

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6143196号  
(P6143196)

(45) 発行日 平成29年6月7日(2017.6.7)

(24) 登録日 平成29年5月19日(2017.5.19)

(51) Int.Cl. F I  
 GO 1 J 11/00 (2006.01) GO 1 J 11/00  
 GO 1 J 9/02 (2006.01) GO 1 J 9/02

請求項の数 7 (全 11 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2014-512361 (P2014-512361)                  (86) (22) 出願日 平成25年4月23日 (2013. 4. 23)                  (86) 国際出願番号 PCT/JP2013/002735                  (87) 国際公開番号 W02013/161282                  (87) 国際公開日 平成25年10月31日 (2013.10.31)                  審査請求日 平成28年4月4日 (2016. 4. 4)                  (31) 優先権主張番号 特願2012-101276 (P2012-101276)                  (32) 優先日 平成24年4月26日 (2012. 4. 26)                  (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 504261077                  大学共同利用機関法人自然科学研究機構                  東京都三鷹市大沢二丁目2 1 番 1 号                  (74) 代理人 100081776                  弁理士 大川 宏                  (72) 発明者 藤 貴夫                  愛知県岡崎市明大寺町字西郷中3 8 大学                  共同利用機関法人自然科学研究機構 分子                  科学研究所内                  (72) 発明者 野村 雄高                  愛知県岡崎市明大寺町字西郷中3 8 大学                  共同利用機関法人自然科学研究機構 分子                  科学研究所内                  審査官 蔵田 真彦</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光パルスの強度と位相を測定する装置及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

時間  $t$  と共に変化する電場  $E_0(t)$  をもつ被計測光パルスと電場  $E_r(t)$  をもつ参照光パルスとの時間遅延 を変更する光遅延手段と、

前記光遅延手段で遅延された電場  $E_r(t - \tau)$  をもつ前記参照光パルスと前記被計測光パルスとを非線形混合して次式 (  $\mathcal{N}$  は一般的な非線形混合を表す演算子であり、  $\mathcal{N}$  はその非線形混合における非線形感受率に比例する係数である。 ) で表される信号光パルスを作る非線形混合手段と、

$$E_r(t - \tau) + E_r(t - \tau) E_0(t)$$

前記信号光パルスを分光して次式 (  $F$  はフーリエ変換を表す記号である。  $*$  は複素共役を表す。  $R$  は実数部 (Real part) を表す記号である。 ) で表されるフーリエ変換信号を出力するイメージング分光装置と、

$$|F[E_r(t - \tau)]|^2 + |F[E_r(t - \tau) E_0(t)]|^2 + 2R\{F[E_r(t - \tau)]^* \cdot F[E_r(t - \tau) E_0(t)]\}$$

を有し、

周波数分解光ゲート信号に相当する前記フーリエ変換信号の第 2 項の信号と電気光学サンプリング信号に相当する前記フーリエ変換信号の第 3 項の信号から前記被計測光パルスの強度と位相を求めることを特徴とする光パルスの強度と位相の測定装置。

【請求項 2】

前記非線形混合手段は、 4 光波差周波混合手段、 3 光波差周波混合手段或いは和周波混

合手段を含む請求項 1 に記載の光パルスの強度と位相の測定装置。

【請求項 3】

前記 4 光波差周波混合手段は、非線形光学気体と非線形光学結晶をカスケードに備える請求項 2 に記載の光パルスの強度と位相の測定装置。

【請求項 4】

前記和周波混合手段は、和周波混合光と前記参照光パルスとを合波する合波手段を備える請求項 2 に記載の光パルスの強度と位相の測定装置。

【請求項 5】

時間  $t$  と共に変化する電場  $E_0(t)$  をもつ被計測光パルスと電場  $E_r(t)$  もつ参照光パルスとの時間遅延  $\tau$  を変更する光遅延ステップと、

