

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5574558号
(P5574558)

(45) 発行日 平成26年8月20日(2014.8.20)

(24) 登録日 平成26年7月11日(2014.7.11)

(51) Int.Cl.	F I				
HO1S 3/10 (2006.01)	HO1S	3/10		Z	
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B	6/10		C	
GO2F 1/35 (2006.01)	GO2F	1/35	501		
GO2F 1/37 (2006.01)	GO2F	1/37			
HO1S 3/067 (2006.01)	HO1S	3/06		B	
請求項の数 11 外国語出願 (全 21 頁) 最終頁に続く					

(21) 出願番号	特願2001-154396 (P2001-154396)	(73) 特許権者	593185670
(22) 出願日	平成13年5月23日 (2001.5.23)		イムラ アメリカ インコーポレイテッド
(65) 公開番号	特開2002-118315 (P2002-118315A)		アメリカ合衆国 ミシガン州48105
(43) 公開日	平成14年4月19日 (2002.4.19)		アンアーバー ウッドリッジ・アベニュー
審査請求日	平成20年5月14日 (2008.5.14)		1044
(31) 優先権主張番号	09/576772	(74) 代理人	100094112
(32) 優先日	平成12年5月23日 (2000.5.23)		弁理士 岡部 譲
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100085176
			弁理士 加藤 伸晃
		(74) 代理人	100096943
			弁理士 白井 伸一
		(74) 代理人	100101498
			弁理士 越智 隆夫
		(74) 代理人	100104352
			弁理士 朝日 伸光
最終頁に続く			

(54) 【発明の名称】 モジュール式、高エネルギー、広波長可変性、超高速、ファイバ光源

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ダイオードポンプされたNd又はYb受動モードロックファイバレーザと、可飽和吸収体と、を含み、1μm帯の波長におけるフェムト秒パルスを生成する、シード光源と、

前記ファイバレーザの出力を増幅し、非線形位相シフトを許容するように構成され、放物線状パルスを生成可能な、Ybファイバ増幅器と、

前記受動モードロックファイバと前記Ybファイバ増幅器との間に設けられた光学変調器であって、前記モードロックファイバレーザからのパルスの繰返し周期を低減し、前記Yb増幅器によって増幅された利用可能なパルスエネルギーを増大させ、前記Yb増幅器による増幅のためのパルスの選択を提供するように制御可能な光学変調器とを備えたレーザシステム。

【請求項2】

前記シード光源と前記ファイバ増幅器との間のパルス拡張器と、前記ファイバ増幅器の出力に光学的に結合されたパルス圧縮器とをさらに備え、前記レーザシステムはチャープパルス増幅システムとして動作する請求項1に記載のレーザシステム。

【請求項3】

前記受動型モードロックファイバレーザは、多モードである、請求項1に関するレーザシステム。

【請求項4】

前記受動型モードロックファイバレーザは、偏光保持である、請求項1に関するレーザ

システム。

【請求項 5】

前記受動型モードロックファイバレーザは、単一モードで偏光保持である、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 6】

前記シード光源は、前記ファイバ増幅器で放物線状パルス生成を誘起するパルスを発生する、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 7】

前記シード光源と前記ファイバ増幅器との間であって、該シード光源を該ファイバ増幅器に結合し、1 Km 以下の長さの光ファイバをもつ結合器をさらに有する請求項 6 に関するレーザシステム。

10

【請求項 8】

前記ファイバ増幅器の出力に結合され、増幅されたパルスを前記 Y b ファイバ増幅器から受け取る光ファイバをさらに有し、該 Y b ファイバ増幅器及び該光ファイバは、前記パルスを時間に関して分散的に広げる一方で、自己位相変調及び利得を加える、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 9】

前記光ファイバは、ホーリファイバ、一本の数モードファイバおよび一本あるいは二本の単一モードファイバに接続された一本の数モードファイバからなる群から選択される請求項 8 に関するレーザシステム。

20

【請求項 10】

前記シード光源は、前記ファイバ増幅器で放物線状パルス生成を誘起するように 100 ps より短いパルスを発生し、さらに、前記ファイバ増幅器は、10 より大きい利得をもつ、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 11】

該パルス圧縮器の分散は、該パルス圧縮器がバンド幅限界に近いパルスを出力するようなものである、請求項 2 に関するレーザシステム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の背景】

30

1. 発明の分野この発明は、波長選択ができ、コンパクトで、モジュール式で、かつ効率的な高パワー超短レーザパルス光源に関し、この超短レーザパルス光源は、超高速レーザ技術の工業使用における基本的な構成要素である。

【0002】

2. 関連技術の記述ファイバレーザは、これまで長い間、超短パルス発生用の有効な媒体を与えると認識されてきた。しかしながら、これまで、そのようなシステムは、主に、波長可変性に対して制限されたオプションをもち、かつ最小の達成可能パルス幅に限界がある、チャープしたブラッグ回折格子を使用したチャープパルス増幅に基づいていた (A. Galvanauskas and M.E. Fermann, 'Optical Pulse Amplification using Chirped Bragg Gratings,' United States Patent, No. 5,499,134)。チャープしたブラッグ回折格子は、実に広く入手できるデバイスに発達してきた、そして、ブラッグ回折格子内のチャープは、線形に、あるいはチャープパルス増幅システム内での任意のオーダの分散を補償するために、非線形に、さえもデザインされる (A. Galvanauskas et al., 'Hybrid Short-Pulse Amplifiers with Phase-Mismatch Compensated Pulse Stretchers and Compressors', U.S. Patent No. 5,847,863)、このチャープパルス増幅システムは、バンド幅制限パルス、すなわち、与えられたスペクトルのパルスバンド幅にとって最も短くできるパルス、の発生に重要である。

40

【0003】

光ファイバのパワーとエネルギーの限界を最大化するために、チャープパルス増幅を使用することは、明らかに望ましいが、同時に、システム集積化の要求 (ブラッグ回折格子は、

50

最も高い可能な分散を与えるために、透過よりむしろ反射で動作する必要がある)は、そのような標準的なチャープパルス増幅システムの使用を実用的でなくする。チャープパルス増幅の代わりとして、多モードファイバ増幅器での高パワーパルス増幅が提案された(M. E. Fermann and D. Harter, 'Single-mode Amplifiers and Compressors Based on Multi-mode Optical Fibers', United States Patent, No. 5, 818, 630)。またチャープパルス増幅の代わりとして、ファイバ増幅器でのソリトンラマン圧縮を使用することや、あるいは、一般的に、非線形ファイバ増幅器中でのパルス圧縮を使用することが提案された(M. E. Fermann, A. Galvanauskas and D. Harter, 'Apparatus and Method for the Generation of High-power Femtosecond Pulses from a Fiber Amplifier', United States Patent, No. 5, 880, 877)。

10

【0004】

明らかに、多モードファイバの使用は、そのようなシステムの性能をさらに改善するために、チャープパルス増幅およびソリトンラマン圧縮と結合される。しかしながら、今日まで、全体のシステム性能をさらに最適化するためのパルス形状制御法は、全然記述されなかった。同じく、そのようなチャープパルス増幅システムの拡張器部分に自己-位相変調を使用することは、提案されていなかった。

【0005】

さらに、システムのコンパクト化と高エネルギー化の折衷案として、バルク光学圧縮器と合同してファイバ分散遅延ラインを使用することは、有利であり、少なくとも、高-エネルギーファイバレーザシステムの部分的な集積化をもたらす(M. E. Fermann A. Galvanauskas and D. Harter: 'All fiber source of 100 nJ sub-picosecond pulse', Appl. Phys. Lett., vol. 64, 1994, pp. 1315-1317)。しかしながら、今日まで、バンド幅限界近くまでパルスを再圧縮するために、拡張器と圧縮器の組合せの中で、より高次の3次および4次分散を制御する有効な方法は、全然開発されなかった。

20

【0006】

チャープパルス増幅の代わりとして、高-利得正分散(ソリトンを支持しない)シリカ-ベースの単一モードエルビウム増幅器をバルクプリズム圧縮器と組み合わせて使用することにより、有効なパルス圧縮が得られるということも以前に提案された(K. Tamura and M. Nakazawa, 'Pulse Compression by Nonlinear Pulse Evolution with Reduced Optical Wave Breaking in Erbium-Doped Fiber Amplifiers', Opt. Lett., Vol. 21, p. 68 (1996))。しかしながら、この技術をシリカ-ベースのエルビウム増幅器と合同して使用することは、問題である、なぜなら、正分散のための要求がファイバコアサイズを約5ミクロンに制限するか、さもなければ、負の材料分散が、正の導波路分散を支配し、全体を負のファイバ分散にするからである。同様に、シリカ-ベースの多モードファイバは、エルビウム増幅器波長で負の分散をもち、有効なパルス圧縮のためにそれらを使用することを妨げている。このように、正分散エルビウム増幅器の限定されたコアサイズは、達成可能なパルスエネルギーを大きく減少させる。

30

【0007】

さらに、一つのエルビウム増幅器の後で付加的なスペクトル拡大やパルス増幅を行う方法は、田村らによって示されなかった。同様に、エルビウム増幅器の分散を補償するためにプリズムパルス圧縮器の性能を最適化させる方法は、田村らによって教示されなかった。

