

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2013年10月31日(31.10.2013)



(10) 国際公開番号  
WO 2013/161282 A1

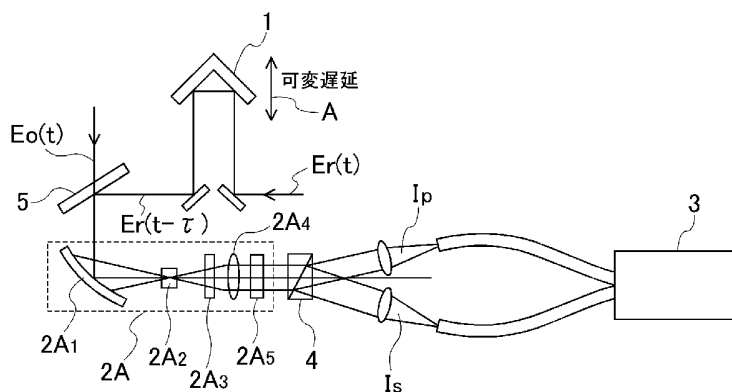
- (51) 国際特許分類:  
G01J 11/00 (2006.01) G01J 9/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/002735
- (22) 国際出願日: 2013年4月23日(23.04.2013)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2012-101276 2012年4月26日(26.04.2012) JP
- (71) 出願人: 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 (INTER-UNIVERSITY RESEARCH INSTITUTE CORPORATION NATIONAL INSTITUTES OF NATURAL SCIENCES) [JP/JP]; 〒1818588 東京都三鷹市大沢二丁目2番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 藤 貴夫(FUJI, Takao); 〒4448585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38 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 Aichi (JP). 野村 雄高(NOMURA, Yutaka); 〒4448585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38 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 Aichi (JP).
- (74) 代理人: 大川 宏(OHKAWA, Hiroshi); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅3丁目2番5号 Aichi (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: OPTICAL PULSE INTENSITY AND PHASE MEASUREMENT DEVICE AND METHOD

(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



A Variable delay

(57) Abstract: Provided are a method and device which measure the absolute values of spectral intensity and spectral phase of an optical pulse having an arbitrary duration. An optical pulse intensity and phase measurement device comprises: a nonlinear mixing means for nonlinearly mixing a reference optical pulse having an electrical field ( $E_r(t-\tau)$ ) which is delayed with an optical delay means with an optical pulse to be measured having an electrical field ( $E_o(t)$ ) and creating a signal optical pulse represented by the following formula (where \* is an operator which represents a general nonlinear mixing, and  $\alpha$  is a coefficient which is proportional to a nonlinear susceptibility in this nonlinear mixing):  $E_r(t-\tau) + \alpha E_r(t-\tau) * E_o(t)$ ; and an imaging spectrum device which spectrally splits the signal optical pulse and outputs a Fourier transform signal which is represented with the following formula (where F is a symbol which represents the Fourier transform, \* represents a complex conjugate, and R is a symbol which represents the real part):  $|F[E_r(t-\tau)]|^2 + \alpha |F[E_r(t-\tau) * E_o(t)]|^2 + 2R\{\alpha F[E_r(t-\tau)] * F[E_r(t-\tau) * E_o(t)]\}$ . The intensity and phase of the optical pulse to be measured are derived from a second term signal (frequency resolved optical gate signal) of the Fourier transform signal and a third term signal (electro-optic sampling signal) of the Fourier transform signal.

quency resolved optical gate signal) of the Fourier transform signal and a third term signal (electro-optic sampling signal) of the Fourier transform signal.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2013/161282 A1



---

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方法及び装置を提供すること。光遅延手段で遅延された電場 $E_r(t-\tau)$ をもつ参照光パルスと電場 $E_o(t)$ をもつ被計測光パルスとを非線形混合して次式（★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手段と、 $E_r(t-\tau) + \alpha E_r(t-\tau) \star E_o(t)$  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、を有し、 $|F[E_r(t-\tau)]|^2 + |\alpha F[E_r(t-\tau) \star E_o(t)]|^2 + 2R\{\alpha F[E_r(t-\tau)]\} \cdot F[E_r(t-\tau) \star E_o(t)]$  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。