前記光遅延ステップで遅延された電場  $E_r(t - \tau)$  をもつ前記参照光パルスと前記被計測光パルスとを非線形混合して次式 (  $\otimes$  は一般的な非線形混合を表す演算子であり、 $\alpha$  はその非線形混合における非線形感受率に比例する係数である。 ) で表される信号光パルスを作る非線形混合ステップと、

$$E_r(t - \tau) \otimes E_r(t - \tau) \otimes E_0(t)$$

前記信号光パルスをイメージング分光装置に入力して次式 (  $F$  はフーリエ変換を表す記号である。  $*$  は複素共役を表す。  $R$  は実数部 (Real part) を表す記号である。 ) で表されるフーリエ変換信号を出力するフーリエ変換ステップと、

$$|F[E_r(t - \tau)]|^2 + |F[E_r(t - \tau) \otimes E_0(t)]|^2 + 2R\{F[E_r(t - \tau)]^* \cdot F[E_r(t - \tau) \otimes E_0(t)]\}$$

周波数分解光ゲート信号に相当する前記フーリエ変換信号の第 2 項の信号から前記被計測光パルスの強度と位相を求めるステップと、

電気光学サンプリング信号に相当する前記フーリエ変換信号の第 3 項の信号から前記被計測光パルスの強度と位相を求めるステップと、

を有することを特徴とする光パルスの強度と位相を測定する方法。

【請求項 6】

前記 フーリエ変換信号の第 2 項の信号 から得られた位相を、前記 フーリエ変換信号の第 3 項の信号 から得られた位相にシフトさせるステップを有する請求項 5 に記載の光パルスの強度と位相を測定する方法。

【請求項 7】

前記非線形混合ステップは、4 光波差周波混合ステップ、3 光波差周波混合ステップ或いは和周波混合ステップを含む請求項 5 又は 6 に記載の光パルスの強度と位相を測定する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、任意の時間幅をもつ光パルスの分光強度と分光位相を測定する装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

パルス時間幅がピコ秒以上の光パルスの場合、オシロスコープで電場振幅波形を直接測定することができる。しかし、パルス時間幅がピコ秒未満になるとオシロスコープでは測定することができない。

【0003】

自己相関器では、超短光パルスが二つの同じパルスに分割される。その二つのパルスが非線形結晶に同時に入射されて第 2 高調波光が発生される。第 2 高調波光の強度が二つのパルスの間の遅延時間の関数として測定される。これが強度相関をもたらす。しかし、この強度相関法では光パルスの位相を求めることができない。

【0004】

超短光パルスの分光強度と分光位相を測定する方法として、電気光学サンプリング ( E

10

20

30

40

50

OS)法が知られている(例えば、非特許文献1参照。)。このEOS法は、電場 $E_0(t)$ をもつ被測定光パルスと時間遅延制御された電場 $E_r(t - \tau)$ をもつプローブ光パルスとをEO(電気光学)結晶に入力して、電場 $E_0(t)$ をもつ被測定光パルスでEO結晶内に誘起される複屈折によるプローブ光パルスの偏光回転量を測定するものである。すなわち、EOS法は、 $E_r(t - \tau)$ のプローブ光パルスと $E_0(t)$ の被測定光パルスで変調された $E_r(t - \tau)E_0(t)$ の変調光との干渉を測定するものである。

【0005】

また、超短光パルスの分光強度と分光位相を測定する周波数分解光ゲート(FROG)法が最近開発された(例えば、特許文献1参照。)。このFROG法は、電場 $E_0(t)$ をもつ被測定光パルスと時間遅延制御された電場 $E_r(t - \tau)$ をもつ参照光パルスとを非線形媒質に入射させて、非線形媒質に誘導回折格子を形成し、非線形媒質に入射された被測定光 $E_0(t)$ を参照光 $E_r(t - \tau)$ により回折させ、回折されたパルス光を分光装置で分光して、被測定光の強度と位相を求めるものである。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】米国特許5754292号公報

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】Q.Wu, X.C.Zhang, "Free-space electrooptic sampling of terahertz beams", Appl. Phys. Lett. Vol. 67, pp3523-3525(1995)