40

【0008】

チャープパルス増幅の別の代わりとして、非増幅光ファイバをバルク回折格子圧縮器と合同して使用することが提案された(D. Grischkowsky et al. and J. Kafka et al., U.S. Patent No. 4, 750, 809)。しかしながら、そのようなシステムには利得がないので、高パルスエネルギーが、高出力パワーを得るために非線形光学素子に結合されなければならない、システムのピークパワー特性を低下させる。さらに、そのような光学配置で、より高次の分散を補償する方法は議論されておらず、このアプローチの実現性を大きく制限している。さらに、そのようなシステムへの入力でのパルス形状を制御することなしで、線形チャープをもつスペクトル広がり、非常に限定された入力パワーでのみ得られる。入力パルス形状

50

の制御は、Kafkaらによって議論されなかった。同様に、バルク回折格子圧縮器と合同して最も短い可能なパルスを得るために、そのような非線形光学素子における2次および3次分散制御が、必要とされるが、これもKafkaらによって議論されなかった。

【0009】

別の(分散-補償)導波路素子中に色分散を使用しての(低パワー)光波信号中の色分散補償は、電気通信システムの性能を最適化するために導入された(C.D.Poolle, 'Apparatus of compensating chromatic dispersion in optical fibers,' US Patent No.5,185,827)。しかしながら、高-パワーパルス光源の場合、分散-補償導波路素子によって導入される自己-位相変調は、それらの有効な使用を妨げる。さらに、Poolleによって議論されたシステムは、分散-補償導波路素子中で高次モードを選択的に吸収するため、あるいは、分散-補償導波路素子中で基本モードを選択的に増幅するために、モード-変換器および、あるいは希土類添加ファイバと合同して動作するだけである。自己-位相変調の存在下での高-パワー光パルスの分散を補償する方法は、何ら教示されなかった、また、モード-変換器なしの分散-補償導波路を実施する方法は、何ら提案されなかった。

10

【0010】

モード-変換器と高次モードを使用する代わりとして、W-スタイルの屈折率プロファイルをもつファイバが知られている(B.J.Ainslie and C.R.Day, 'A review of single-mode fibers with modified dispersion characteristics'; J.Lightwave Techn., vol.LT-4, No.8, pp.967-979, 1988)。しかしながら、高-パワーファイバチャープパルス増幅システムへの、そのようなファイバデザインの使用は、議論されたことがなかった。

20

【0011】

超高速ファイバ増幅器の効率を最大にするために、Ybファイバ増幅器の使用が提案された(D.T.Walton, J.Nees and G.Mourou, "Broad-bandwidth pulse amplification to the 10 μJ level in an ytterbium-doped germanosilicate fiber," Opt.Lett., vol.21, no.14, pp.1061(1996))、しかしながら、Waltonらによる研究は、信号パルスの光源としてモードロックTi:サファイアレーザを採用するばかりでなく、Yb添加ファイバの励起にアルゴン-レーザポンプTi:サファイアレーザを採用したが、これは、非常に効率がわるく、且つ明らかに小型装置と両立しない。さらに、増幅過程で光パルスの位相を制御する方法は、何ら提案されなかった、すなわち、Ti:サファイアレーザからの100 fsパルスが、1.6 kmの長さの単一モードファイバ分散遅延ラインを通してYb増幅器に結合されたが、この遅延ラインは、高次分散による大きな位相歪みを起こし、システムを超高速応用に適用することを大きく制限する。それよりは、Yb増幅器中で高品質高パワー放物線状パルスを誘起するためには、200 - 400 fsの範囲のシードパルスが数mの長さのYb増幅器には好ましい。Waltonらによる単一モードYb添加ファイバ増幅器の使用は、Yb増幅器のエネルギーとパワーの限界をさらに大きく制限する。多モードYb添加ファイバの使用は、内容がここに参考文献として組み入れられた米国出願No.09/317,221に提案されたが、Yb増幅器と両立する小型超短パルス光源は、わかりにくいまま残った。

30

【0012】

能動的な光変調機構を組み入れた広可変パルスYb-ファイバレーザが、最近記述された(J.Porta et al., 'Environmentally stable picosecond ytterbium fiber laser with a broad tuning range', Opt.Lett., vol.23, pp.615-617(1998))。このファイバレーザは、おおよそYbの利得バンド幅内の同調範囲を設けているが、そのレーザを超高速光学に適用することは、そのレーザで発生される比較的長いパルスにより制限される。一般的に能動モードロックレーザは、受動モードロックレーザより長いパルスを発生し、この現状のケースでは、発生したパルスのバンド幅は、5 psの最小パルス幅をもち僅か0.25 nmである。

40

【0013】

非線形結晶中での周波数変換と合同してラマン-シフトを使った広波長可変ファイバレーザ光源が、最近記述された。(M.E.Fermann et al., US Patent No.5,880,877 and N.Nish

50

izawa and T.Goto, "Simultaneous Generation of Wavelength Tunable Two-Colored Femtosecond Soliton Pulses Using Optical Fibers," *Photonics Techn.Lett.*, vol.11, no.4, p421-423参照)。基本的に、空間的に不変なラマンシフトが提案され、その結果、波長可変範囲は300 - 400 nmに制限される(Nishizawa et al.参照)。さらに、非線形光学結晶での継続したラマンシフトと非線形周波数変換の応用に基づくそのような高度な非線形システムのノイズを最小にする方法は、何も知られていない。さらに、西沢らによって記述されたシステムは、ラマンシフトをシードするための付加的偏光制御エルビウムファイバ増幅器で増幅された比較的複雑な低パワー偏光制御エルビウムファイバ発振器によった。さらに、Erファイバレーザからの周波数逡倍出力のラマンシフトを可能にする方法は、何も記述されていない。

10

【0014】

高パワーファイバ発振器からのパルスで、あるいは、高パワーファイバ発振器からの周波数変換されたパルスで、直接シードされたラマンシフトが明らかに好ましい。そのようなファイバ発振器は、最近多モード光ファイバを使って記述された(M.E.Fermann, 'Technique for mode-locking of multi-mode fibers and the construction of compact high-power fiber laser pulse sources', U.S. serial number 09/199,728)。しかしながら、ラマンシフトをその後使用したような発振器の周波数を変換する方法は、今日まで論証されたことがない。

【0015】

【発明の要旨】

したがって、本発明の目的は、モジュール化しやすく、小型、広波長可変、高ピーク、高平均パワー、低ノイズ超高速ファイバ増幅レーザシステムを提供することである。

20

【0016】

1) 短パルスシード光源、2) 広バンド幅ファイバ増幅器、3) 分散パルス拡張素子、4) 分散パルス圧縮素子、5) 非線形周波数変換素子、6) ファイバ分配用光学部品、のような様々な容易に交換できる光学系を使用することで、システムのモジュール化を確実にすることが、発明の別の目的である。さらに、提案された任意のモジュールは、交換できる光学系の一部で構成され得る。

【0017】

高度に集積化された分散遅延ラインも、ダイオードレーザで直接あるいは間接にポンプされた有効なファイバ増幅器も、使用することで、システムの小型化を確実にすることが、発明の別の目的である。ファイバ増幅器の高ピークパワー特性は、放物線状あるいは他の最適化されたパルス形状を使うことで、大きく拡大される。自己位相変調と合同して、放物線状パルスは、大バンド幅、高ピークパワーパルスの発生も、良く制御された分散パルス拡張も、可能にする。高パワー放物線状パルスは、ファイバの材料分散が正である波長で動作する高利得の単一あるいは多モードファイバ増幅器で発生される。

30

【0018】

放物線状パルスは、自己位相変調あるいは一般的なカー効果型光学非線形性の存在下でも相当なファイバ長に沿って分配されるかあるいは伝搬され、十分に線形なパルスチャープのみを招く。そのようなファイバ分配あるいはファイバ伝搬ラインの端部で、パルスは、おおよそバンド幅限界まで圧縮される。

40

【0019】

さらに、ファイバ増幅器の高エネルギー特性は、放物線状パルスあるいは他の最適なパルス形状と合同してチャープパルス増幅を使用することで大きく拡大され、そのパルス形状は、パルス品質の劣化なしに沢山の自己位相変調を許容できる。より高度に集積化されたチャープパルス増幅システムは、バルク光学パルス圧縮器(あるいは低非線形性ブラッグ回折格子)あるいはパルス圧縮を周波数変換と結びつける周期的に分極された(ポールした)非線形結晶を使用することで、光ファイバの高エネルギー特性を損なうことなく作られる。

【0020】

50

ファイバパルス拡張器とバルク光学圧縮器での分散は、調整可能な2次、3次、4次分散をもつファイバパルス拡張器を組み込むことで、4次の位相まで適合される。調整可能な高次分散は、最適化された屈折率分布をもつ高開口数単一モードファイバのみを使うか、または線形チャープファイバ回折格子と合同して標準的な階段状屈折率分布（ステップ・インデックス）高開口数ファイバを使用することで得られる。あるいは、高次分散は、高開口数の数モードファイバでの高次モードの分散特性を使用するか、非線形チャープファイバ回折格子を使用するか、あるいは透過型ファイバ回折格子と合同して線形チャープファイバ回折格子を使用することで、制御される。調整可能な4次分散は、ファイバブラッグ回折格子、透過型ファイバ回折格子のチャープを制御し、且つ異なる割合の2次、3次、4次分散をもつファイバを使用することで、得られる。同様に、高次分散は、周期的に

10

【0021】

ファイバ増幅器は、好ましくは短パルスファイバ光源の形をした短パルスレーザ光源でシードされる。Ybファイバ増幅器の場合、ラマンシフトした周波数逡倍短パルスErファイバレーザ光源が、広波長可変シード光源として、実装される。1.5 μmから1.0 μmへの周波数変換のノイズを最小にするために、Erファイバレーザパルス光源の自己制限ラマンシフトが使われる。あるいは、非線形周波数変換プロセスのノイズは、自己制限周波数逡倍を実施することで最小化される。逡倍結晶の同調曲線の中心波長は、ラマンシフトパルスの中心波長より短い。

