

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マコード [*] (参考)
G02F 1/01		G02F 1/01	D 2H079
1/37		1/37	2K002

審査請求 有 請求項の数 2 O L (全13頁)

(21)出願番号	特願2002 - 143884(P 2002 - 143884)	(71)出願人	396020800 科学技術振興事業団 埼玉県川口市本町 4 丁目 1 番 8 号
(22)出願日	平成14年 5 月17日(2002.5.17)	(72)発明者	山下 幹雄 北海道札幌市白石区栄通14丁目 2 - 12 - 30 5
		(72)発明者	平澤 正勝 北海道札幌市北区北12条西四丁目20 - 1
		(74)代理人	100082876 弁理士 平山 一幸 (外 1 名)

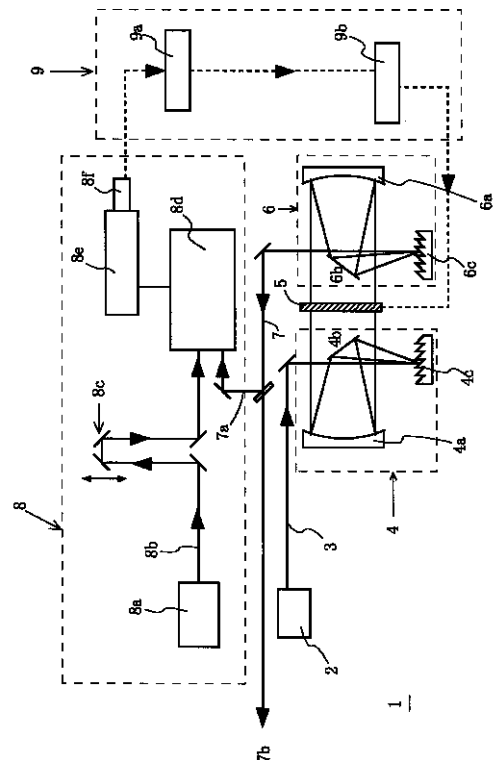
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置

(57) 【要約】

【課題】 高速に高感度に位相揺らぎを補償できる自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置を提供する。

【解決手段】 パルス光源 2 と、パルス光源 2 から出射する光パルス 3 をスペクトル成分毎に空間分散するスペクトル空間分散装置 4 と、空間分散された光パルスのスペクトル成分毎に位相を付加する空間位相変調器 5 と、位相を付加された光パルスのスペクトル成分を合波する合波装置 6 と、合波された出力光パルス 7 の一部からスペクトル干渉像を形成する変形 S P I D E R 装置 8 と、スペクトル干渉像からスペクトル位相を検出し、検出した位相と設定位相との差を上記空間位相変調器にフィードバックするフィードバック装置 9 とから成る。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 パルス光源と、このパルス光源から出射する光パルスをスペクトル成分毎に空間分散するスペクトル空間分散装置と、この空間分散された光パルスのスペクトル成分毎に位相を付加する空間位相変調器と、この位相を付加された光パルスのスペクトル成分を合波する合波装置と、この合波された出力光パルスの一部からスペクトル干渉像を形成する変形 S P I D E R 装置と、このスペクトル干渉像からスペクトル位相を検出し、検出した位相と設定位相との差を上記空間位相変調器にフ

ィードバックするフィードバック装置とから成ることを特徴とする、自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置。

【請求項 2】 前記変形 S P I D E R 装置は、チャープ光パルス用光源と、このチャープ光パルス用光源から出射する光パルスの遅延時間を調節する遅延器と、この遅延時間を調節した光パルスからチャープ光パルスを形成する分散性媒質と、前記出力光パルスの一部から互いに遅延した 2 つのレプリカパルスを形成するレプリカパルス形成器と、上記チャープ光パルスと上記 2 つのレプリカパルスを周波数混合する非線形光学結晶と、この非線形光学結晶で周波数混合した 2 つのレプリカパルスの干渉像を形成させるスペクトロメータと、この 2 つのレプリカパルスの干渉像を読みとる画像読取り装置とからなることを特徴とする、請求項 1 に記載の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、超広帯域で超短光パルスを発生するために不可欠な位相補償機構に空間位相変調器を用い、発生した光パルスのスペクトル位相の決定に S P I D E R 法の改良である変形 S P I D E R 法を用いる、自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置に関する。

【0002】

【従来の技術】超短光パルス圧縮技術は、人類の手にすることのできる最小の時間幅を実現でき、超短光パルスを用いることにより、従来未知であった科学技術領域に新たな発見、新たな技術の創出をもたらしつつある。また、超短光パルス位相補償技術は、時間的に変化する制御された位相補償量を光パルス列に与えることができ、各種変調分光法や光通信への応用が始まりつつある。また、超短光パルス波形整形技術は、光パルスの形状を任意に整形でき、化学反応素過程の解明や生体反応メカニズムの解明に無くてはならないものとなっている。

【0003】従来、超短光パルス圧縮、超短光パルス位相補償、超短光パルス波形整形は、光源の発生する光パルスのスペクトル成分毎に位相補償して合波することにより実現している。位相補償には、プリズム対や回折格子対、誘電体多層膜鏡などの固定的な光学素子が用いる

方法がある。しかしながら、これらの位相補償は固定的であり、動的でも自律的でもないため、光パルスのスペクトル成分毎の位相が前もってわかっており、かつ、光パルスのスペクトル成分毎の位相が時間的に不変である場合にしか有効ではない。また、空間位相変調器 (S L M : Space Light Modulator) を用いた $4 - f$ パルス整形器を用いた位相補償方法がある (例えば、本発明者らによる特願 2000 - 329355 参照)。この方法によれば、動的に位相変調量を変えられ、シミュレーテッドアニーリング法や遺伝的アルゴリズム法などを用いて、最適な位相補償量を試行錯誤的に決定できるが、決定までに極めて多くの光パルス列と時間を要するので、光パルスのスペクトル成分毎の位相が時間的に不変である場合にしか有効ではない。

【0004】このように、従来の装置においては、使用する光源の発生する光パルスの位相情報を詳細に測定してから使用することが必要であり、また、光パルスのスペクトル成分毎の位相の時間的揺らぎを小さくするために、極めて高度な制御系を有する光源を必要とし、また、このような高度な制御系を有する光源を用いても、位相の時間的揺らぎのために、超短光パルス圧縮、位相補償、波形整形が連続的に行える時間が短いといった課題がある。

【0005】近年、上記の課題を解決するために、出力光パルスの一部を取り出して位相を常時測定し、空間位相変調器にフィードバックし、光パルスに位相揺らぎが生じても自律的に超短光パルスの位相揺らぎを素早く補償する方法が試みられた (例えば、本発明者らによる、上記の特願 2000 - 329355 参照)。この自律的補償方法においては、位相測定に、自己相関 (Auto correlation) 法、FROG (Frequency Resolved Optical Gating) 法、または、SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction) 法が試みられた。

【0006】しかしながら、自己相関法及び FROG 法は、測定原理上、位相測定に時間がかかりすぎ、位相の時間的揺らぎの大きい一般のレーザー光源の場合には、測定中に位相が変動してしまうという課題がある。また、SPIDER 法は、出力光パルスのレプリカを生成し、二つのレプリカパルスを互いに遅延させ、互いに遅延した二つの光パルスと、出力光パルスの一部を分割して生成したチャープ光パルスを非線形光学結晶に入射することにより、二つのレプリカパルスをそれぞれを異なった周波数で周波数混合し、周波数混合された二つのレプリカ光パルスをスペクトロメータで干渉させ、干渉像の干渉縞間隔から出力光パルスの位相情報を抽出する (文献: IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 35, NO.