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

上記した従来のEOS法は、被測定光パルスの中心周波数の周期より十分短い光パルスをプローブ光として使用すると、被測定光パルスの電場 $E_0(t)$ についてのすべての情報(分光強度、分光位相)を求めることができる。分光位相の絶対値も求めることができる。しかし、そのためには被測定光パルスの中心周波数の周期より十分短い光パルスをプローブ光として使用する必要があり、被測定光パルスが超短光パルスの場合、電場情報を求めることができない。

30

【0009】

一方、FROG法は、参照光パルスの時間幅が被測定光パルスの時間幅より長くても分光強度と分光位相を求めることができる。しかし、求まる分光位相は相対値であり、キャリア・エンベロープ・フェーズ(CEP)の絶対値を求めることができない(S.T.Cundiff, "Phase stabilization of ultrashort optical pulses" J.Phys.D35, pp43-59(2002)参照。)

【0010】

本発明は、上記の問題点に鑑みてなされたものであり、任意の時間幅をもつ光パルスの分光強度及び分光位相の絶対値を測定する装置及び方法を提供することを課題としている。

40

【課題を解決するための手段】

【0011】

FROG法とEOS法は上記のように一長一短がある。そこで、発明者らはFROG法とEOS法とを組み合わせる方法を創出した。

【0012】

上記の課題を解決するためになされた本発明の光パルスの強度と位相を測定する装置は、時間 $t$ と共に変化する電場 $E_0(t)$ をもつ被計測光パルスと電場 $E_r(t)$ をもつ参照光パルスとの時間遅延 $\tau$ を変更する光遅延手段と、前記光遅延手段で遅延された電場 $E_r(t - \tau)$ をもつ前記参照光パルスと前記被計測光パルスとを非線形混合して次式(1)は一般的な非線形混合を表す演算子であり、 $\eta$ はその非線形混合における非線形感受率に

50

比例する係数である。)で表される信号光パルスを作る非線形混合手段と、

$$E_r(t - \tau) + E_r(t - \tau) E_0(t)$$

前記信号光パルスを分光して次式 (F はフーリエ変換を表す記号である。\* は複素共役を表す。R は実数部 (Real part) を表す記号である。) で表されるフーリエ変換信号を出力するイメージング分光装置と、

$$|F[E_r(t - \tau)]|^2 + |F[E_r(t - \tau) E_0(t)]|^2 + 2R\{F[E_r(t - \tau)]^* \cdot F[E_r(t - \tau) E_0(t)]\} \quad (1)$$

を有し、前記フーリエ変換信号の第2項の信号 (周波数分解光ゲート (FROG) 信号) と前記フーリエ変換信号の第3項の信号 (電気光学サンプリング (EOS) 信号) から前記被計測光パルスの強度と位相を求めることを特徴とする。

10

【0013】

FROG 信号から得られた位相を、EOS 信号から得られた位相に合わせることで位相の絶対値を求めることができる。任意の時間幅をもつ光パルスの強度と位相を測定することができる。

【0014】

上記の光パルスの強度と位相を測定する装置において、前記非線形混合手段は、4光波差周波混合手段、3光波差周波混合手段或いは和周波混合手段を含むものとすることができる。

【0015】

また、前記4光波差周波混合手段は、非線形光学気体と非線形光学結晶をカスケードに備えるものとすることができる。

20

【0016】

また、前記和周波混合手段は、和周波混合光と前記参照光パルスとを合波する合波手段を備えるものとすることができる。

【0017】

上記の課題を解決するためになされた本発明の光パルスの強度と位相を測定する方法は、時間  $t$  と共に変化する電場  $E_0(t)$  をもつ被計測光パルスと電場  $E_r(t)$  をもつ参照光パルスとの時間遅延  $\tau$  を変更する光遅延ステップと、前記光遅延ステップで遅延された電場  $E_r(t - \tau)$  をもつ前記参照光パルスと前記被計測光パルスとを非線形混合して次式で表される信号光パルスを作る非線形混合ステップと、