## 明 細 書

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

### 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（EOS）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 $E_o(t)$ 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 $E_o(t)$ 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 $E_o(t)$ の被測定光パルスで変調された $E_r(t-\tau)E_o(t)$ 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 $E_o(t)$ 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 $E_o(t)$ 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。

## 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)

## 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探光として使用すると、被測定光パルスの電場 $E_o(t)$ 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探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。

[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。

### 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  $E_o(t)$  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（★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手段と、

$$E_r(t - \tau) + \alpha E_r(t - \tau) \star E_o(t)$$

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、

$$\begin{aligned} & |F[E_r(t - \tau)]|^2 + |\alpha F[E_r(t - \tau) \star E_o(t)]|^2 \\ & + 2R\{\alpha F[E_r(t - \tau)]\} * \cdot F[E_r(t - \tau) \star E_o(t)] \} \end{aligned} \quad (1)$$

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。

[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。

[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  $E_o(t)$  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、

$$E_r(t - \tau) + \alpha E_r(t - \tau) \star E_o(t)$$

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。

[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 1 0 A 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 □ で示す分光位相スペクトルと一致させた図である。

[図11]図 1 0 B 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  $E_o(t)$

) 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  $E_o(t)$  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。

$$\begin{aligned}
 [0026] \quad & \langle | E_r(t-\tau) + \alpha E_r(t-\tau) E_o(t) |^2 \rangle = \langle | E_r(t-\tau) |^2 \rangle \\
 & + \langle | \alpha E_r(t-\tau) E_o(t) |^2 \rangle \\
 & + \langle 2 R \{ \alpha E_r(t-\tau) E_r^*(t-\tau) E_o(t) \} \rangle \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\langle \rangle$  は時間平均を示し、 $\alpha$  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. Giesen, 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  $E_o(\tau)$  になる。さもないければ、第 3 項は  $I_r(t)$  のフー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  $\tau$  だけ遅延されて、被測定光パルス  $E_o(t)$  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。

$$[0030] \quad I_s(t) = | E_r(t-\tau) + \alpha E_r(t-\tau) \star E_o(t) |^2 \quad (3)$$



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 (XFROG) に相当し、式 (1) の第 3 項は式 (2) の右辺第 3 項 (EOS) 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 2 A<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 2 A<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 2 A<sub>2</sub> への集光直後に非線形光学結晶 2 A<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 2 A<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  $E_o(t)$  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  $E_o(t)$  との和周波混合  $E_r(t-\tau)E_o(t)$  を参照光パルス  $E_r(t-\tau)$  と干渉させる非線形混合手段 2B とすることもできる。被計測光パルス  $E_o(t)$  と参照光パルス  $E_r(t-\tau)$  がレンズ 2B<sub>1</sub> で非線形光学結晶 2B<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  $E_o(t)$  の和周波混合光  $E_r(t-\tau)E_o(t)$  が出力される。和周波混合光  $E_r(t-\tau)E_o(t)$  がミラー 2B<sub>3</sub> で折り曲げられて合波器 2B<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。
- [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  $E_o(t)$  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。2A<sub>1</sub> は焦点距離が 150 mm の軸外し放物面鏡である。2A<sub>3</sub> は厚さ 50  $\mu\text{m}$  の BBO 結晶 ( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 、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  $E_o(t)$  とした。
- [0042] 一方、被計測光パルス  $E_o(t)$  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 ( $E_o(t)$ 、250 nJ、12 fs) と遅延時間  $\tau$  をもつ基本波パルス ( $E_r(t-\tau)$ 、2  $\mu$ 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  $A_1$  でアルゴン2  $A_2$  中に集光され、4光波差周波数混合 (FWM) 信号  $E_r^2(t-\tau) E_o^*(t)$  が発生された。