4 . A P R I L 1 9 9 9 p 5 0 1 - 5 0 9 参照) ものであり、この方法によれば、単一の出力光パルスから一度に全ての位相情報を抽出することができるから、高速に位相補償できる。しかしながら、単一の出力光パルスを分割してチャープ光パルスを生成するため、レプリカパルスの強度が減少してしまい、位相情報の抽出感度が低下し、極めて強度の大きい光パルスの場合にしか従来の S P I D E R 法が有効ではないという課題がある。

【 0 0 0 7 】このように、従来の超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置は、光強度が小さい、または、位相の時間的揺らぎが大きい一般のレーザー光源を用いた場合には、自律的に超短光パルス圧縮、超短光パルス位相補償、及び、超短光パルス波形整形を行うことが不可能であった。

【 0 0 0 8 】

【発明が解決しようとする課題】上記課題に鑑み、本発明は、高速に高感度に位相揺らぎを補償できる自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置を提供し、光強度が小さい、または、位相の時間的揺らぎが大きい一般のレーザー光源を用いた場合にも、自律的に超短光パルス圧縮、超短光パルス位相補償、及び、超短光パルス波形整形を行うことができる装置を提供することを目的としている。

【 0 0 0 9 】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置は、パルス光源と、パルス光源から出射する光パルスをスペクトル成分毎に空間分散するスペクトル空間分散装置と、空間分散された光パルスのスペクトル成分毎に位相を付加する空間位相変調器と、位相を付加された光パルスのスペクトル成分を合波する合波装置と、合波された出力光パルスの一部からスペクトル干渉像を形成する変形 S P I D E R 装置と、スペクトル干渉像からスペクトル位相を検出し、検出した位相と設定位相との差を空間位相変調器にフィードバックするフィードバック装置とから成ることを特徴とする。

【 0 0 1 0 】また、変形 S P I D E R 装置は、チャープ光パルス用光源と、チャープ光パルス用光源から出射する光パルスの遅延時間を調節する遅延器と、遅延時間を調節した光パルスから周波数チャープ光パルスを形成する分散性媒質と、出力光パルスの一部から互いに遅延した 2 つのレプリカパルスを形成するレプリカパルス形成器と、チャープ光パルスと 2 つのレプリカパルスを周波数混合する非線形光学結晶と、周波数混合した 2 つのレプリカパルスを干渉させるスペクトロメータと、2 つのレプリカパルスの干渉像を読み取る画像読取り装置とからなることを特徴とする。前記構成において、分散性媒質は群速度分散の大きい T F。ガラスであれば好ましい。また、非線形光学結晶は 2 次の非線形光学効果が大きい B B O 結晶であれば好ましい。また、画像読取り装

置は、I C C D (C h a r g e C o u p l e d D e v i c e w i t h I m a g e - i n t e n s i f i e r) であれば好ましい。

【 0 0 1 1 】この構成によれば、光パルス光源から出射した光パルスがスペクトル成分毎に空間分散されて空間位相変調器に入射し、空間位相変調器でスペクトル成分毎に付加位相を付加されて出射し、付加位相を付加されたスペクトル成分が合波されて出力光パルスが得られる。出力光パルスの一部を取り出し、変形 S P I D E R 装置で出力光パルスのスペクトル干渉像を形成し、フィードバック装置が干渉像からスペクトル位相を検出し、検出した位相を設定位相と比較し、検出した位相と設定位相との差を付加位相として空間位相変調器にフィードバックする。本発明の装置に使用する変形 S P I D E R 装置は、チャープ光パルスを被測定光パルス以外の別の光源から生成する。別の光源で生成するから、二つのレプリカ光パルスの強度を弱めることが無く、また、チャープ光パルスの強度も大きくできるので、周波数混合された二つのレプリカ光パルスのスペクトロメータによる干渉像のコントラストを高めることができる。また、干渉像を I C C D で読みとるから高速に高感度に全てのスペクトルの位相を検出することができる。また、高速に高感度に全てのスペクトルの位相を検出できるから、フィードバック装置により、検出した位相と設定位相との差を付加位相として空間位相変調器に高速に高感度にフィードバックすることができる。さらに、光パルス 1 つから全ての位相情報を抽出でき、極めて短時間に、最悪でも 1 0 秒以内に、所望の出力光パルスを構築できる付加位相を空間位相変調器に設定できるから、光パルスのスペクトル位相が揺らいでも所望の出力光パルスに自律的に修正し、所望の光パルスを出力し続けることができる。

【 0 0 1 2 】このように、本発明の装置によれば、高速に高感度に位相揺らぎを補償できるから、光強度が小さい、時間的に揺らぎがある、あるいは不安定性のある一般の光源に対しても、自律的に、超短光パルス圧縮、超短光パルス位相補償、及び、超短光パルス波形整形を行うことができる。

【 0 0 1 3 】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。図 1 及び図 2 に基づいて、本発明の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置の構成及び作用を説明する。図 1 は、本発明の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置の構成を示す図である。本発明の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置 1 は、光パルス光源 2 と、光源 2 から出射する光パルス 3 をスペクトル成分毎に空間分散するスペクトル空間分散装置 4 と、空間分散された光パルス 3 のスペクトル成分毎に位相を付加する空間位相変調器 5 と、位相を付加された光パルス 3 のスペクトル成分

を合波する合波装置 6 と、合波された出力光パルス 7 のスペクトル成分毎の位相を検出する変形 SPIDER 装置 8 と、検出した位相情報を空間位相変調器にフィードバックするフィードバック装置 9 とから成る。

【0014】光パルス光源 2 は、光パルス光源から出射する光パルスを非線形伝搬媒質に通して広帯域化した光源であっても良い。

【0015】スペクトル空間分散装置 4 は、凹面鏡 4 a と、ミラー 4 b と、グレーティング 4 c とより構成され、グレーティング 4 c はミラー 4 b を介した凹面鏡 4 a の焦点位置 f に配置される。光パルス 3 は、グレーティング 4 c で波長分散され、すなわち、スペクトル成分毎に空間分散され、凹面鏡 4 a によって平行光にされ、空間位相変調器 5 に入射する。

【0016】空間位相変調器 5 は、凹面鏡 4 a の焦点位置 f に配置される。図示しないが、空間位相変調器 5 は、LC (Liquid Crystal) からなるピクセルが平面状に配列されており、光パルスがピクセルを通過する際の付加位相は、各々のピクセルに印加する電圧により、独立に設定できる。すなわち、光パルス 3 は空間位相変調器 5 によってスペクトル成分毎に所定の位相を付加できる。