30

$$E_r(t - \tau) + E_r(t - \tau) E_0(t)$$

前記信号光パルスをイメージング分光装置に入力して式 (1) で表されるフーリエ変換信号を出力するフーリエ変換ステップと、前記フーリエ変換信号の第2項の信号 (周波数分解光ゲート (FROG) 信号) から前記被計測光パルスの強度と位相を求めるステップと、前記フーリエ変換信号の第3項の信号 (電気光学サンプリング (EOS) 信号) から前記被計測光パルスの強度と位相を求めるステップと、を有することを特徴とする。

【0018】

上記の光パルスの強度と位相を測定する方法において、前記周波数分解光ゲート信号から得られた位相を、前記電気光学サンプリング信号から得られた位相にシフトさせるステップを有するとよい。

40

【0019】

周波数分解光ゲート信号から得られた位相を、電気光学サンプリング信号から得られた位相にシフトさせるので、位相の絶対値を求めることができる。

【0020】

また、前記非線形混合ステップは、4光波差周波混合ステップを含んでもよい。

【0021】

混合された信号光パルスは互いに直交する二つの偏光成分に分割されて分光されるので、FROG 信号と EOS 信号とを同時に分離して得ることができる。

【0022】

また、前記非線形混合ステップは、4光波差周波混合ステップの代わりに、3光波差周

50

波混合ステップ或いは和周波混合ステップを含んでもよい。

【発明の効果】

【0023】

F R O G 信号から得られた位相を、E O S 信号から得られた位相に合わせることで、位相の絶対値が求まる。任意の時間幅をもつ光パルスの強度と位相を測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】光パルスの強度と位相を測定する装置のブロック図である。

【図2】4光波差周波混合手段の光学系を示す図である。

【図3】参照光パルスの第2高調波と被計測光パルスを干渉させる非線形混合手段の光学系を示す図である。

【図4】実施例に係る光パルスの強度と位相を測定する装置の概略図である。

【図5】式(6)に式(7)を加算して得られるX F R O G 信号をスペクトル表示した図である。

【図6】式(6)から式(7)を減算して得られるE O S 信号をスペクトル表示した図である。

【図7】図5のスペクトルデータからX F R O G 信号回復アルゴリズムを使って求めた全周波数領域の位相スペクトル(分光強度と分光位相)である。

【図8】図6のスペクトルデータを波長で積分して求めた低周波における位相の時間変化(電場振幅時間波形)である。

【図9】図8の時間変化をフーリエ変換して求めた低周波における位相スペクトル(分光強度と分光位相)である。

【図10A】図7に示す位相スペクトルに図9の分光位相( )を重ねて示した図である。

【図10B】図10Aに実線で示す位相スペクトルを矢印B方向に平行移動させて示す分光位相スペクトルと一致させた図である。

【図11】図10Bの位相スペクトルを逆フーリエ変換して求めた被計測光パルスの電場振幅時間波形である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

従来のE O S 法の原理は、参照光パルス  $E_r(t)$  と被計測光パルス  $E_0(t)$  の非線形混合信号と、参照光パルス  $E_r(t)$  との干渉信号を、参照光パルス  $E_r(t)$  と被計測光パルス  $E_0(t)$  の間の遅延時間を掃引して測定するものである。前記非線形相互作用が(3光波)和周波混合である場合、E O S 法で測定される信号は、以下のように記載される。

【0026】

$$\begin{aligned} & |E_r(t - \tau) + E_r(t - \tau)E_0(t)|^2 = |E_r(t - \tau)|^2 \\ & + |E_r(t - \tau)E_0(t)|^2 \\ & + 2R\{E_r(t - \tau)E_r^*(t - \tau)E_0(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  は時間平均を示し、 $R$  は(3光波)和周波混合の非線形感受率に比例する係数である。 $R$  は実数部(Real part)を表す記号である。