【0022】

ラマンシフトと周波数逡倍のプロセスは逆にすることも可能である。ここでは、Erファイバレーザは、最初に周波数逡倍され、その後800 nm前後以上の波長に対してソリトン・維持分散を与える最適化されたファイバで、ラマンシフトされ、1 μmの波長領域のシード光源をつくる。

20

【0023】

Yb増幅器用の低・複雑シード光源の代わりとして、モードロックYbファイバレーザが使用される。ファイバレーザは、強くチャープしたパルスを作るようにデザインされ、光学フィルタが、Yb増幅器用バンド幅限界近いシードパルスを選定するために結合される。

【0024】

放物線状パルスは、十分なファイバ長に沿って伝送されるので、そのパルスは、ファイバ光学通信システムにも使用される。このシステムでは、外部パルス光源で発生された放物線状パルスが伝送される。あるいは、放物線状パルスは、伝送プロセスでも発生される。後者のケースでは、伝送システムでの光学非線形性の有害な作用が、長い、分布型、正分散増幅器を実装することで一般的に最小化される。そのような増幅器は、少なくとも10 kmの長さで10 dB/km以下の利得をもつ。増幅器当たりの全利得は、光学非線形性の有害な作用の最小化のための放物線状パルス形成の開始を活用するために、10 dBを超えるべきである。伝送ラインのチャープ補償は、ファイバ伝送線に沿ってと伝送線の端部にもチャープファイバブラッグ回折格子を使用することで、通常実施される。光学バンド幅フィルターが、伝送したパルスのバンド幅制御のために、さらに実装される。

30

【0025】

光ファイバでの短パルスのラマンシフトに基づく波長可変パルス光源は、多くの応用、たとえば、分光分析で有益である。しかしながら、電気通信システム用の波長可変ファイバラマン増幅器の製作にラマンシフトを応用することで、非常に魅力的な装置が作られる。この波長可変システムにおいて、ラマンシフトしたポンパルスは、可変波長範囲のためにラマン利得を与え、ポンパルスに関して赤にシフトされる。さらに、ラマン利得スペクトルの形状は、ラマンシフトしたポンパルスを変調することで、制御される

40

【0026】

【提出された実施例の詳細説明】

発明の一般化されたシステム図が、図1に示される。レーザシード光源1（シードモジュ

50

ール；SM)で発生されたパルスは、パルス拡張モジュール2(P SM)に結合され、そこでパルスは、分散的に時間が拡張される。拡張されたパルスは、クラッドポンプされたY bファイバ増幅器3(増幅器モジュール、AM 1)の基本モードに結合され、そこでパルスは、少なくとも10倍増幅される。最後に、パルスは、パルス圧縮器モジュール4(PC M)に結合され、そこでほぼバンド幅限界近くまで時間的に圧縮される。

【0027】

図1に示した実施例は、モジュール型で、4つのサブシステム；SM 1, P SM 2, AM 1 3, PC M 4、からなる。サブシステムは、別の実施例に記載されたように、異なる形状にはもちろん、個別でも使用される。

【0028】

以下、議論はSM - P SM - AM 1 - PC Mシステムに関連する。SM 1は、好ましくはフェムト秒パルス光源(シード光源5)を有する。P SMは、好ましくは一本のファイバ6を有し、SMとP SMの間の結合は、好ましくは融着で行われる。P SMの出力は、好ましくはAM 1モジュール3の内部のY b増幅器7の基本モードに注入される。結合は、融着、ファイバ結合器、あるいはP SM 2とファイバ増幅器7の間のバルク光学結像システム、で行われる。すべてのファイバは、好ましくは偏光保持型が選択される。PC M 4は、好ましくは小型化の理由で、一つあるいは二つのバルク光学回折格子で形成される分散遅延ラインを有する。あるいは、多数のバルク光学プリズムやブラッグ回折格子がPC M 4に使われる。PC M 4への結合は、図1に単レンズ8で描写されているように、バルク光学レンズシステムで行われる。ファイバブラッグ回折格子を含むPC Mの場合、ファイバピグテールがPC Mへの結合に使われる。

【0029】

フェムト秒レーザシード光源の一例として、ラマンシフト周波数逡倍Erファイバレーザが、図2のSM 1 b内に示されている。フェムト秒レーザ9は、波長 $1.57 \mu\text{m}$ で200 fsパルス、繰り返し周期50 MHzで1 n Jのパルスエネルギーを供給する市販の高エネルギーソリトン光源(IMRA America, Inc., Femtolite B-60TM)である。

【0030】

$1.5 \mu\text{m}$ から $2.1 \mu\text{m}$ の波長領域への最適なラマンシフトのために、偏光保持ラマンシフトファイバ10の長手方向にコア径(テーパ化した)を減らすことが行われる。コア径の減少は、 1.5 から $2.1 \mu\text{m}$ までの全波長範囲でラマンシフトでの2次分散を零(しかし負)近くまで保つために必要とされる。2次分散の絶対値を小さく保つことで、ラマンシフト内でのパルス幅が最小化され、このことは、ラマン周波数シフトの最大化をもたらす(J.P.Gordon, "Theory of the Soliton Self-frequency Shift," Opt.Lett., 11, 662(1986))。テーパ化なしでは、ラマン周波数シフトは、一般に $2.00 \mu\text{m}$ 前後に制限され、この $2.00 \mu\text{m}$ は、周波数逡倍後でもY bファイバ増幅器の利得バンド幅と一致しない。

【0031】

この特別の例では、それぞれ $6 \mu\text{m}$ と $4 \mu\text{m}$ のコア径をもつ30 mと3 mの長さのシリカ'ラマン'ファイバ($1.56 \mu\text{m}$ で単一モード)からなる2段階ラマンシフト10が実装される。シリカの赤外吸収端の始まりが $2.0 \mu\text{m}$ であることにより、ラマンシフト10の終端方向にテーパ化する率を増加することが有利である。当例では、 $1.57 \mu\text{m}$ から $2.10 \mu\text{m}$ への変換効率25%以上が得られている。なめらかに変化するコア径をもつ、より多数のファイバを使うか、あるいはなめらかに変化するコア径をもつ単一のテーパ化ファイバを実装することで、よりよい変換効率を得られる。

【0032】

ラマンシフトしたパルスの $1.05 \mu\text{m}$ 領域への周波数変換は、適当に選定されたポーリング周期をもつ一本の周期的にポールしたLiNbO₃(PPLN)結晶11で行われる。(この仕様全てに渡り、周波数変換用の好ましい材料は、PPLNであると示されているが、他の周期的にポールしたPPリチウムタンタレート、PP MgO : LiNbO₃, PP KTPのような強電性光学材料あるいはKTP異種同形体の周期的にポールした

10

20

30

40

50

結晶も有利に使用されることが理解されるべきである。) P P L N 結晶 1 1 との結合は、図 2 にレンズ 1 2 と示されたレンズシステムを使って行われる。P P L N 結晶 1 1 の出力は、レンズ 1 2 で出力ファイバ 1 3 に結合される。2 . 1 μ m の周波数逡倍の場合 1 6 % の変換効率が得られ、結果的に 1 μ m の波長領域で 4 0 p J までのパルスエネルギーをもたらす。周波数変換されたパルスのスペクトル幅は、P P L N 結晶 1 1 の長さの適当な選択で選定される、たとえば、1 3 m m の長さの P P L M 結晶は、約 8 0 0 f s のパルス幅に対応する 1 . 0 5 μ m 領域での 2 n m のバンド幅を生成する。発生されたパルス幅は、おおよそ P P L N 結晶の長さに比例する。すなわち、4 0 0 f s のパルス幅をもつ周波数変換されたパルスは、長さ 6 . 5 m m の P P L N を必要とする。このパルス幅縮小は、周波数変換されたパルス幅が、約 1 0 0 f s に達するまで続けられ、ラマンシフトしたパルスの制限された 1 0 0 f s のパルス幅は、さらなるパルス幅の減少を制限する。

10

【 0 0 3 3 】

さらに、周波数変換されたパルス幅がラマンシフトしたパルスのパルス幅より十分長いとき、ラマンパルスの広いバンド幅は、周波数変換されたパルスの波長同調を可能にするために活用される。すなわち、有効な周波数変換は、周波数で $2 (1 - \quad)$ から $2 (1 + \quad)$ までのパルス範囲にとって得られる。ここで、 $2 \quad$ は、ラマンシフトしたパルスのスペクトルの最大値の半分でのスペクトル幅である。ここでの連続波長同調は、周波数変換結晶 1 1 の温度を調節することで簡単に行われる。

【 0 0 3 4 】

ラマンシフト、P P L N 結晶の組み合わせ、の増幅されたノイズは、次のように最小化される。E r ファイバレーザパルス光源の自己制限ラマンシフトは、ラマンシフトをシリカベースの光ファイバでの 2 μ m より大きい方に拡張することで使用される。2 μ m 以上の波長の場合、シリカの赤外吸収端がパルスを大きく減衰し始め、ラマンシフトの制限や増幅変動の減少をもたらす。すなわち、1 . 5 μ m での増加したパルスエネルギーは、より大きなラマンシフトや 2 μ m の波長領域でのより大きな吸収に移るのに役立ち、この増加は、したがってこの領域でのラマンシフトしたパルスの振幅を安定させる。