【0017】合波器 6 は、凹面鏡 6 a と、ミラー 6 b と、グレーティング 6 c とから構成され、グレーティング 6 c はミラー 6 b を介した凹面鏡 6 a の焦点位置 f に配置される。凹面鏡 6 a は、空間位相変調器 5 から凹面鏡 6 a の焦点位置 f に配置される。空間位相変調器 5 を通過した光パルス 3 の各々のスペクトル成分は、凹面鏡 6 a とグレーティング 6 c により合波され、出力光パルス 7 となる。スペクトル空間分散装置と空間位相変調器と合波器とから成る上記の構成を 4 f - パルスシェーパ (pulse shaper) と呼ぶ。

【0018】変形 SPIDER 装置 8 は、チャープ光パルス用光源 8 a と、光源 8 a から出射する光パルス 8 b の遅延時間を調節する遅延器 8 c と、遅延時間を調節された光パルス 8 b と出力光パルス 7 の一部を分割した光パルス 7 a とを取り込み、互いに異なる周波数で周波数混合した光パルス 7 a の 2 つのレプリカ光パルスを形成する周波数変換部 8 d と、2 つのレプリカ光パルスのスペクトル領域の干渉像を形成するスペクトロメータ 8 e と、干渉像を読み取る ICCD アレイからなる撮像装置 8 f とから成る。なお、遅延器 8 c は、チャープ光パルスと 2 つのレプリカ光パルスの時間軸上での相対位置を調節するために用いる。

【0019】図 2 は周波数変換部 8 d の詳細構成を示す図である。周波数変換部 8 d は、光パルス 7 a を入射する光入射端 2 1 と、光パルス 8 b を入射する光入射端 2 2 と、光パルス 7 a の 2 つのレプリカ光パルス 2 4 a , 2 4 b を形成するハーフミラー 2 3 と、2 つのレプリカ光パルス 2 4 a , 2 4 b を合波するハーフミラー 2 7

と、2 つのレプリカ光パルス 2 4 a , 2 4 b 間の遅延時間を設定する遅延器 2 5 , 2 6 と、光パルス 8 b を周波数分散させてチャープ光パルス 2 9 を形成する分散性媒質 2 8 と、チャープ光パルス 2 9 とレプリカ光パルス 2 4 a , 2 4 b とを非線形光学結晶 3 1 に集光する放物面ミラー 3 0 とからなる。光入射端 2 1 に入射された光パルス 7 a は、ハーフミラー 2 3 によって 2 つのレプリカパルス 2 4 a , 2 4 b に分割され、それぞれ別々の遅延器 2 5 , 2 6 を通って再び、ハーフミラー 2 7 で合波される。この際、遅延器 2 5 , 2 6 によって、レプリカパルス 2 4 a , 2 4 b の間に遅延時間を形成する。光入射端 2 2 に入射された光パルス 8 b は、分散性媒質 2 8 中を往復して周波数分散を受け、チャープ光パルス 2 9 になる。

【0020】互いに遅延時間を有するレプリカパルス 2 4 a , 2 4 b と、チャープ光パルス 2 9 は、放物面ミラー 3 0 によって非線形光学結晶 3 1 に集光される。この際、図 1 に示した遅延器 8 c により、時間軸上でチャープ光パルス 2 9 の中心と、レプリカパルス 2 4 a と 2 4 b 間の中心とが一致するようにを調節し、レプリカパルス 2 4 a と 2 4 b がそれぞれチャープ光パルス 2 9 の異なった位置と重なるようにし、レプリカパルス 2 4 a と 2 4 b がそれぞれチャープ光パルス 2 9 の異なった周波数で周波数混合されるように、すなわち、スペクトル・シア (spectral shear) されるようにする。非線形光学結晶 3 1 中で、異なった周波数で周波数混合され、スペクトル・シアされたレプリカパルス 2 4 a と 2 4 b は、図 1 に示したスペクトロメータ 8 e に入射され、スペクトロメータ 8 e でスペクトル空間分散され、画像読取り装置 8 f に干渉像を形成する。

【0021】画像読取り装置 8 f に形成された干渉像は画像読取り装置 8 f によって読み込まれ、画像情報としてフィードバック装置 9 のコンピュータ 9 a に送られる。コンピュータ 9 a は、画像情報をフーリエ変換して、光パルス 8 b のスペクトル成分毎の位相を検出し、すなわち、スペクトル位相情報を抽出し、光パルス 8 b のスペクトル位相の再構築を行い、再構築スペクトル位相をコンピュータ 9 b に送る。コンピュータ 9 b は、再構築スペクトル位相すなわち観測値と、入力したスペクトル位相すなわち設定値との差分を計算し、差分を空間位相変調器 5 の各々のピクセルにフィードバックして、出力光パルス 7 b を設定値に収束させる。

【0022】フィードバック位相補償の具体的アルゴリズムを図 3 に示す。図 3 は、フィードバック位相補償の具体的アルゴリズムを示すフローチャートである。

【0023】次に、スペクトル位相再構築の原理を説明する (詳細は、文献: IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 35, NO. 4, APRIL, 1999, pp 501 - 509 参照)。光パルスの電界 $E(t)$ は、 $E(\)$ を

E (t) のフーリエ変換として次式であらわされる。

【数 1】

$$E (t) = \int_0^{\infty} d\omega E (\omega) \exp(-i\omega t)$$

また、E () は次式であらわされる。

【数 2】

$$E (\omega) = \int_0^{\infty} d t E (t) \exp(i\omega t)$$

また、E () は次式のように定義することができる。

【数 3】

$$E (\omega) = |E (\omega)| \exp(i\phi(\omega))$$

ここで、|E ()| はスペクトル強度であり、() はスペクトル位相である。|E ()| と () が定めれば、光パルスの形状が定まる。

【数 5】

$${}^s E_2 (\omega) \propto |E (\omega)| \exp [i\phi (\omega)]$$

ここで、^sE₂ の周波数を ω としている。^sE₁ と ^sE₂ をスペクトロメータ等でスペクトル空間分散させて重

$$D (\omega) \propto |E (\omega - \Omega)|^2 + |E (\omega)|^2 + 2 |E (\omega - \Omega)| |E (\omega)| \cos \{ \phi (\omega - \Omega) - \phi (\omega) - \tau \omega \}$$

【0026】図5は、干渉像D () の一例を示す図である。干渉像D () は、(6) 式の cosine の位相項、 = (-) - () - が 2 の整数倍になる毎に極大値を示すので干渉縞を形成し、干渉縞の間隔の 依存性がわかる。、 が既知であるので、スペクトル位相 () の差分位相、 = (-) - () の 依存性がわかり、従って、上記 (3) 式で定義したスペクトル位相 () を求めることができる。すなわち、スペクトル位相の再構築ができる。干渉縞の間隔は、干渉像D () をフーリエ変換して求めることができる(文献：J . Opt . Soc . A m . / Vol . 7 2 , No . 1 / January 1 9 8 2 . pp 1 5 6 - 1 6 0 参照)。