【0027】

式(2)の右辺第1項は、参照光パルスからのd c 寄与である。第2項は、被計測光パルスと参照光パルスの直交相関信号強度である。第2項を分光したものは、直交相関F R O G 信号(X F R O G)に相当する(S.Linden,H.Giessen,J.Kuhl, "XFROG-a new method for amplitude and

phase characterization of weak ultrashort pulses," Phys. Status solidi B Vol.206, pp119-124(1998)参照)。第3項は、干渉項、すなわちE O S 信号である。 $E_r(t - \tau)E_r^*(t - \tau) = I_r(t - \tau)$  をデルタ関数とすると、第3項は被計測光パルスの電場の情報を完全に与える  $E_0(t)$  になる。さもなければ、第3項は  $I_r(t)$  のフー

10

20

30

40

50

リエ変換で分光的にフィルターされる。

【0028】

X F R O G と E O S、すなわち式(2)の右辺第2項と第3項を同時に測定できれば、E O Sで得られるC E Pの絶対値をX F R O Gで解析されるパルスのC E Pの決定に使用することができる。

【0029】

本実施形態の光パルスの強度と位相を測定する装置のブロック図を図1に示す。参照光パルス $E_r(t)$ は光遅延手段1でだけ遅延されて、被測定光パルス $E_0(t)$ と参照光パルス $E_r(t - \tau)$ は非線形混合手段2で非線形混合されて式(3)で表される信号光パルス強度 $I_s(t)$ になる。

【0030】

$$I_s(t) = |E_r(t - \tau) + E_r(t - \tau) E_0(t)|^2 \quad (3)$$

信号光パルス強度 $I_s(t)$ はイメージング分光装置3に入力され、式(1)で表されるフーリエ変換信号が得られる。

【0031】

式(1)の第2項は式(2)の右辺第2項(X F R O G)に相当し、式(1)の第3項は式(2)の右辺第3項(E O S)に相当するので、式(1)の第3項で得られる位相の絶対値で式(1)の右辺第2項で得られる位相を補正することができる。

【0032】

非線形混合手段2としては、図2に示すような4光波差周波混合手段を用いることができる。集光光学系2A<sub>1</sub>で、参照光パルス $E_r(t - \tau)$ と被計測光パルス $E_0(t)$ とがアルゴンガス2A<sub>2</sub>に集光されると、3次の非線形光学効果が誘起され、アルゴンを通して4光波差周波数混合(FWM)信号、 $E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)$ が出力される。アルゴンガス2A<sub>2</sub>への集光直後に非線形光学結晶2A<sub>3</sub>が配置されると、参照光パルス $E_r(t - \tau)$ の第2高調波 $E_r^2(t - \tau)$ が発生される。

【0033】

この第2高調波 $E_r^2(t - \tau)$ の偏光は、FWM信号 $E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)$ の偏光と直交しているので、1/4波長板2A<sub>5</sub>で両者は混合される。

【0034】

混合された信号光パルスは、ウォラストンプリズム4で2つの信号光(p偏光の信号光とs偏光の信号光)に分離される。2つの信号光の強度(p偏光の信号光強度 $I_p$ とs偏光の信号光強度 $I_s$ )は、

【数1】

$$I_p = |E_r^2(t - \tau)|^2 + |\alpha E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)|^2 - 2\Re\{i\alpha E_r^2(t - \tau) E_r^{*2}(t - \tau) E_0(t)\} \quad (4)$$

【数2】

$$I_s = |E_r^2(t - \tau)|^2 + |\alpha E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)|^2 + 2\Re\{i\alpha E_r^2(t - \tau) E_r^{*2}(t - \tau) E_0(t)\} \quad (5)$$