[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  $A_3$  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  $E_r^2(t-\tau) E_o^*(t)$  の偏光と直交しているので、1/4波長板2  $A_5$  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。

[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]

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

[数4]

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

[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XFROG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EOS信号になる。

[0050] 図5は加算して得られるXFROG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EOS信号をスペクトル表示したものである。

[0051] 図7は図5のスペクトルデータからXFROG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。

[0054] 図10A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10A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10Bのように□で示す位相スペクトルと一致させると、これ（図10B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10B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。

### 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

## 請求の範囲

[請求項1] 時間  $t$  と共に変化する電場  $E_o(t)$  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（★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手段と、

$$E_r(t - \tau) + \alpha E_r(t - \tau) \star E_o(t)$$

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、

$$\begin{aligned} & | F [ E_r ( t - \tau ) ] | ^2 + | \alpha F [ E_r ( t - \tau ) \star E_o ( t ) ] | ^2 \\ & + 2 R \{ \alpha F [ E_r ( t - \tau ) ] \} * \cdot F [ E_r ( t - \tau ) \star E_o ( t ) ] \} \end{aligned}$$

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  $E_o(t)$  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（★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、

$$E_r(t - \tau) + \alpha E_r(t - \tau) \star E_o(t)$$

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、

$$\begin{aligned} & |F[E_r(t - \tau)]|^2 + |\alpha F[E_r(t - \tau) \star E_o(t)]|^2 \\ & + 2R\{\alpha F[E_r(t - \tau)] \cdot F[E_r(t - \tau) \star E_o(t)]\} \end{aligned}$$

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。

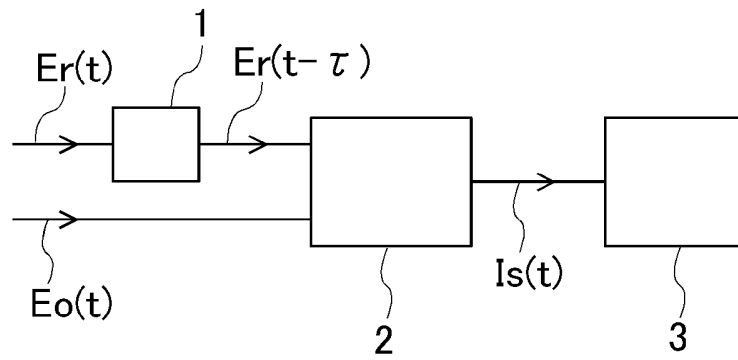
[請求項6] 前記周波数分解光ゲート信号から得られた位相を、前記電気光学サンプリング信号から得られた位相にシフトさせるステップを有する請求

項 5 に記載の光パルスの強度と位相を測定する方法。

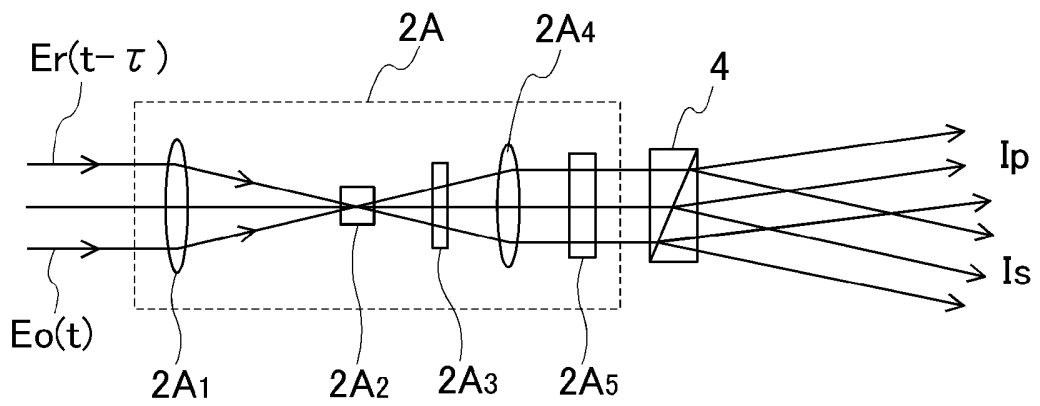
[請求項7]