【0027】スペクトル位相の再構築の具体的手順を図6に示す。図6は、スペクトル位相の再構築の手順を示すフローチャートである。

【0028】次に、本発明の実施例を示す。図7は、本実施例に用いた入力光パルスの特性及び生成方法を示す図である。本実施例では、光パルス光源にTi : S a p p h i r e レーザ光源を用い、Ti : S a p p h i r e レーザ光源からの入力光パルスを再生増幅器 (R E G E N) を用いて高強度超短光パルスを生成した。高強度超短光パルスは、中心波長 8 0 0 n m 、 くり返し 1 k

【0024】図4は2つのレプリカパルスをスペクトル・シアーする原理を示す図である。図4 (a) はチャープ光パルスE_cと2つのレプリカパルスE₁、E₂との時間軸上の相対位置関係を示しており、チャープ光パルスE_cのグラフにはチャープ光パルスE_cの周波数分布も示している。同図 (b) に示すように、相対遅延時間を有するレプリカ光パルスE₁、E₂とチャープ光パルスE_cを時間軸上で図のように重ねて2次の非線形光学結晶NCに入射すると、2次の非線形感受率を (2) として、 (2) E₁ E_c、及び、 (2) E₂ E_cの結合波が生じる。図4 (a) に示したように、E₁と結合するE_cの周波数と、E₂と結合するE_cの周波数はの差があるから、E₁とE₂は周波数差でスペクトル・シアーされ、スペクトル・シアーされた^sE₁と^sE₂は、次式で表される。

【0025】

【数 4】

$${}^s E_1 (\omega) \propto |E (\omega - \Omega)| \exp [i \{ \phi (\omega - \Omega) - \tau \}]$$

ね合わせると、次式で表される干渉像D () が得られる。

【数 6】

Hz、帯域幅 f = 1 0 T H z である。チャープ用光パルスは、上記の高強度超短光パルスを直接分割して使用し、最大 1 . 2 μ J / p u l s e である。テスト光パルス1は、上記の高強度超短光パルスの分割光をNDフィルターで減光して形成し、最大 5 0 0 n J / p u l s e である。テスト光パルス2は、上記の高強度超短光パルスを光パラメトリック増幅器 (O P A) に入射し、アイドラー光をNDフィルターで減光して形成し、中心波長 1 1 0 0 n m 、 帯域幅 f = 1 0 T H z 、 最大 4 0 0 n J / p u l s e である。テスト光パルス3は、上記の高強度超短光パルスの分割光をシングルモード石英ファイバー (S O P ; コア径 2 . 7 μ m 、 長さ 3 m m) 中を通過させ、自己位相変調効果によって広帯域化して形成し、中心波長 8 0 0 n m 、 帯域幅 f = 2 0 T H z 、 3 . 6 n J / p u l s e である。テスト光パルス4は、光パラメトリック増幅器 (O P A) からのアイドラー光をシングルモード石英ファイバー (コア径 2 . 7 μ m 、 長さ 3 m m) 中を通過させ、自己位相変調効果によって広帯域化して形成し、中心波長 1 1 0 0 n m 、 帯域幅 f = 5 0 T H z 、 1 4 n J / p u l s e である。

【0029】図8は、2つのレプリカパルスのスペクトル・シアー、及び干渉像の実測値を示す図であり、図8 (a) はテスト光パルス1の結果を示し、図8 (b)

10

20

40

50

はテスト光パルス 2 の結果を示す。図 8 (a) において、2 つのレプリカパルス E_1 , E_2 の相対遅延時間は、 $\tau = 746 \text{ fs}$ であり、スペクトル・シアー周波数は、 $\nu / 2 = 3.85 \text{ THz}$ である。荒い点線はレプリカパルス E_1 とチャープ光パルス E との結合波のスペクトル分布を示し、細かい点線はレプリカパルス E_2 とチャープ光パルス E との結合波のスペクトル分布を示しており、2 つのレプリカパルス E_1 , E_2 はスペクトル・シアーされていることがわかる。実線はスペクトル・シアーされたレプリカパルス E_1 , E_2 の干渉像 D () であり、周波数軸上にテスト光パルス 1 のスペクトル位相を反映した明瞭な干渉縞が生じることがわかる。

【0030】図 8 (b) において、2 つのレプリカパルス E_1 , E_2 の相対遅延時間は、 $\tau = 746 \text{ fs}$ であり、スペクトル・シアー周波数は、 $\nu / 2 = 3.37 \text{ THz}$ である。荒い点線はレプリカパルス E_1 とチャープ光パルス E との結合波のスペクトル分布を示し、細かい点線はレプリカパルス E_2 とチャープ光パルス E との結合波のスペクトル分布を示しており、2 つのレプリカパルス E_1 , E_2 はスペクトル・シアーされていることがわかる。実線はスペクトル・シアーされたレプリカパルス E_1 , E_2 の干渉像 D () であり、周波数軸上にテスト光パルス 2 のスペクトル位相を反映した明瞭な干渉縞が生じることがわかる。テスト光パルス 1 及びテスト光パルス 2 は、それぞれ、中心波長 800 nm 、 1100 nm であり、 500 nJ 程度の低エネルギー光パルスであるが、図 8 より、本発明の装置は、低エネルギー光パルスであっても、広帯域にわたって明瞭な干渉像 D () を形成できることがわかる。

【0031】図 9 は図 8 の干渉像から再構築したスペクトル位相 () を示す図であり、図 9 (a) はテスト光パルス 1 の再構築スペクトル位相であり、図 9 (b) はテスト光パルス 2 の再構築位相である。なお、図中、入力光パルスをフーリエ変換して求めたスペクトル強度 $|E$ () | も示している。図において、スペクトル位相 () 、(ただし、 $\tau = \nu / 2$) は、図 8 の干渉像 D () をフーリエ変換して求めた。

【0032】図 10 は、変形 SPIDER 法と従来の SPIDER 法の SPIDER 信号強度 (D ()) の比較を示す図であり、図 10 (a) の横軸は入力光パルスのエネルギーを示し、縦軸は SPIDER 信号強度 (D ()) を示している。また、複数の光パルスの干渉像を積算すれば、ノイズのランダム成分が打ち消されてノイズレベルが下がるので、1 パルスの場合、 $5,000$ パルスを積算した場合、及び、 $100,000$ パルスを積算した場合のノイズレベルを各々示している。ノイズレベルの信号強度が検出限界となる。

【0033】図 10 (b) は変形 SPIDER 法における、入力光パルスの積算数毎の検出限界と、従来の SP

IDER 法と比較した感度改善率を示している。変形 SPIDER 法のチャープ用光パルスには、入力光パルスのエネルギーによらず、 800 nm 、 $1.2 \mu\text{J}$ の光パルスを用いた。従来の SPIDER 法のチャープ用光パルスは、入力光パルスを一定比率で分割した光パルスを用いる。入力光パルスには、ND フィルターの減衰率を変化させたテスト光パルス 1 を用いた。

【0034】図 10 (a) から明らかなように、変形 SPIDER 法の信号強度は入力光パルスのエネルギーの 1 乗に比例し、従来の SPIDER 法の信号強度は入力光パルスのエネルギーの 2 乗に比例することがわかる。また、同一の入力光パルスのエネルギーに対して、変形 SPIDER 法の信号強度は従来の SPIDER 法の信号強度よりも大きく、図 10 (b) に示すように、感度改善率は、1 パルス検出の場合には 10 倍、 $5,000$ パルス積算の場合には 80 倍、 $100,000$ パルス積算の場合には 100 倍に達することがわかる。図 10 から、変形 SPIDER 法によれば、従来の SPIDER 法では不可能であった低エネルギー領域の光パルスのスペクトル位相の検出が可能であることがわかる。