20

【 0 0 3 5 】

あるいは、非線形周波数変換プロセスのノイズは、自己制限周波数逡倍を行うことで最小化され、その場合、逡倍結晶の同調曲線の中心波長は、ラマンシフトしたパルスの中心波長より短い。再び、1 . 5 μ m 領域での増加したパルスエネルギーは、より大きなラマンシフトに移り、減少した周波数変換効率を引き起こし、したがって、周波数逡倍したパルスの振幅が安定化される。したがって、入力パワーが大きな変化しても一定の周波数変換されたパワーが得られる。

30

【 0 0 3 6 】

これが図 3 に示されており、ここで、1 μ m 波長領域での周波数変換された平均パワーが、1 . 5 6 μ m での平均入力パワーの関数として示されている。自己 - 制限周波数逡倍は、図 3 にも示すように、1 μ m の波長領域での周波数シフトが 1 . 5 6 μ m の波長領域での平均入力パワーに依存しないということを確認にもする。

【 0 0 3 7 】

P S M 2 にはいくつかの選択できる物がある。図 1 に示すように、P S M として一本のファイバ (拡張ファイバ) が使用されるとき、システムからバンド幅限界に近いパルスを得るために、適当な分散遅延ラインが P C M 4 に使用される。しかしながら、P C M 4 の分散遅延ラインが、図 4 に示すようにバルクの回折格子 1 4 から構成されると、問題が生じうる。2 次と 3 次の比 | 3 / 2 | 次分散は、1 μ m の波長領域で動作する典型的な階段状屈折率分布光ファイバでの 2 次と 3 次の比 | 3 / 2 | 次分散に比べて、回折格子型分散遅延ラインで 1 - 3 0 倍大きい。さらに、1 μ m の波長領域で動作する低開口数をもつ標準的な階段状屈折率分布ファイバの場合、ファイバでの 3 次分散の符号は回折格子型分散遅延ラインでの符号と同じである。このように、回折格子型拡張器と合同してファイバ拡張器は、システムでの 3 次および高次分散の補償ための予備手段にならない。

40

【 0 0 3 8 】

50

10倍以上のパルス拡張を行うためには、3次および高次分散の制御が、PCM4での最適なパルス圧縮に重要になる。この問題を打破するために、PSM2の拡張ファイバ6が、W状多クラッド屈折率分布をもつファイバ、すなわち、'W-ファイバ'(B.J.Ainslie et al)あるいはホーリファイバ(T.M.Monroe et al., 'Holey Optical Fibers' An Efficient Modal Model, J.Lightw.Techn., vol.17, no.6, pp.1093-1102)と置き換えられる。W-ファイバとホーリファイバの両方は、2次、3次、および高次の分散の調整可能な値を許可する。Wおよびホーリファイバで可能な小さいコアサイズにより、標準的な単一モードファイバでの値より大きな3次分散の値が得られる。実装は、図1に示されているのに類似しており、別々には表示されない。そのようなシステムの優位性は、PSMが純粹に透過型で動作するということである。すなわち、PSMは反射型で動作する分散ブラッグ回折格子の使用を避け、異なるシステム構成のためにシステムに接続及び取り外しされる。

10

【0039】

2次、3次、および4次分散の調整可能な値をもつ別のPSM2が図5に示されている。PSM20aは、通常の階段状屈折率分布光ファイバが、正、ゼロ、あるいは、負いずれかの3次分散を作ることができるという原理に基づいている。ファイバでの最も高い3次分散の値は、ファイバの最初の高次モード、カット-オフ近くのLP_{1,1}モード、を使うことで作られる。図5で、PSM20aの4次と3次分散は、パルス拡張ファイバの3区間15、16、17を使うことで、調整される。最初の拡張ファイバ15は、ゼロの3次と適切な4次分散をもつ一本のファイバである。最初の拡張ファイバ15は、2番目の拡張ファイバ16に接続され、全チャープパルス増幅システムはもちろん、回折格子圧縮器の3次分散を補償するために選定される。LP_{1,1}モードの3次分散の優位性を確保するために、最初の拡張ファイバ15は、2番目の拡張ファイバ16と互いのファイバ中心でオフセットをもって接続され、2番目の拡張ファイバ16でのLP_{1,1}モードの主な励起をもたらす。2番目の拡張ファイバ16での3次分散の値を最大化するためには、高開口数NA>0.20をもつファイバが望ましい。LP_{1,1}モードを3番目の拡張ファイバ17の基本モードにもどすため、2番目の拡張ファイバ16の終端部で類似の接続技術が使われる。ファイバの適切な選定によって、全増幅器、圧縮器の4次分散が最小化される。3番目の拡張ファイバ17は、無視できる分散をもち、短くできる。

20

【0040】

光学的なモード変換器の使用なしでLP_{1,1}モードからLP_{0,1}モードへのパワー伝搬を行うことで受ける避けられない50%あるいはそれ以上の損失により、全ファイバ拡張器アセンブリの伝搬損失は、少なくとも25%である。2番目の拡張ファイバのLP_{0,1}モードの残余のエネルギーは、図5に示すように、選択できる反射型ファイバ格子18で反射される。基本モードと次の高次モードとの間の有効屈折率の大きな差により、二つのモード間で回折格子共鳴波長が10-40nmの間変化し、10-40nmの間のスペクトル幅をもつパルスでは一方のモードを他方に対して選択的に排除することを許容する。

30

【0041】

ファイバ拡張器アセンブリのエネルギー損失は、3番目の拡張ファイバ17をYb増幅器に同調させることで、小さくされる。この実装は、別々には示されない。

40

【0042】

4次分散が大きくないとき、最初の拡張ファイバ15は取り除かれる。3次と4次分散が最初と2番目の拡張ファイバの間で異なりさえすれば、4次分散もゼロでない3次分散をもつ最初の拡張ファイバを使用することで、補償される。

【0043】

AM13の内部のYb添加ファイバは、Yb添加レベルが2.5モル%で、長さが5mである。単一モードおよび多モード両方のYb添加ファイバが使用され、出力ビームの空間的品質を最適化するために、多モードファイバの場合基本モードが励起されるが、ファイバのコア径は、1-50μm間で変化する。必要とされる利得の値に依存して、異なる長さのYb添加ファイバが使用される。最も高い可能なパルスエネルギーを発生させるために

50

、長さ1mのYbファイバが実装される。

【0044】

パルス圧縮は、PCM4で行われる。PCM4は、通常のパルク光学部品（図4に示すパルク回折格子対のような）、単一回折格子圧縮器、あるいは、多数の分散プリズムやグリズム、その他の分散遅延ラインを含む。

【0045】

あるいは、ファイバやパルクブラック回折格子あるいはチャープした周期的にポールした結晶が使用される。チャープした周期的にポールした結晶は、パルス圧縮と周波数逡倍の機能を結びつけ（A.Galvanaskas,et al., 'Use of chirped quasi-phase matched materials in chirped pulse amplification systems' U.S.Application No.08/822,967,その内容は、ここに参考文献で具体化されている）、透過型で動作し、独自のコンパクトなシステムを提供する。

10

【0046】

本発明に対する他の変更や修正は、これまでの開示や教示からの技術に熟練したものに明白である。

【0047】

特に、SM1は、周波数領域1.52 - 2.2 μm のバンド幅近くに限定されたフェムト秒パルスを作るための自立ユニットとして使われ、非線形結晶での周波数変換後に周波数領域760 nm - 1.1 μm のパルスを作るのにも使われる。周波数領域は、フッ化ラマンシフトファイバあるいはシリカより長い赤外吸収端をもつ他の光ファイバを使うことでさらに拡大される。この技術を使って、約3 - 5 μm 以上の波長が達成される。周波数逡倍と共に、760 nmから5000 nm、までの連続同調が達成される。2 μm 領域のパルスパワーは、TmあるいはHo添加ファイバを使うことで、さらに高められる。そのような増幅器で、バンド幅限界近くの10 nJを超えるパルスエネルギーをもつラマン - ソリトンパルスが、2 μm の波長領域の単一モードファイバに供給される。周波数逡倍後、数nJのエネルギーをもつフェムト秒パルスが、分散パルス圧縮器の使用なしで、1 μm 領域で得られる。そのようなパルスは、大きなコアの多モードYb増幅器のために高エネルギーシードパルスとして使用され、多モードYb増幅器は、増幅された自然放出を抑えるために単一モードYb増幅器より高いシードパルスエネルギーを必要とする。

20

【0048】

シリカラマン - シフト20、Tm添加増幅器21および第2のフッ化ガラスベースラマンシフト22をもつErファイバレーザパルス光源19と組み合わせた超広波長可変ファイバ光源の一例が図6のSM1cに示されている。選択できる周波数逡倍器は示されていない；最適な安定性のために、全てのファイバは偏光保持でなければならない。Erファイバレーザパルス光源に代わる別のものとして、Er増幅器をもつダイオードレーザパルス光源の組合せが使われる；これは分離して示されない。

30

【0049】

SMの別の代わりとして、SM1dが図7に示されており、ラマンシフトホーリファイバ24と合同して周波数逡倍高パワー受動型モードロックErあるいはEr/Ybファイバ発振器23を有する。ここで、1.55 μm の波長領域で動作する発振器23からのパルスは、周波数逡倍器25とレンズ系26を使って最初に周波数逡倍され、その後周波数逡倍されたパルスは、750 nm以上の波長あるいは少なくとも810 nm以上の波長に対してソリトン維持分散を与えるホーリファイバ24でラマンシフトされる。1 μm 波長帯あるいは1.3、1.5、2 μm 波長帯でラマンシフトしたパルスを増幅し、且つ異なるデザインのラマンシフトファイバを選定することで、波長領域が約750 nmから5000 nmの間で動作する連続的に可変な光源が作られる。多数の付属増幅器27をもつそのような光源のデザインも図7に示されている。

