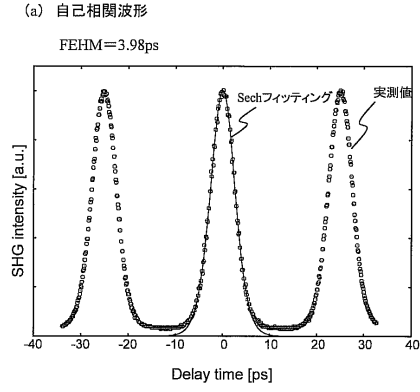
(a) 自己相関波形



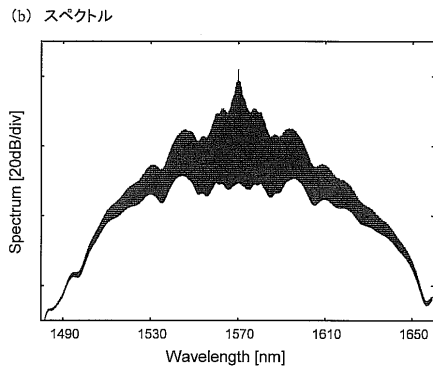
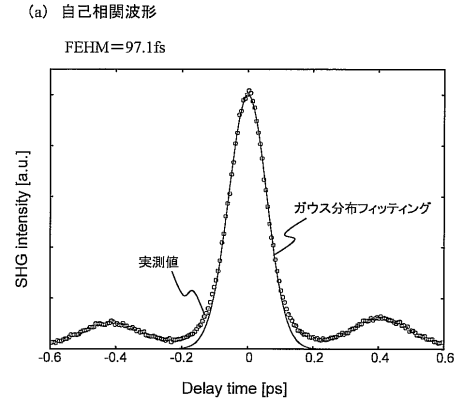
(b) スペクトル



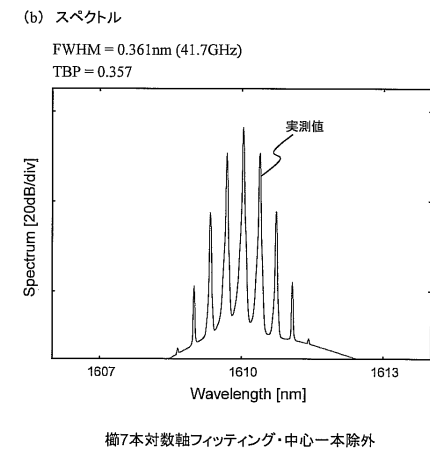
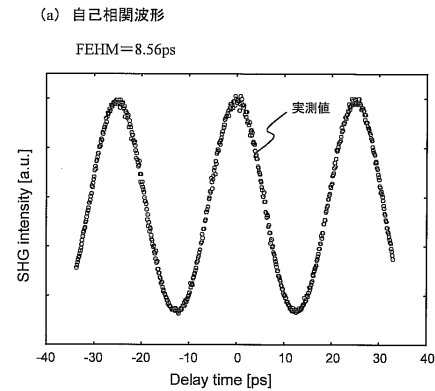
【 図 5 0 】



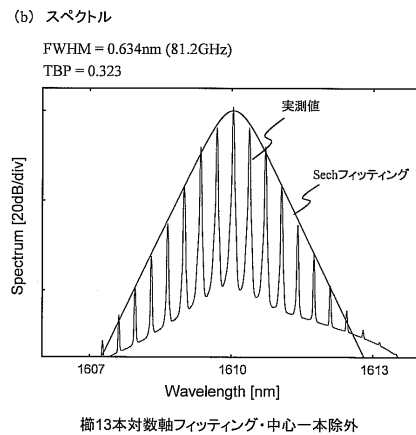
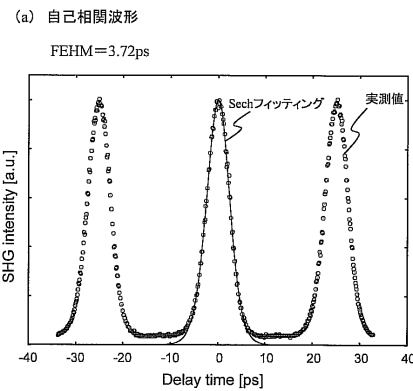
【 図 5 1 】



【 図 5 2 】



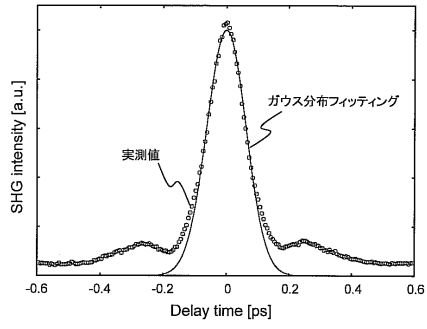
【 図 5 3 】



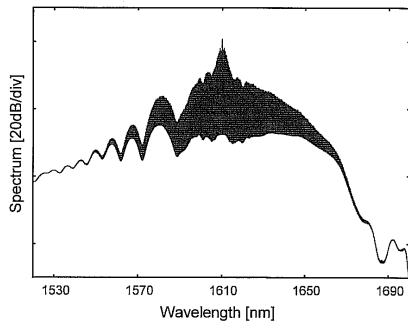
【 図 5 4 】

(a) 自己相関波形

FEHM=104fs



(b) スペクトル



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開昭62-165608(JP,A)
特開2003-241001(JP,A)
特開2004-347817(JP,A)
国際公開第2003/104886(WO,A1)
特開2007-072071(JP,A)
国際公開第2004/049054(WO,A1)
特開2004-117590(JP,A)
特開平11-223741(JP,A)
特開平08-146479(JP,A)
特表2002-531868(JP,A)
特開2006-171677(JP,A)
忠隈昌輝, 麻生修, 並木周, 短尺高非線形ファイバを用いた楕円分散配置ファイバによる104GHz
328fs パルス発生, 2000年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 日本, 2000年, B-13-
3, p.426

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/00 - 6/10
G02F 1/35, 1/365
H01S 5/00 - 5/50
H04B 9/00

JSTPlus(JDreamII)
JST7580(JDreamII)
IEEE Xplore