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。

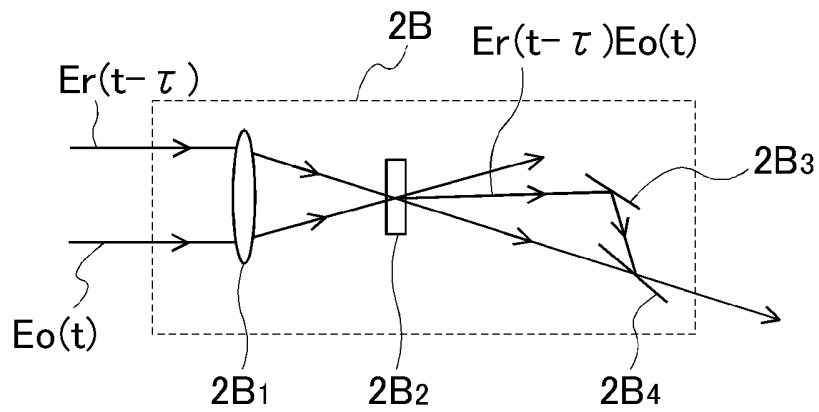
[図1]



[図2]

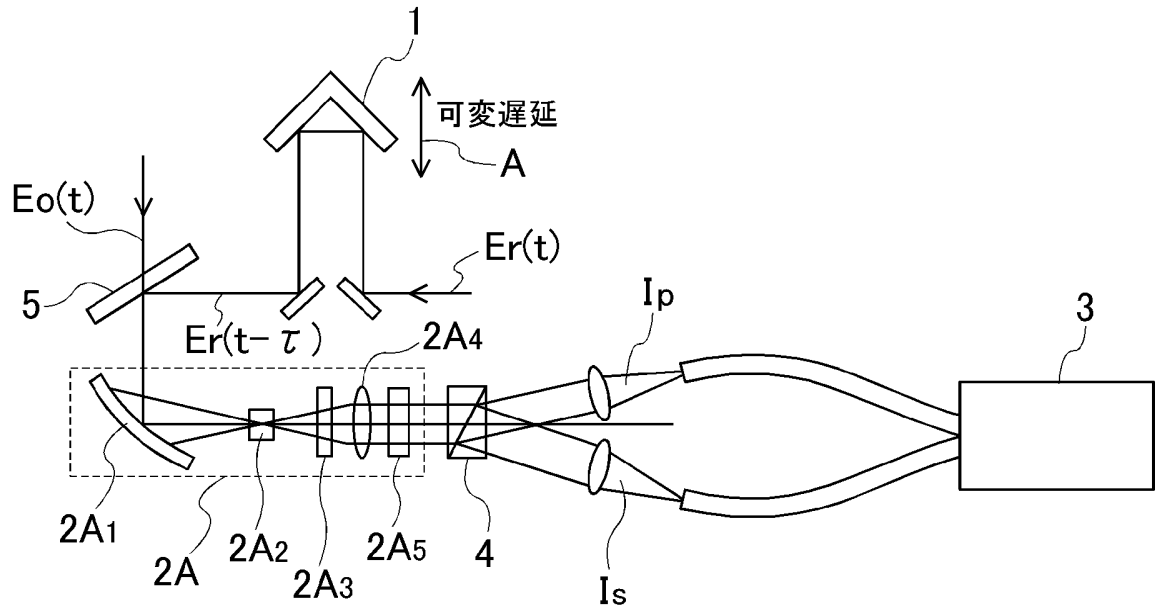


[図3]