40

【0050】

最適なラマン自己 - 周波数シフトのために、ホーリファイバ分散が、波長の関数として最適化されなければならない。ホーリファイバの3次分散の絶対値は、シリカの3次材料分

50

散の絶対値以下か、あるいは等しくなければならない。これは、同調波長範囲の大部分において2次分散の絶対値が小さくとどまることを確実にすることに役立つ。さらに2次分散の値は負でなければならず、2次分散ゼロはシード入力波長から300nm以内でなければならない。

【0051】

Yb増幅器用シード光源の別の代替物として、反ストークスファイバでの反ストークス発生が使用される。反ストークス発生後、広い波長可変光源を作るために、付加的長さのファイバ増幅器とラマンシフトが使用される。一般的な構成は、図7に示されているものに類似している、ここで、周波数逡倍手段25は省略され、ラマンシフト手段24は反ストークス発生手段と置き換えられる。たとえば、1.55 μ mで動作するErファイバレーザシード光源を使った反ストークス発生手段で1.05 μ m波長帯の光を効率よく発生するためには、小さいコアと低い値の3次分散をもつ光ファイバの形をした反ストークス発生手段が最適である。3次分散の低い値は、ここでは、1.55波長領域での標準的な電子通信ファイバの3次分散の値に比べて小さい3次分散の値と定義される。さらに、反ストークスファイバの2次分散の値は、負でなければならない。Yb増幅器の別の代替シード光源として、受動モードロックYbあるいはNdファイバレーザがSM内部に使用される。好ましくは、負分散で動作するYbソリトン発振器が使用される。Ybソリトン発振器を作るために、図8に示すように、出力ファイバ36に接続されたチャープファイバ格子29によって負共振器分散が共振器内に導入される；あるいは、ホーリファイバ(T. Monroe, et al)のような負分散ファイバがYbソリトンレーザ共振器に使用される。そのような配列を具体化するSMが、図8中に1eとして示されている。ここで、Ybファイバ30は、偏光保持で、偏光子31がファイバ(結合がレンズ32で達成されている)の一つの軸に沿う発振を選ぶために組み入れられる。簡単のために、Ybファイバ30は、図8に示すように、側方からクラッドポンプされる。しかしながら、通常の単一モードファイバを組み入れる受動モードロックYbファイバレーザも使われる。そのような配列は別々に示されていない。図8ではSA28は短光パルス形成を誘導するために使われる。回折格子35は、分散制御のために使用され、また、内部共振器ミラーとして使用される。ポンプダイオード33は、V溝34を通してポンプ光を供給する。

【0052】

ホーリファイバを組み入れる配列は図8に示したシステムとほとんど同じであり、ここで付加的なホーリファイバは共振器のどこかに接続される。ホーリファイバを組み入れる場合、ファイブラッグ回折格子が負分散をもつ必要はなく、同様にブラッグ回折格子は誘電体ミラーで置き換えられる。

【0053】

実施するのに最も簡単なものは、しかしながら、正分散で動作するYb発振器であり、それは、共振器分散を制御するために負分散ファイブラッグ回折格子あるいは、ホーリファイバのような特別の共振器要素を必要としない。'放物線状' Yb増幅器(あるいは通常のYb増幅器)と共に、高パワーYb増幅器システムのための非常にコンパクトなシード光源が得られる。Yb増幅器40をもつそのようなYb発振器が図9に示されており、ここで、好ましくは、Yb増幅器40は後に議論するような'放物線状' Yb増幅器である。図8中と同じ要素には同じ番号が付与されている。

【0054】

図9の中のSM1fは、図8に関して記述されたような側方ポンプYb増幅器40を有するが、他のポンピング配列も実装されている。Ybファイバ44は、当然偏光保持で、偏光子31が単一の偏光状態を選ぶために挿入される。ファイブラッグ回折格子37は、Ybの利得バンド幅に比べ小さな反射バンド幅をもち、Ybの利得バンド幅に比べ小さなバンド幅をもつパルスの発振を確実にする。ブラッグ回折格子37はチャープされるか、あるいはチャープされない。チャープされないブラッグ回折格子の場合、Yb発振器内で発振するパルスは、正にチャープされる。Yb発振器内でのパルス発生あるいは受動モードロックは、可飽和吸収体28で始められる。光ファイバ39は付加的で、Yb増幅器

10

20

30

40

50

40に送り出されたパルスのバンド幅をさらに制限する。

【0055】

SM1f内のYb増幅器40内の放物線状パルスの形成を最適化するために、入力パルスはYbの利得バンド幅に比べ小さいバンド幅をもつべきである；またYb増幅器40への入力パルス幅は、出力パルス幅に比べ小さくしなければならないし、Yb増幅器40の利得はできるだけ高く、すなわち、10以上でなければならない。また、Yb増幅器40内の利得飽和は小さくなければならない。

【0056】

放物線状増幅器の一例として、長さ5mのYb増幅器が使用される。放物線状パルスの形成は、約0.2-1psのパルス幅と3-8nmのスペクトルバンド幅とをもつシード光源を使用することで確実にされる。放物線状パルスの形成は、Yb増幅器40内でシード光源のバンド幅を約20-30nmまで広げるが、出力パルスは、約2-3psに広げられる。放物線状パルス内でのチャープが高度に線形であるので、圧縮後に100fsオーダのパルス幅が得られる。標準的な超高速固体増幅器が許容できる自己位相変調からの非線形位相シフトは大きくても π (最近の技術で良く知られた)だけであるが、放物線状パルスファイバ増幅器は、 $10 * \pi$ およびそれ以上の大きさの非線形位相シフトを許すことができる。簡単のために、我々は高利得Yb増幅器を放物線状増幅器と呼ぶ。放物線状増幅器は単純な縮尺則に従い、増幅器長を適当に増やすことで、1nmあるいはそれ以下のスペクトルバンド幅をもつ放物線状パルスの発生を可能にする。たとえば、約2nmのスペクトルバンド幅をもつ放物線状パルスが、約100mの長さの放物線状増幅器を使用することで発生される。

【0057】

放物線状パルスが自己変調の大きな値と、パルスの中断を招くことなしのスペクトル拡張の大きな値とを許すことができるので、放物線状増幅器のピークパワー能は、標準的な増幅器に比べ大きく高められる。これは次のように説明される。長さLの光ファイバでの自己位相変調で受けた時間依存位相遅れ $\phi_L(t)$ はピークパワーに比例する、すなわち、 $\phi_L(t) = P(t)L$ 、ここで、 $P(t)$ は光パルス内での時間依存ピークパワーである。周波数変調は位相変調の導関数で与えられ、すなわち、 $\omega(t) = L [P(t) / t]$ 。放物線状パルスプロファイル $P(t) = P_0 [1 - (t/t_0)^2]$ 、ここで、 $(-t_0 < t < t_0)$ の場合、周波数変調は線形である。それで、実にパルスプロファイルも放物線状のままであり、線形周波数変調と線形パルスチャープの発生のみを伴う大きなピークパワーの発生を可能にすることが示されている。

【0058】

Yb増幅器40で発生されたチャープパルスは、図4に示すような回折格子圧縮器を使って圧縮される。あるいは、チャープした周期的にポーリングした結晶42とレンズ41が、図9に示されるように、パルス圧縮のために使われる。図9に示すSM1fと関連して、約530nmのグリーンスペクトル領域でのフェムト秒パルスを出す非常にコンパクトな自立光源が得られる。

【0059】

図9に示す受動モードロックYbファイバレーザ44のほかに、Yb増幅器にシードするために別の光源も使われる。これら別の光源は、ラマンシフトErあるいはEr/Ybファイバレーザ、周波数シフトTmあるいはHoファイバレーザおよび、ダイオードレーザパルス光源から成りうる。これら別の実装物は別々に示されない。

【0060】

図10でファイバ供給モジュール(FDM)45が図1に示す基本システムに加えられる。この場合PSM2は除かれる；しかしながら、増幅モジュールのピークパワー能を高めるためにPSM2は必要なとき含まれる。図10に示すYb増幅器7は非放物線状、放物線状の両方で動作できる。

【0061】

最も簡単な構成では、FDM45が一本の光ファイバ46(供給ファイバ)からなる。放

10

20

30

40

50

物線状増幅器の場合、供給ファイバ46はパルス品質での損失を招くことなくYb増幅器7に直接接続される。むしろ、放物線状パルスプロファイルにより、沢山の自己位相変調の場合でも、PCM4でのさらなるパルス圧縮を可能にするパルスに近似的に線形なチャープが付加される。PCM4は、図4に示す小寸法バルク回折格子圧縮器14を使って供給ファイバと共にFDM45に集積化される。この場合、適当なコリメートレンズと接続する供給ファイバは、図4に示す入力と置き換えられる。そのような実施の別々の図は示されてない。しかしながら、PCM4の使用は付随的で、たとえば、チャープ出力パルスがシステムから要求されるなら、省かれる。PCM4と共に、図10に記載されたシステムは、派生的なチャープパルス増幅システムを構成し、ここで、パルスが時間に関して分散的に広げられる間、利得はもちろん自己位相変調も加えられる。通常のチャープパルス増幅システムに自己位相変調を付加することは、一般的にパルス圧縮後に大きなパルス変形をもたらす。放物線状パルスの使用はこの制限を打破する。

10

【0062】

先端ファイバ光通信システムは、チャープパルス増幅システムと解釈される(たとえば、D.J.Jones et al., IEE Trans. Electron., E81-C, 180(1998)参照)。明らかに、放物線状パルスによるパルス変形の最小化は、光通信システムに等しく関連する。