となる。

【0035】

(3)式と(4)~(5)式を比較することで、非線形混合の演算子が4光波差周波混合の場合、(3)式が(4)~(5)式になるように演算する記号であることがわかる。

【0036】

これら2つの信号光をイメージング分光装置3で分光してフーリエ変換することで、被計測光パルス $E_0(t)$ の分光強度と分光位相を求めることができる。

【0037】

非線形混合手段2を、図3に示すように、参照光パルス $E_r(t - \tau)$ と被計測光パルス $E_0(t)$ との和周波混合 $E_r(t - \tau) E_0(t)$ を参照光パルス $E_r(t - \tau)$ と

10

20

30

40

50

干渉させる非線形混合手段 2 B とすることもできる。被計測光パルス  $E_0(t)$  と参照光パルス  $E_r(t - \tau)$  がレンズ 2 B<sub>1</sub> で非線形光学結晶 2 B<sub>2</sub> に集光されると、光軸方向に参照光パルス  $E_r(t - \tau)$  と被計測光パルス  $E_0(t)$  の和周波混合光  $E_r(t - \tau) E_0(t)$  が出力される。和周波混合光  $E_r(t - \tau) E_0(t)$  がミラー 2 B<sub>3</sub> で折り曲げられて合波器 2 B<sub>4</sub> で参照光パルス  $E_r(t - \tau)$  と合波される。すると 2 つの光は干渉し、式 (2) で表される干渉信号光が出力される。

【実施例】

【0038】

図 4 に、実施例に係る光パルスの分光強度と分光位相を測定する装置の概略を示す。実施形態の測定装置と同じ構成要素には同一の符号を付し説明を省略する。

10

【0039】

1 は参照光パルス  $E_r(t)$  の遅延時間  $\tau$  を制御する遅延時間制御手段である。コーナミラーをサーボモータ等 (不図示) で矢印 A 方向に移動させることで、光路長を変えて遅延時間  $\tau$  を制御することができる。

【0040】

5 は、被計測光パルス  $E_0(t)$  と参照光パルス  $E_r(t - \tau)$  を合波する穴あきミラーである。2 A<sub>1</sub> は焦点距離が 150 mm の軸外し放物面鏡である。2 A<sub>3</sub> は厚さ 50  $\mu\text{m}$  の BBO 結晶 (  $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 、タイプ 1、 $\theta = 29^\circ$  ) である。

【0041】

Ti サファイア増幅器出力の基本波と第 2 高調波から、アルゴン中でのフィラメンテーションを通しての 4 光波混合を使って、位相が安定した準単サイクルパルスが作られた。作られた中赤外パルス (パルス幅 12 fs、パルスエネルギー 250 nJ、波長  $\sim 5 \mu\text{m}$ ) を、被計測光パルス  $E_0(t)$  とした。

20

【0042】

一方、被計測光パルス  $E_0(t)$  を作る基になった基本波パルスの少量 (パルス幅 25 fs、パルスエネルギー 2  $\mu\text{J}$ 、波長 0.8  $\mu\text{m}$ ) を参照光パルス  $E_r(t)$  とした。

【0043】

被計測光パルス ( $E_0(t)$ 、250 nJ、12 fs) と遅延時間  $\tau$  をもつ基本波パルス ( $E_r(t - \tau)$ 、2  $\mu\text{J}$ 、25 fs) が穴あきミラー 5 で合波された。合波されたビームが放物面鏡 2 A<sub>1</sub> でアルゴン 2 A<sub>2</sub> 中に集光され、4 光波差周波数混合 (FWM) 信号  $E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)$  が発生された。

30

【0044】

一方、基本波パルスである参照光パルス  $E_r(t - \tau)$  が BBO 結晶 2 A<sub>3</sub> に入射されるので基本波パルスの第 2 高調波  $E_r^2(t - \tau)$  が発生される。

【0045】

第 2 高調波  $E_r^2(t - \tau)$  の偏光は、FWM 信号  $E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)$  の偏光と直交しているため、1/4 波長板 2 A<sub>5</sub> で両者は混合され、式 (2) で表される信号光パルスになる。