【0035】図 11 は、変形 SPIDER 法における信号強度のチャープ光パルスのエネルギー依存性を示す図である。図から明らかなように、信号強度はチャープ光パルスのエネルギーの 1 乗に比例して増加する。従って、変形 SPIDER 法によれば、チャープ光パルスのエネルギーを大きくすることによって、極めて微小エネルギーの光パルスのスペクトル位相を求めることができることがわかる。しかしながら、チャープ光パルスのエネルギーを大きくし過ぎると、非線形光学結晶の自己位相変調効果が大きくなり、ノイズレベルが増大する現象が発生する。

【0036】図 12 は変形 SPIDER 法による広帯域光パルスの再構築を示す図であり、図 12 (a) はレプリカパルス 1 , 2 のフーリエスペクトルと変形 SPIDER 信号を示しており、図 12 (b) は変形 SPIDER 信号を用いて再構築したスペクトル位相 () と、入力光パルスのスペクトル強度 $|E$ () | を示しており、図 12 (c) はスペクトル位相 () とスペクトル強度 $|E$ () | から再構築した時間軸領域の入力光パルスの強度 $|E$ (t) |、及び位相 (t) を示す。入力光パルスには、中心波長 800 nm 、帯域幅 $\nu = 20 \text{ THz}$ 、 3.6 nJ の微小エネルギーのテスト光パルス 3 を使用した。図 12 (c) に示した時間波形及び時間位相は、他の測定方法で測定した結果と極めて良く一致した。図 12 から明らかなように、変形 SPIDER 法によれば、広帯域、かつ、微小エネルギーの光パルスでも再構築できることがわかる。

【0037】図 13 は変形 SPIDER 法による超広帯域光パルスの再構築を示す図であり図 13 (a) はレプリカパルス 1 , 2 のフーリエスペクトルと変形 SPID

ER信号を示しており、図13(b)は変形SPIDER信号を用いて再構築したスペクトル位相()と、入力光パルスのスペクトル強度 $|E()|$ を示しており、図13(c)はスペクトル位相()とスペクトル強度 $|E()|$ から再構築した、時間軸領域の入力光パルスの強度 $|E(t)|$ 、及び、位相(t)を示す。入力光パルスには、中心波長1100nm、帯域幅 $f = 50\text{THz}$ 、14nJの微小エネルギーのテスト光パルス4を使用した。図13(c)に示した時間波形及び時間位相は、他の測定方法で測定した結果と極めて良く一致した。図13から明らかなように、変形SPIDER法によれば、超広帯域、かつ、微小エネルギーの光パルスでも再構築できることがわかる。

【0038】次に、本発明の装置を用いて超短光パルスを波形整形した例を示す。図14は、超短光パルスの波形整形の例を示す図である。図14(a)において、上段のグラフは入力光パルスの測定したスペクトル強度 $|E()|$ を示す図であり、下段のグラフは変形SPIDER法によって測定したスペクトル位相()を示し、図14(b)は出力光パルスの波形整形前と後の時間領域波形を示している。入力光パルスには、テスト光パルス1(中心波長800nm、くり返し1kHz、帯域幅 $f = 10\text{THz}$ 、200nJ/pulse)を用いた。また、チャープ光パルスは4.2 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ である。図14(b)に示すように、この入力光パルスは時間軸上で主ピークの他に主ピークの裾部分にしたいに減衰する複数の副次ピークを有している。超短光パルスの用途によってはこのような副次ピークが有害である場合がある。本実施例は本装置により位相補償し、この副次ピークを無くすことを試みた。図14(a)下段のグラフにおいて、入力光パルスのスペクトル位相、すなわち、位相補償無しの出力光パルスのスペクトル位相を実線で示している。このスペクトル位相と、目標とする副次ピークが無い場合のスペクトル位相、すなわち、設定スペクトル位相との差分を位相補償する第1回の位相補償ループ後の出力光スペクトル位相を荒い点線で示している。さらに、第1回の位相補償ループ後の出力光スペクトル位相と設定スペクトル位相との差分を位相補償した第2回の位相補償ループ後の出力光スペクトル位相を細かい点線で示している。さらに、第2回の位相補償ループ後の出力光スペクトル位相と設定スペクトル位相との差分を位相補償した第3回の位相補償ループ後の出力光スペクトル位相を太い実線で示している。

【0039】図14(b)に示したように、第3回の位相補償ループ後には、時間領域で副次ピークの無い超短光パルスが得られた。本実施例における1回の位相補償ループに要する時間は、スペクトロメータによる干渉像イメージをCCDを用いてデジタルデータに変換する時間が0.1~10秒程度であり、このデジタルデータからスペクトル位相を再構築し、設定スペクトル位

相との差分を導出するコンピューター時間が0.3秒、この差分位相を基に空間位相変調器を制御する時間が0.8秒であった。図14から、本発明の装置によれば、極めて短い時間内に目標とする波形整形ができることがわかる。

【0040】

【発明の効果】以上の説明から理解されるように、本発明によれば、光強度が小さい、または位相の時間的揺らぎが大きい一般のレーザー光源を用いた場合にも、自律的に超短光パルス圧縮、超短光パルス位相補償、及び超短光パルス波形整形を行うことができる。したがって、本発明を、超短光パルスを用いた自然法則の解明や新たな技術の創出、超短光パルス位相補償技術を用いた各種変調分光法や光通信、また、超短光パルス波形整形技術を用いた化学反応素過程の解明や生体反応メカニズムの解明に用いれば極めて有用である。

【図面の簡単な説明】

- 【図1】本発明の自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置の構成を示す図である。
- 【図2】周波数変換部8dの詳細構成を示す図である。
- 【図3】フィードバック位相補償の具体的アルゴリズムを示すフローチャートである。
- 【図4】2つのレプリカパルスをスペクトル・シアーする原理を示す図である。
- 【図5】干渉像D()の一例を示す図である。
- 【図6】スペクトル位相の再構築の手順を示すフローチャートである。
- 【図7】本実施例に用いた入力光パルスの特性及び生成方法を示す図である。
- 【図8】2つのレプリカパルスのスペクトル・シアー、及び干渉像の実測値を示すもので、(a)はテスト光パルス1の結果を、(b)はテスト光パルス2の結果を示すグラフである。
- 【図9】図8の干渉像から再構築したスペクトル位相()を示す図であり、(a)はテスト光パルス1の再構築スペクトル位相の、(b)はテスト光パルス2の再構築位相のグラフである。なお、図中、入力光パルスをフーリエ変換して求めたスペクトル強度 $|E()|$ も示している。
- 【図10】変形SPIDER法と従来のSPIDER法のSPIDER信号強度(D())の比較を示す図であり、(a)の横軸は入力光パルスのエネルギーを、縦軸はSPIDER信号強度(D())を示している。
- 【図11】変形SPIDER法における信号強度のチャープ光パルスのエネルギー依存性を示す図である。
- 【図12】変形SPIDER法による広帯域光パルスの再構築を示す図であり、(a)はレプリカパルス1, 2のフーリエスペクトルと変形SPIDER信号を示し、(b)は変形SPIDER信号を用いて再構築したスペクトル位相()と、入力光パルスのスペクトル強度