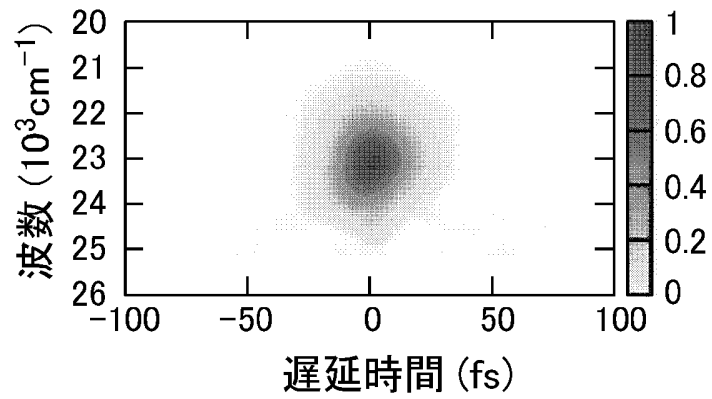




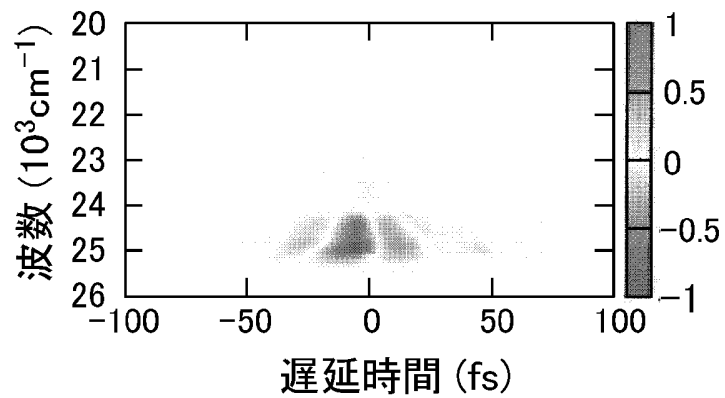
[圖4]



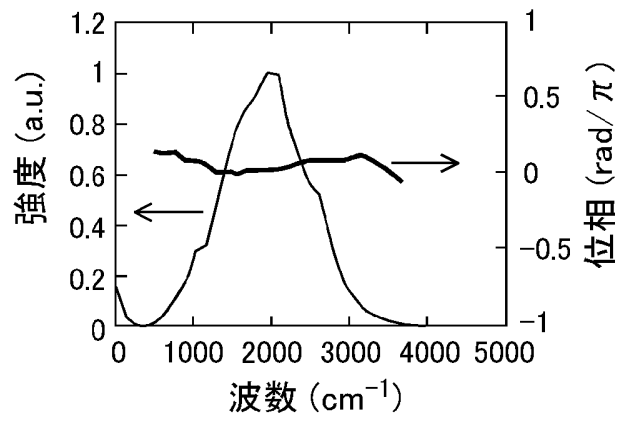
[圖5]



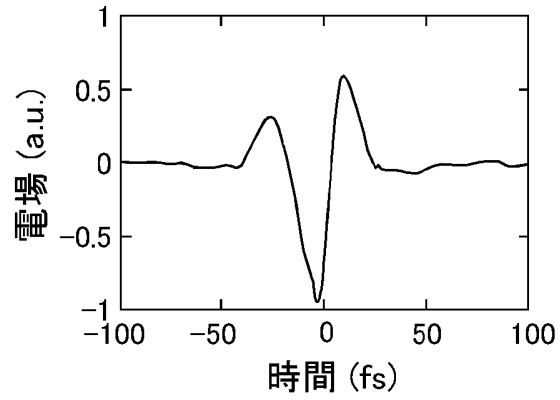
[圖6]



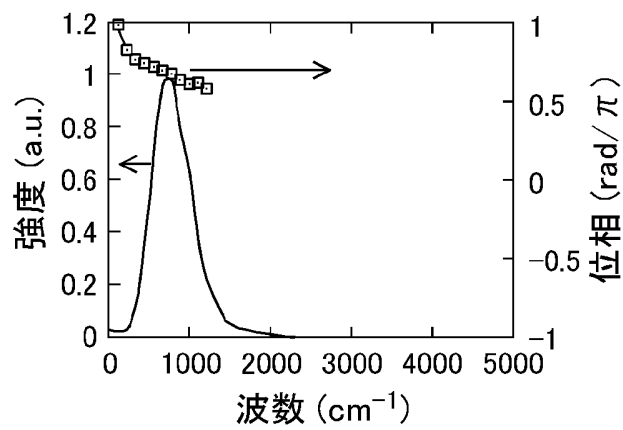
[図7]