【0063】

50fsより短いパルス幅を得るためには、FDMモジュールあるいは光PSM内の3次および高次の分散の制御が重要になる。PSMでの高次分散の制御は、図1と5に関連して既に議論された；FDMの高次分散の制御は、非常に類似しており、図11に示すFDM45aの模範的な実施例で議論される。図1に丁度示すように、大きな3次分散のW-ファイバがバルクPCM4の3次分散を補償するために使用される。図5に丁度示すように、FDMの高次分散に対して異なる値をもつファイバ15、16、17を使うことで、バルク回折格子を有するPCM4を含む全システムの高次分散が補償される。

20

【0064】

PSMの別の実施例が図12及び図13に示されており、それらはPSMに市場で入手できる線形チャープファイバブラッグ回折格子を使用できるようにするような実際的な価値をも持ち、PCMもPSMも有する全チャープパルス増幅システムの高次分散を補償する。別の代替物として、非線形チャープファイバブラッグ回折格子もPCMの分散を補償するためにPSMに使用される。そのような配列は分離して示されていない。

30

【0065】

W-ファイバの使用あるいはPSMでのLP₁₁モードを避けるために、図12に示すようなPSMの別の実施例がPSM2bとして示されている。ここで負の線形チャープブラッグ回折格子47が、負の3次分散をもつ単一モード拡張ファイバ48とサーキュレータ49と接続して使用される。負の線形チャープブラッグ回折格子の導入は、PSM2bでの比(3次/2次)分散を増大させ、バルク回折格子圧縮器が使用されるとき、PCM4での3次分散の高い値の補償を可能にする。PSM2bは、PSMの柔軟性をさらに改善するために線形チャープファイバブラッグ回折格子と接続したW-ファイバを含むこともできる。

40

【0066】

高次分散補償用PSMの別の実施例として、図13に配列がPSM2cとして示されており、それは、正の線形チャープファイバブラッグ回折格子49、サーキュレータ50、および別のファイバ透過型回折格子51を有する。ここで、PCMモジュール内の線形および高次分散を補償するために、正の線形チャープファイバブラッグ回折格子49は、正の2次分散を作り、他のファイバ透過型回折格子51は、適当な値の付加的な2次、3次、4次分散を作る。一つ以上のファイバ透過型回折格子あるいはファイバブラッグ回折格子が、3次、4次およびできればより高次の分散の適当な値を得るために使用される。

【0067】

Yb増幅器からの増幅されたパルスエネルギーをmJのオーダおよびそれ以上まで増大させるために、パルス採集素子とさらなる増幅段が図14に示すように実装される。この場合

50

、パルス採集器 5 2 は最初の増幅段 A M 1 3 a と 2 番目の増幅段 A M 2 3 b の間と、P S M 2 と最初の増幅モジュール A M 1 3 a の間とに挿入される。任意の数の増幅器とパルス採集器が、最も高い可能な出力パワーを得るために使われ、ここで、最後の増幅段は好ましくは、多モードファイバからなる。回折限界出力を得るために、多モード増幅器の基本モードが選択的に励起され、よく知られた技術 (M.E.Fermann et al., United States Patent, No.5,818,630) を使ってガイドされる。パルス採集器 5 2 は、一般的に音響 - 光学あるいは電気 - 光学変調器のような光変調器からなるように選択される。パルス採集器 5 2 は、S M 1 から出てくるパルスの繰り返し周期を与えられた値 (たとえば、5 0 M H z から 5 K H z へ) だけ低下させ、平均パワーは小さいままで非常に高いパルスエネルギーの発生を可能にする。あるいは、直接スイッチできる半導体レーザも、システムの繰り返し周期を任意の値に固定するために使用される。さらに、後方の増幅器段に挿入されたパルス採集器 5 2 は増幅器での増幅された自然放出の増強を抑えもし、高エネルギー超短パルスに出力パワーを集中させることを可能にする。増幅段は、以前議論したような P S M や P C M と合致しており、ここでは、全システムの分散がシステムの出力で最も短い可能なパルスを得るために最小化される。

【 0 0 6 8 】

増幅器モジュール A M 1 3 a は、放物線状スペクトルをもつパルスを生成する放物線状増幅器のようにデザインされる。同様に、A M 1 3 a からの放物線状パルスは、図 1 4 にも示されるようなパルス成形あるいはパルス拡張ファイバ 5 3 で放物線状パルススペクトルをもつパルスに変換され、ここで、自己位相変調と正分散の相互作用がこの変換をうまく行う。これは理解されるであろう、なぜなら、放物線状パルスプロファイルをもつチャープパルスが一本のファイバ中で放物線状スペクトルをもつ放物線状パルスに進化することができるからである。放物線状パルス形状は、次の増幅段でかなりの自己位相変調の量を最大化し、順番に、P S M 2 と P C M 4 で必要とされる分散パルス拡張と圧縮の量を最小化する。同様に、放物線状パルス形状は、大きなパルス変形なしに、P S M 2 での十分な量の自己位相変調を許容することを認める。

【 0 0 6 9 】

一度パルスが拡張されると、次の増幅器での自己位相変調の有害な影響は、平らなパルス形状を使うことで最小化される。平らなパルス形状は、平らなパルススペクトルを生成するために、図 1 4 に示すような光振幅フィルタ 5 4 を最後の増幅モジュールの前に挿入することで生成される。平らなスペクトルは、十分なパルス拡張の後、本当に平らなパルスに変換される、なぜなら、十分なパルス拡張の後のスペクトル含有量と時間遅れの間には直接の関連があるからである。自己位相変調の値が 10^* と同じ大きさでも、大きなパルス変形を招くことなく平らなパルス形状に対して許容される。

【 0 0 7 0 】

図 1 4 に示すような振幅フィルタも、増幅器でのパルススペクトルの再形成が無視できるとき、すなわち、放物線状パルスが発生される体制の外側で、自己位相変調の存在で強くチャープしたパルスに対する増幅器チェーンでの高次分散を制御するために使用される。この場合、自己位相変調は、かなりの量の次式で表される高次分散を生成する：
$$P_0 L_{eff} [d^n S(\) / d^n]_{=0}$$
、ここで、 P_0 はパルスのピークパワーであり、 $S(\)$ は規格化されたパルススペクトルである。 L_{eff} は有効非線形長で、 $L_{eff} = [exp(gL) - 1] / g$ 、ここで、 L は増幅器長で、 g は単位長さ当たりの増幅器利得である。したがって、図 1 4 に示すような振幅フィルタで強くチャープしたパルスのスペクトルを正確に制御することで、任意の量の高次分散がチャープパルス増幅システムでの高次分散の値を補償するために導入される。それは、約 1 n s に拡張した 5 0 0 f s パルスに対して本当に示された、 ~ 10 の位相シフトは、1 8 0 0 本 / m m の溝をもつバルク格子からなるバルク圧縮器 (図 4 に示すような) の 3 次分散を補償するために十分である。魅力的な制御性のよい振幅フィルタは、たとえば、ファイバ透過型回折格子であるが、任意の振幅フィルタが、パルススペクトルを制御するために、高次分散を引き起こす増幅器の前に使用される。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 1 】

パルス採集器をもつ増幅器モジュールの組合せに対する別の実施例として、図 1 5 に示す構成が使用される。非常に高いエネルギーのパルスは、それらの増幅のために大きなコアの多モードファイバを必要とするので、シングル - パスの偏光保持ファイバ増幅器で基本モードを制御することは困難である。この場合モード結合を最小化するためと高品質の出力ビームを得るために、高度に中心対称の非偏光保持ファイバ増幅器を使うことが好ましい。そのような増幅器から決定論的な環境に対して安定な偏光を得るために、図 1 5 に示すようなダブル - パス構成が要求される。ここで、単一モードファイバ 5 5 が増幅器 5 6 の最初のパスの後に空間モードフィルタとして使用される；あるいは、ここに開口が使用される。空間モードフィルタ 5 5 は、多モード増幅器 5 6 の最初のパスの後のモードを綺麗にし、多モード増幅器の達成可能な利得を制限しがちな高次モードの増幅された自然放出を抑える。レンズ 6 0 は、増幅器 5 6、空間モードフィルタ 5 5、およびパルス採集器 5 2 a、5 2 b に結合出入りするために使用される。ファラディ回転子 5 7 は、後方伝搬光が前方伝搬光と直交するように偏光されることを確実にし、後方伝搬光は、図示した偏光ビームスプリッタ 5 8 でシステムの外に出される。システムの効率を最適化するために、システムの入力部で多モードファイバ 5 6 の基本モードに回折限界近い光源が結合され、ここで、利得ガイドが多モードファイバで増幅されたビームの空間的品質をさらに改善するために使用される。SM から供給されるパルス列繰り返し周期を小さくするためと多モード増幅器での増幅された自然放出を抑えるために、第 1 光変調器 5 2 a が多モード増幅器の最初のパスの後に挿入される。理想的な場所は図示するように反射ミラー 5 9 の前である。結果として、6 0 - 7 0 d B の大きさのダブル - パス利得がそのような構成で得られ、p J エネルギーをもつシードパルスを m J エネルギーレベルまで増幅することから要求される増幅段の数を最小化する。この種の増幅器は、以前議論したような S M_s、P S M_s および P C M_s と完全に合致し、m J のエネルギーをもつフェムト秒パルスの発生を可能にする。高利得増幅器モジュール構築の別の代替物として、SM で供給されるパルス列の繰り返し周期を低下させることが、図 1 5 に示すような増幅器モジュールに注入する前に、付加的な第 2 変調器 5 2 b で行われる。第 1 変調器 5 2 a の透過窓の繰り返し周期は、第 2 変調器 5 2 b の透過窓の繰り返し周期と同じかそれより低くなければならない。そのような構成は、別々には示されていない。図 1 5 は、ここに参考文献として添付された米国特許 5, 4 0 0, 3 5 0 の図 5 といくつかの類似性を共有する。