$|E(\omega)|$ を示し、(c)はスペクトル位相 $\phi(\omega)$ とスペクトル強度 $|E(\omega)|$ から再構築した時間軸領域の入力光パルスの強度 $|E(t)|$ 、及び位相 $\phi(t)$ を示す。

【図13】変形SPIDER法による超広帯域光パルスの再構築を示す図であり、(a)はレプリカパルス1, 2のフーリエスペクトルと変形SPIDER信号を示し、(b)は変形SPIDER信号を用いて再構築したスペクトル位相 $\phi(\omega)$ と、入力光パルスのスペクトル強度 $|E(\omega)|$ を示し、また、(c)はスペクトル位相 $\phi(\omega)$ とスペクトル強度 $|E(\omega)|$ から再構築した、時間軸領域の入力光パルスの強度 $|E(t)|$ 、及び位相 $\phi(t)$ を示す。

【図14】超短光パルスの波形整形の例を示す図である。

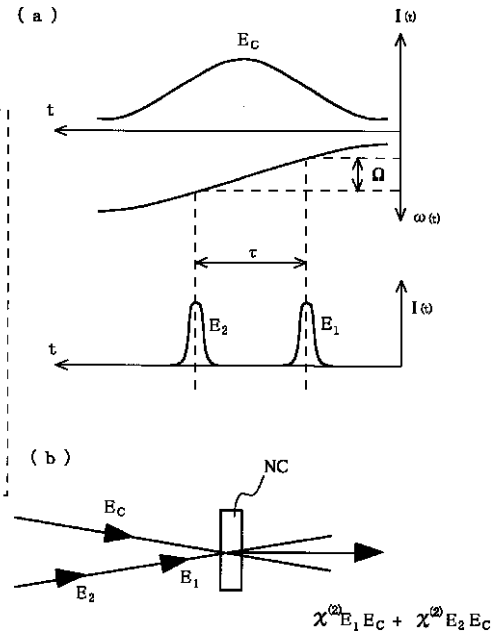
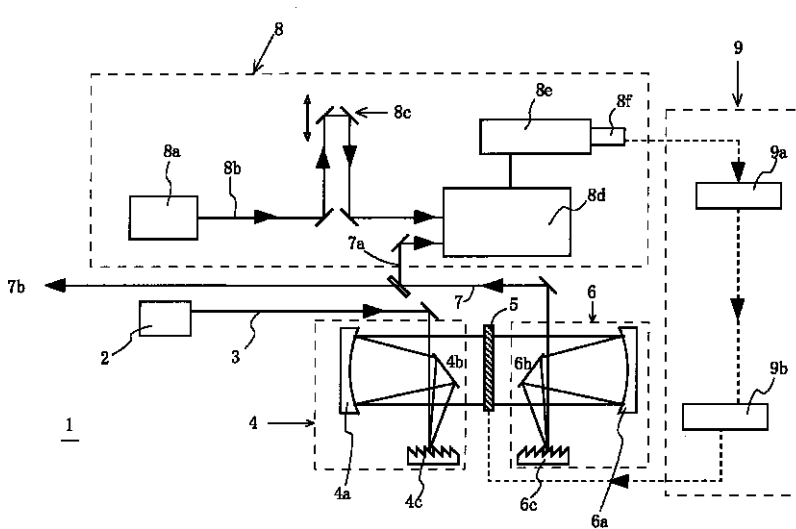
【符号の説明】

- 1 自律型超短光パルス圧縮・位相補償・波形整形装置
- 2 光パルス光源
- 3 光パルス
- 4 スペクトル空間分散装置
- 4 a 凹面鏡
- 4 b ミラー
- 4 c グレーティング
- 5 空間位相変調器
- 6 合波装置
- 6 a 凹面鏡

- 6 b ミラー
- 6 c グレーティング
- 7 出力光パルス
- 7 a 分割出力光パルス
- 8 変形SPIDER装置
- 8 a チャープ用光パルス光源
- 8 b チャープ用光パルス
- 8 c 遅延器
- 8 d 周波数変換部
- 10 8 e スペクトロメータ
- 8 f ICCD
- 9 フィードバック装置
- 9 a 再構築用コンピュータ
- 9 b 空間位相変調器制御用コンピュータ
- 21 光入射端
- 22 光入射端
- 23 ハーフミラー
- 24 a レプリカ光パルス
- 24 b レプリカ光パルス
- 20 25, 26 遅延器
- 27 ハーフミラー
- 28 分散媒質
- 29 チャープ光パルス
- 30 放物線ミラー
- 31 非線形光学結晶
- 32 スペクトル・シアーされたレプリカ光パルス