【0046】

混合された信号光パルスは、ウォラストンプリズム 4 によって式 (4)、式 (5) で表される 2 つの信号光の強度 (p 偏光の信号光強度  $I_p$  と s 偏光の信号光強度  $I_s$ ) に分離される。なお、ウォラストンプリズム 4 を、ロッシュンプリズムにしてもよい。

40

【0047】

2 つの信号光が 2 チャンネルのイメージング分光装置 3 に入力されると、式 (1) で表されるフーリエ変換 (スペクトル) 信号が得られる。本実施例の場合、式 (1) は以下に示すスペクトル信号  $SS_1$ 、 $SS_2$  となる。

【0048】

【数 3】

$$SS_1 = |\mathcal{F}[E_r^2(t - \tau)]|^2 + |\mathcal{F}[\alpha E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)]|^2 - 2\Re\left\{i\alpha \mathcal{F}[E_r^2(t - \tau)] \cdot (\mathcal{F}[E_r^2(t - \tau) E_0^*(t)])^*\right\} \quad (6)$$

50

## 【数 4】

$$SS_2 = |\mathcal{F}[E_r^2(t-\tau)]|^2 + |\mathcal{F}[\alpha E_r^2(t-\tau)E_0^*(t)]|^2 + 2\Re\{i\alpha\mathcal{F}[E_r^2(t-\tau)] \cdot (\mathcal{F}[E_r^2(t-\tau)E_0^*(t)])^*\} \quad (7)$$

## 【0049】

上記二つのスペクトル信号  $SS_1$ 、 $SS_2$  からバックグラウンドとしての第 1 項を除去して、二つのスペクトル信号  $SS_1$ 、 $SS_2$  を加算すると、第 2 項が残り X F R O G 信号になる。二つのスペクトル信号  $SS_1$ 、 $SS_2$  の差分をとると、第 3 項が残り E O S 信号になる。

## 【0050】

図 5 は加算して得られる X F R O G 信号をスペクトル表示したものであり、図 6 は減算して得られる E O S 信号をスペクトル表示したものである。

10

## 【0051】

図 7 は図 5 のスペクトルデータから X F R O G 信号回復アルゴリズム（米国、フェムトソフト社）を使って求めた全周波数領域の位相スペクトル（分光強度と分光位相）である。

## 【0052】

図 8 は図 6 のスペクトルデータを波長で積分して求めた低周波における位相の時間変化（電場振幅時間波形）である。

## 【0053】

図 9 は図 8 の時間変化をフーリエ変換して求めた低周波における位相スペクトル（分光強度と分光位相）である。

20

## 【0054】

図 10 A は図 7 に示す位相スペクトルに図 9 の分光位相（ ）を重ねて示した図である。図 10 A に示すように、実線で示す位相スペクトルを矢印 B 方向に平行移動させて図 10 B のように 示す位相スペクトルと一致させると、これ（図 10 B の分光位相）が求める被計測光パルスの分光位相になる。

## 【0055】

図 10 B の位相スペクトルを逆フーリエ変換すると図 11 に示す被計測光パルスの電場振幅時間波形が求まる。

30

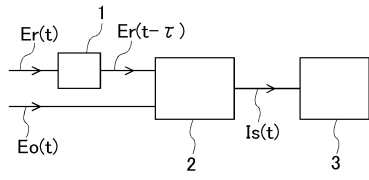
## 【符号の説明】

## 【0056】

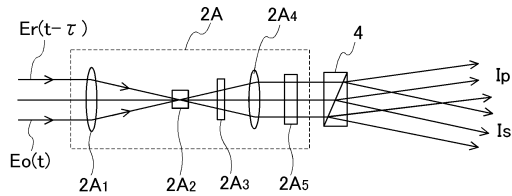
- 1 . . . . . 光遅延手段
- 2、2 A、2 B . . . . . 非線形混合手段
- 3 . . . . . イメージング分光装置