【 0 0 7 2 】

本発明の別の実施例として、長い分布屈折率型正分散増幅器 6 1 での放物線状パルスの形成を使う光通信システムが図 1 6 に示されている。分散補償素子 6 3 が、ファイバ光増幅器の間に挿入される。光学フィルタ 6 2 が増幅器でのパルス形成プロセスを最適化するために、さらに実装される。光フィルタは、繰り返し透過スペクトル特性をもつように、限定された自由スペクトル範囲をもつ光学エタロンに基づいており、波長分割多重で要求されるような多波長チャンネルの同時透過を可能にする。

【 0 0 7 3 】

キーとなる有利なことは、ファイバ透過システムの光カー非線形性で導入されるチャープを線形化するために、長い正分散ファイバの大きな利得を組合せることである。したがって、一般に、光通信システムの透過特性は、正分散（非ソリトン支持）増幅器を実装することで、改善される。そのような増幅器は、少なくとも 1 0 K m の長さをもち、1 0 d B / K m 以下の利得をもつ。光学非線形性の有害な効果を最小化するための放物線状パルス形成の始まりを利用するために、増幅器当たりの総合利得は 1 0 d B を超えることができる。さらなる改善は、3 d B / K m 以下の利得をもち、総合利得が 2 0 d B 以上であるように全長を長くした増幅器を使うことで増進される。ファイバ透過ラインの透過特性のさらなる改善は、ファイバ透過ラインの負分散素子のカー非線形性の量を最小化することで得られる。これは負分散素子のためにチャープファイバ回折格子を使用することで達成される。

【 0 0 7 4 】

透過ラインでの放物線状パルスの形成に加えて、外部光源で放物線状パルスが発生させること、そしてそれらを非ソリトン支持増幅器ファイバに注入することも有利である。そのようなシステムを有効に使用するために、ホーリファイバで可能にされた低損失正分散透過が有益である。ファイバ透過ラインに沿ってファイバ透過ライン端とに分散補償素子の実装される。そのようなシステムの実施は、図16に示すものに類似しており、別々には示されていない。上述のような類似のデザインをもつ光通信システムは、ここに参考文献として添付された暫定出願No. 60/202,826に開示されている。

【0075】

電気通信領域における本発明の別の実施例として、波長可変ラマン増幅器がラマンシフトパルスを使って構築される。与えられたポンプ波長の高パワー光信号がポンプ波長に關してレッドシフトした信号波長のラマン利得を作るということは、最近の技術でよく知られている。事実、それは、ここで議論された波長可変パルス光源の構築に使用されるポンプパルス自身に作用する効果である。

10

【0076】

波長可変ラマン増幅器の一般的なデザインが図17に示されている。ここで、短い光パルスはシード光源で作られる。シードパルスは変調器65で光学的に変調され、光増幅器66で増幅される。シードパルスは次に一本のラマンシフトファイバ67に注入される。ラマンシフトファイバは一本のホーリファイバあるいはその他のデザインのファイバである。ラマンシフトパルス間の時間周期は、図17に示すようなパルス分割手段(ポンプパルス分割器)68を使って減少される。このパルス分割手段は、たとえば、不均衡なマツハ-ツェンダ干渉計のアレイであるが、単一パルスからパルス列を発生させる任意の手段が受け入れられる。適当に波長シフトした増幅され変調されたシードパルスは、ラマン増幅器69に注入されるポンプパルスを含み、信号入力70で動作し、信号出力71を作るために、図17に示すように、ラマン増幅器で信号波長の光利得を発生する。

20

【0077】

ラマン増幅器ファイバ内で、信号波長での光信号は、ラマン増幅器のポンプパルスと反対方向に伝搬する。いくつかの信号波長も信号結合器を使ってラマン増幅器に注入され、そのような増幅器を光波長分割多重に合致するようにする。たとえば、波長1470nmのポンプパルスは、シリカファイバ中で1560nmの波長領域近辺でのラマン利得を生成する。ラマン増幅器の利得を最適化するために、ホーリファイバあるいは相対的に小さいファイバコアをもつその他のファイバが使用される。

30

【0078】

ラマン利得が得られる波長の中心波長は、ポンプパルスの波長を同調することで同調される。ポンプパルスの波長同調は、ラマンシフトファイバ67に注入される前にシードパルスの幅とパワーとを変調することで達成される。

【0079】

さらに、ラマン増幅器の利得スペクトルはポンプパルスの波長を高速に同調することで調整され、信号パルスは、有効に変更されたラマン利得スペクトルに合わされる。有効なラマン利得が時間に依存しないことを確かめるために、ポンプパルスと同調するスピード、すなわち、必要な波長範囲にわたってパルスと同調するのにかかる時間周期は、信号パルスがラマン増幅器ファイバ69を移動するのに要する時間に比べて小さくされなければならない。

40

【0080】

このように、電気通信システムのラマン増幅器にとって、単一パルスからできる利得より広いスペクトル利得を得ることが有利である。異なる波長で伝搬される変化するデータ量を補償するために、WDM電気通信システムの利得を動的に変えることができることも有利である。スペクトル利得を広げる一つの方法は、通信ファイバを伝搬する時間に比べてポンプ波長を早く同調することである。利得は、ポンプが異なる波長でとどまる時間を変えることで動的に調整される。利得スペクトルを調整する別の方法は、異なる波長ごとに複数のポンプパルスをラマンシフトファイバに使用することである。各波長ごとに相対的

50

な数のパルスを変調することは、相対的な利得プロファイルを変更することを可能にする。

【 0 0 8 1 】

より具体的に言うと、図 1 に示されたフェムト秒パルス光源は、高パワーのために Y b 増幅器で増幅される。これらのパルスは、フェムト秒パルス光源の動作点より短い波長で零分散点をもつファイバで、1 4 0 0 - 1 5 0 0 nm 領域にラマン自己周波数シフトされる。このファイバはホーリファイバでもよい。1 4 0 0 - 1 5 0 0 nm 領域にラマン自己周波数シフトをもつワットレベルのパワーを達成するためには、光源の最適繰り返し周期が 1 G h z 以上の高周波数であるべきである。利得スペクトル拡張と自動利得制御は、異なる量のラマンシフトを得るために、複数のポンプ波長を使用することで、ポンプ波長を同調することで、あるいは、パルス列の個々のパルスのパルス振幅を変調することで、得られる。

10

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明に関する高ピーク、高平均パワー、超短レーザパルス発生用のモジュール化したコンパクトな波長可変システムの図である。

【図 2】本発明に使用するためのシードモジュール (S M) の第一実施例の図である。

【図 3】本発明の第一実施例に関する与えられた入力パワーで出力される平均周波数逓倍パワーと波長の関係を示すグラフである。

【図 4】本発明で使用するためのパルス圧縮器モジュール (P C M) の第一実施例の図である。

20

【図 5】本発明で使用するためのパルス拡張器モジュール (P S M) の第一実施例の図である。

【図 6】本発明で使用するためのシードモジュール (S M) の第二実施例の図である。

【図 7】本発明で使用するためのシードモジュール (S M) の第三実施例の図である。

【図 8】本発明で使用するためのシードモジュール (S M) の第四実施例の図である。

【図 9】本発明で使用するためのシードモジュール (S M) の第五実施例の図である。

【図 1 0】ファイバ分配モジュール (F D M) が、図 1 に示された本発明の実施例に付加された本発明の一実施例の図である。

【図 1 1】本発明で使用するためのファイバ分配モジュール (F D M) の一実施例の図である。

30

【図 1 2】本発明で使用するためのパルス拡張器モジュール (P S M) の第二実施例の図である。

【図 1 3】本発明で使用するためのパルス拡張器の第三実施例の図である。

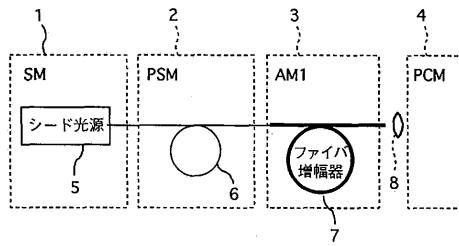
【図 1 4】パルス採集素子と付加的増幅段が付加された本発明の一実施例の図である。