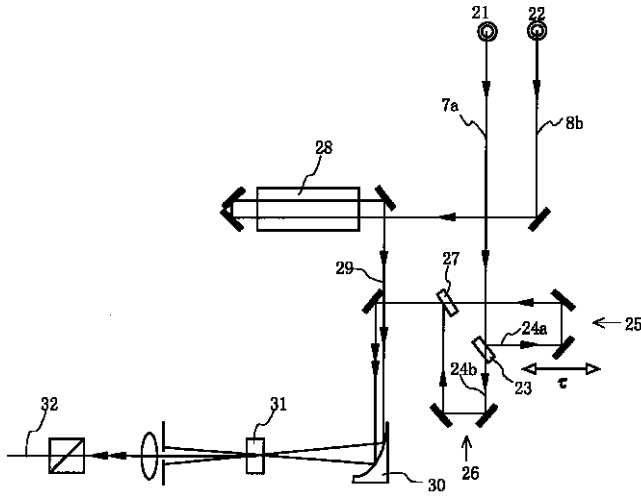
【図1】

【図4】

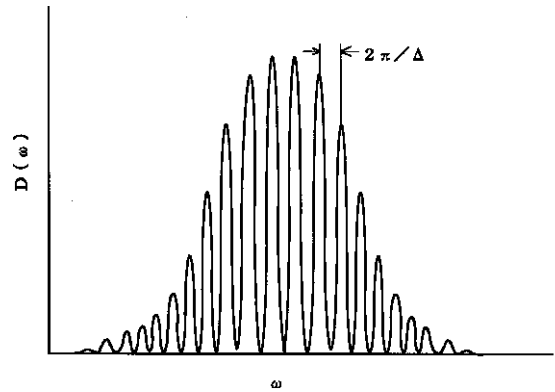


$$\chi^{(2)} E_1 E_C + \chi^{(2)} E_2 E_C$$

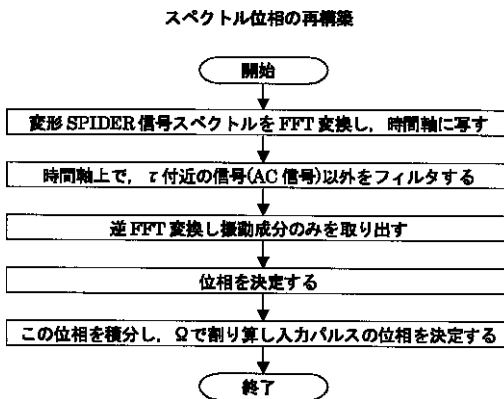
【図 2】



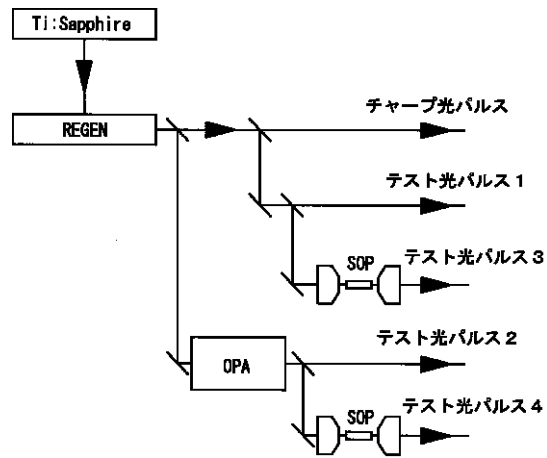
【図 5】



【図 6】

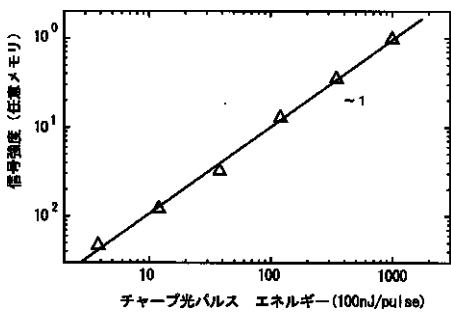


【図 7】



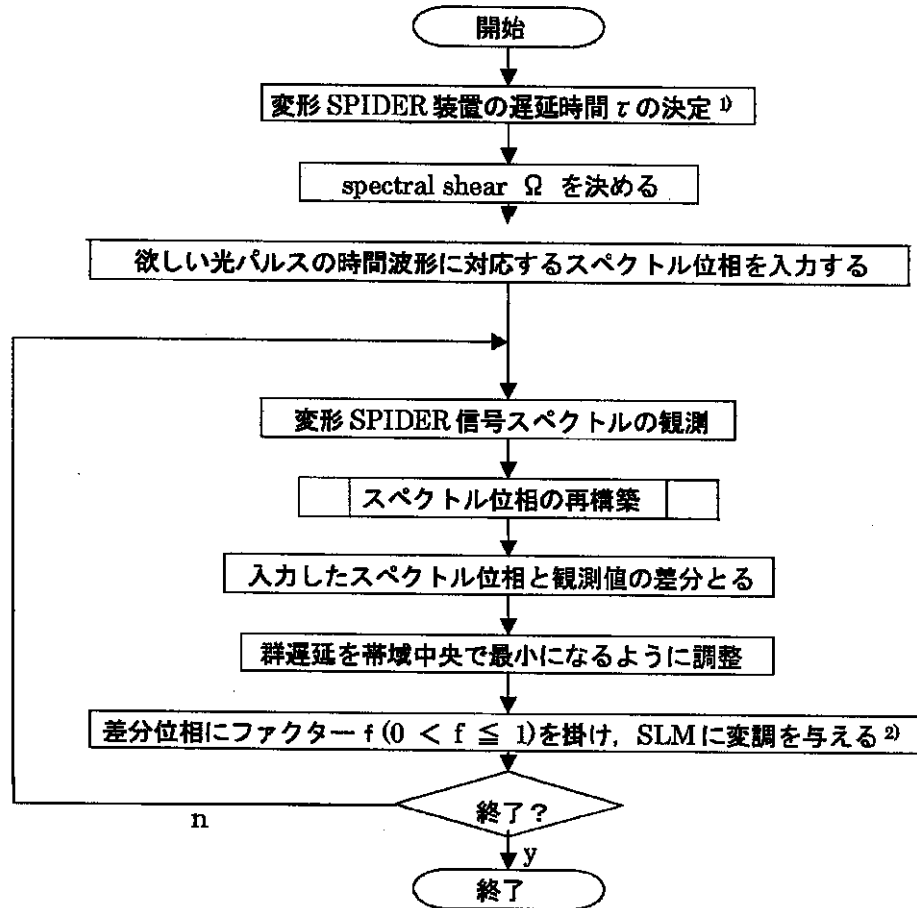
SOP : シングルモード光ファイバ

【図 11】



【図3】

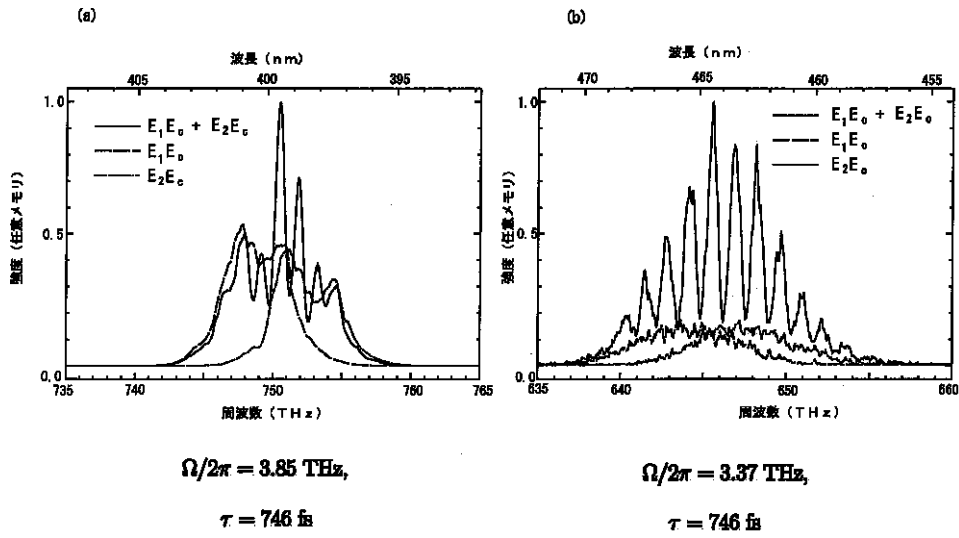
フィードバック位相補償アルゴリズム



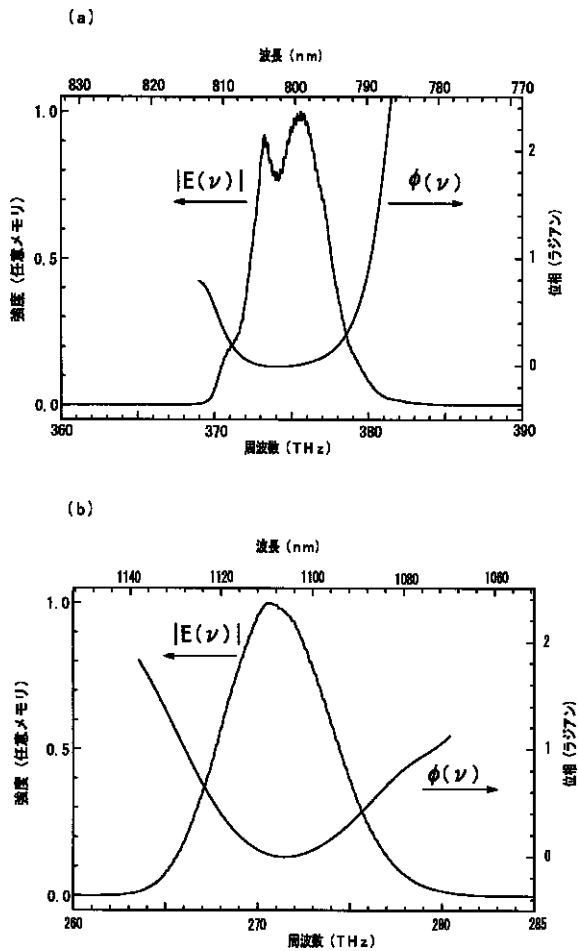
- 1) 干渉計の二つの腕からの光パルスのスペクトル干渉から決定することができるが、通常は固定しておいて差し支えないので、省略可能
- 2) このファクターによって、ループごとの位相の振動を防ぐ。