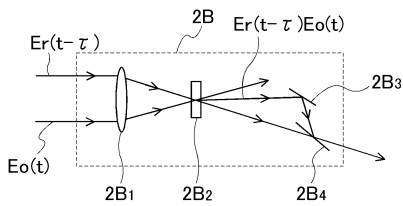
【 図 1 】



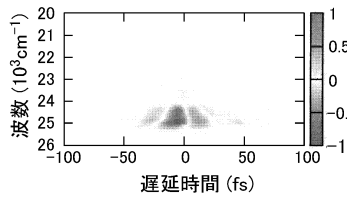
【 図 2 】



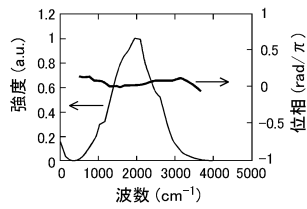
【 図 3 】



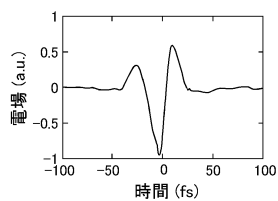
【 図 6 】



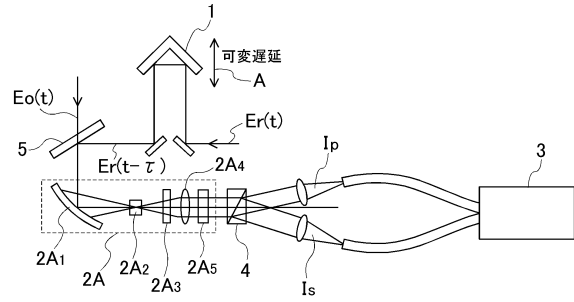
【 図 7 】



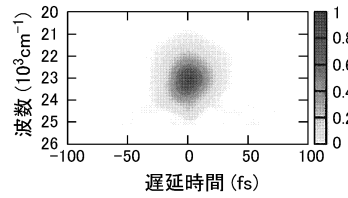
【 図 8 】



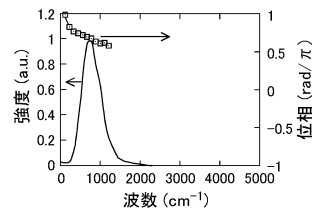
【 図 4 】



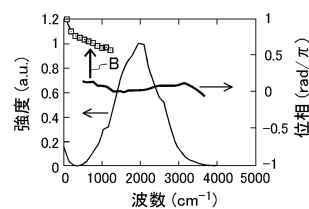
【 図 5 】



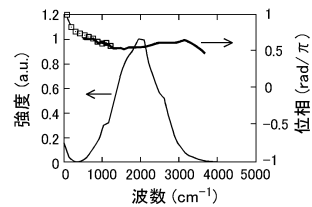
【 図 9 】



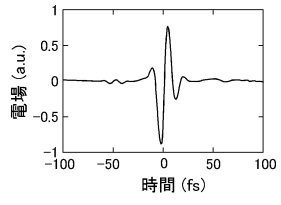
【 図 10 A 】



【 図 10 B 】



【図 11】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第5754292 (U S , A )

特表2000-514549 ( J P , A )

Takao Fuji, Yutaka Nomura, Hideto Shirai, Noriaki Tsurumachi, "Frequency-resolved optical gating with electro-optic sampling", [online], EPJ Web of Conferences, 2013年3月13日, [検索日 2013.07.25], U R L , [http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/02/epjconf\\_up2012\\_12001.pdf](http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/02/epjconf_up2012_12001.pdf)

WU Q, ZHANG X C, "Free-space electro-optic sampling of terahertz beams.", Appl Phys Lett, 1995年12月11日, Vol.67 No.24, Page.3523-3525

CUNDIFF S T, "Phase stabilization of ultrashort optical pulses.", J Phys D, 2002年4月21日, Vol.35 No.8, Page.R43-R59

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 J 1 1 / 0 0

G 0 1 J 9 / 0 0 - 9 / 0 4

J S T P l u s / J M E D P l u s / J S T 7 5 8 0 ( J D r e a m I I I )