【図 1 5】パルス採集素子のような光変調器と組み合わせてファイバ増幅器が少なくとも一つの前方パスと一つの後方パスで動作する本発明の別の実施例の図である。

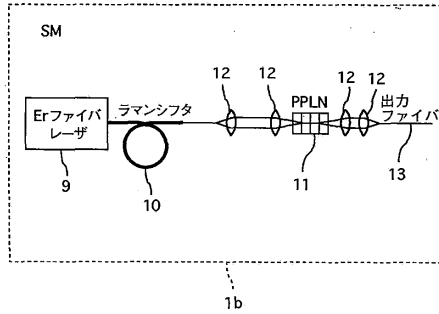
【図 1 6】光通信の面における本発明の別の実施例の図である。

【図 1 7】電気通信用波長可変ラマン増幅器の面における本システムの別の実施例の図である。

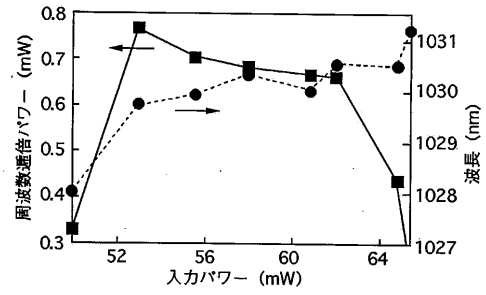
【図1】



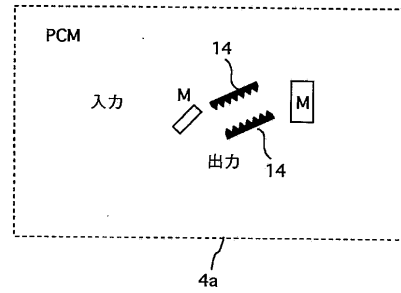
【図2】



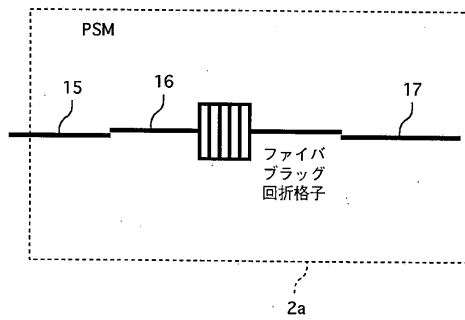
【図3】



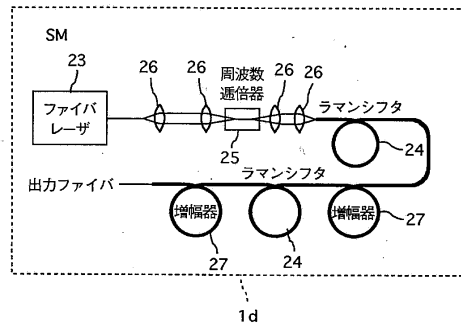
【図4】



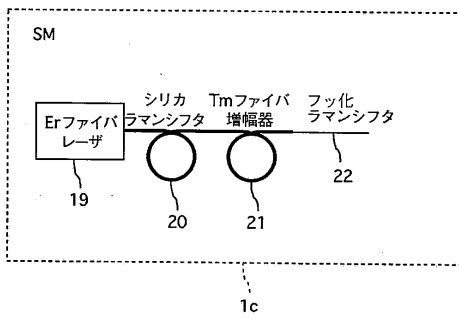
【図5】



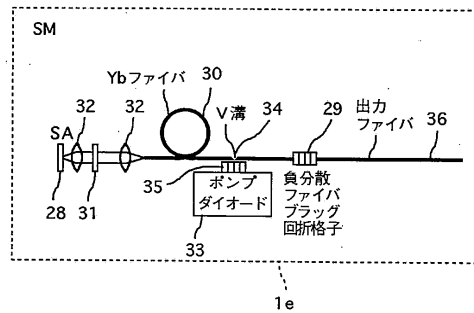
【図7】



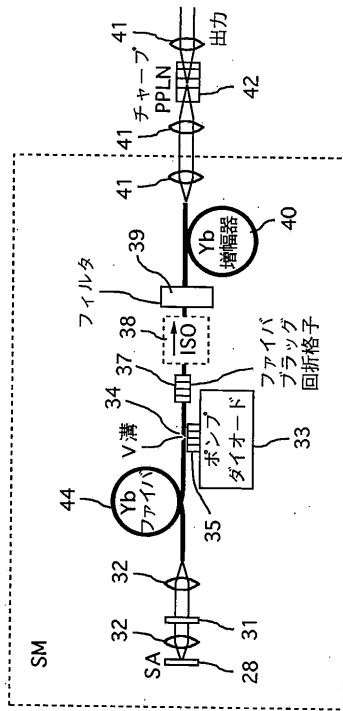
【図6】



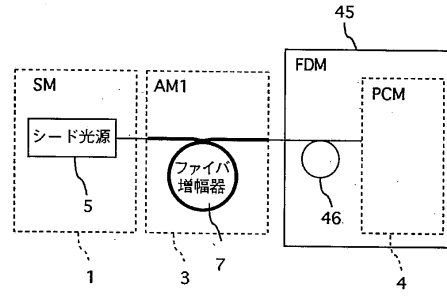
【図8】



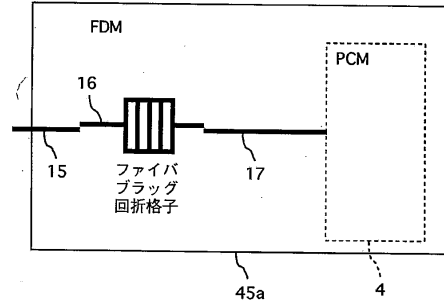
【図9】



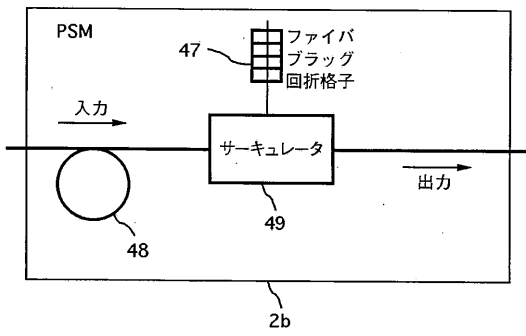
【図10】



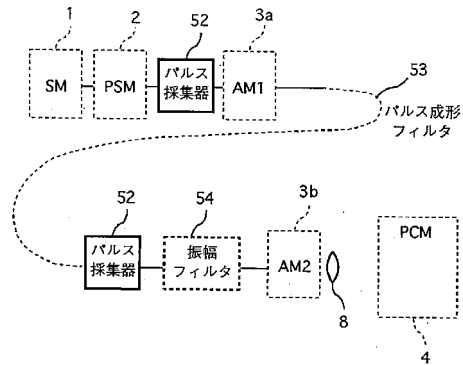
【図11】



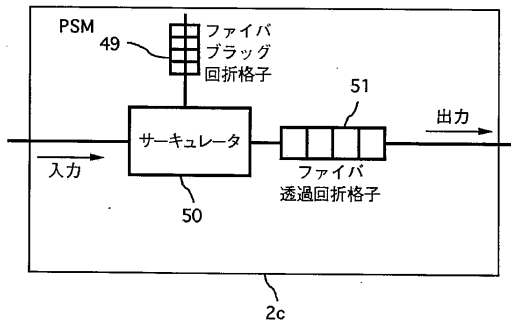
【図12】



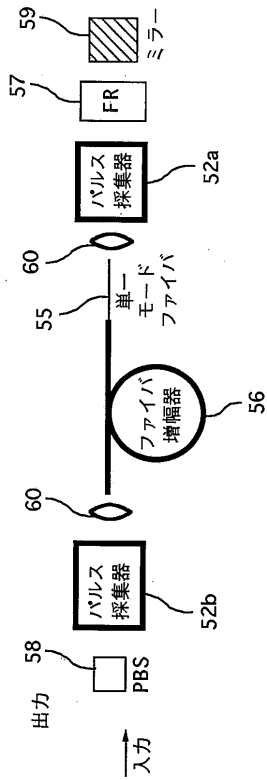
【図14】



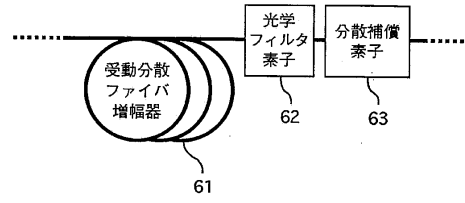
【図13】



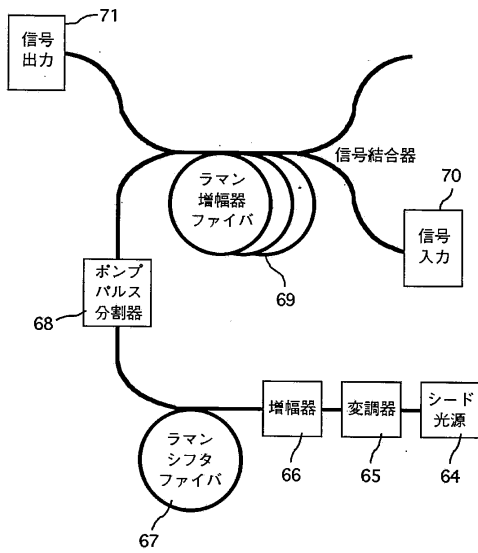
【図15】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I	
H 0 1 S 3/109 (2006.01)		H 0 1 S 3/109	
H 0 1 S 3/30 (2006.01)		H 0 1 S 3/30	Z

(74)代理人 100128657

弁理士 三山 勝巳

(72)発明者 マーチン・イー・ファーマン

アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバー レイバイン コート 4931番地

(72)発明者 アルマンテス・ガルバナスカス

アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバー レイバイン コート 4968番地

(72)発明者 ドナルド・ジェー・ハーター

アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバー サルグレイブ プレイス 3535番地

審査官 杉山 輝和

(56)参考文献 特開平11-284264(JP,A)

M. E. Fermann et al., Ultrawide tunable Er soliton fiber laser amplified in Yb-doped fiber, Optics Letters, 1999年10月15日, Vol. 24, Issue 20, pp.1428-1430

D. J. Richardson, et. al., Stretched pulse Yb³⁺:silica fiber laser, OPTICS LETTERS, 1997年 3月 1日, Vol.22, No.5, pp.316-318

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 S 3 / 0 0 - 3 / 3 0

G 0 2 F 1 / 3 5 - 1 / 3 9

G 0 2 B 6 / 0 2