SLM の印加電圧・位相変調量のパラメータに誤差があっても、ループによって吸収できる。

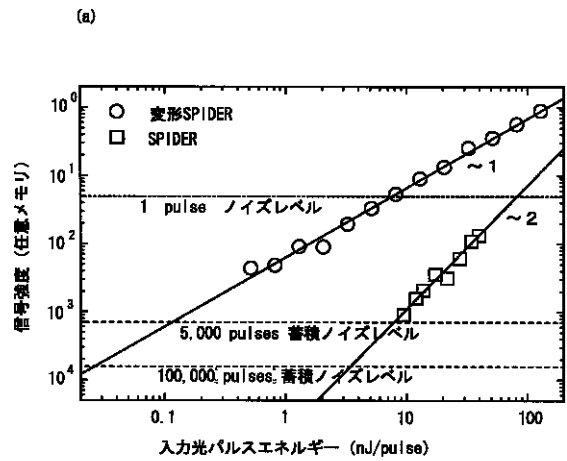
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】

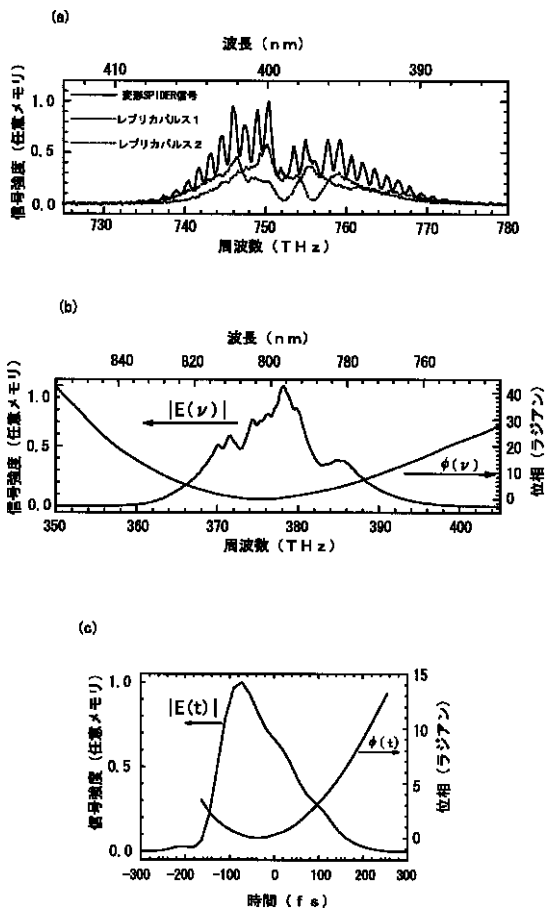


(b)

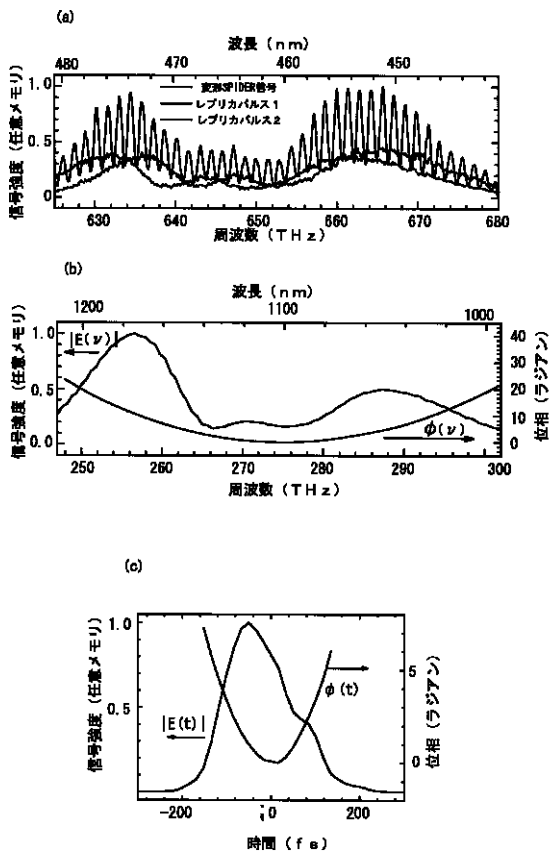
積算数	検出限界	感度改善率
1 pulse	10nJ	10倍
5,000 pulses	0.1nJ	80倍
100,000 pulses	0.03nJ	100倍

$\Delta f = 10 \text{ THz}$

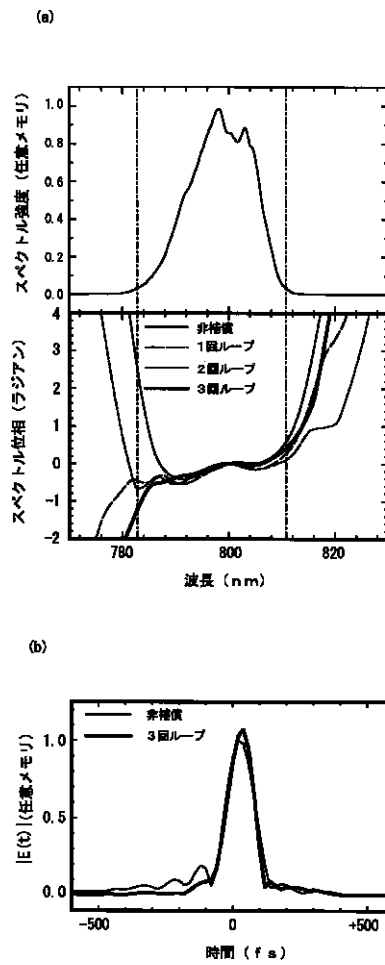
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【図14】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2H079 AA02 AA12 BA03 CA02 FA01
GA06 HA11 KA08 KA18 KA19
2K002 AA04 AB33 BA03 CA15 DA10
EA28 EA30 EB15 HA21