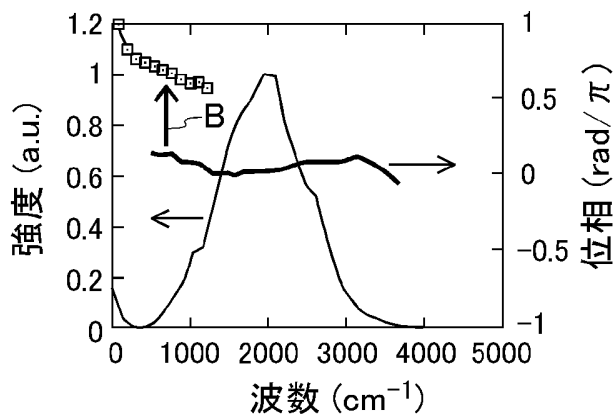
[図8]



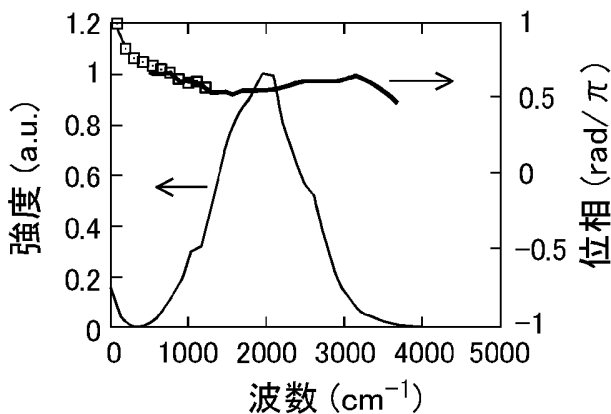
[図9]



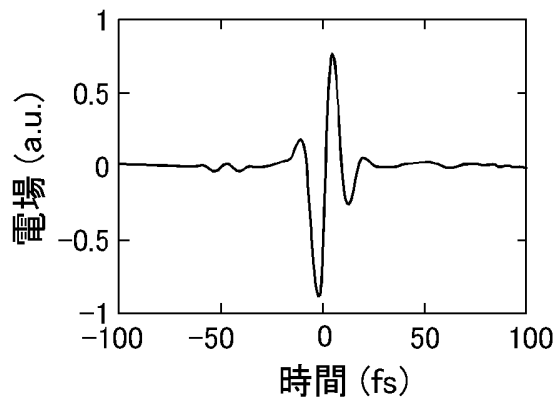
[図10A]



[図10B]



[図11]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/002735

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01J11/00(2006.01)i, G01J9/00(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01J11/00, G01J9/00-9/04		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2013 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII), IEEE Xplore		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X	Takao Fuji, Yutaka Nomura, Hideto Shirai, Noriaki Tsurumachi, "Frequency-resolved optical gating with electro-optic sampling", [online], EPJ Web of Conferences, 2013.03.13, [retrieval date 25 July 2013 (25.07.2013)], <URL:http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/02/epjconf_up2012_12001.pdf>	1-7
A	US 5754292 A (The Regents of the University of California), 19 May 1998 (19.05.1998), 3rd to 4th columns; fig. 1 to 3 (Family: none)	1-7
A	WU Q, ZHANG X-C, "Free-space electro-optic sampling of terahertz beams.", Appl Phys Lett, 1995.12.11, Vol.67 No.24, Page.3523-3525	1-7
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 25 July, 2013 (25.07.13)		Date of mailing of the international search report 06 August, 2013 (06.08.13)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/002735

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CUNDIFF S T, "Phase stabilization of ultrashort optical pulses.", J Phys D, 2002.04.21, Vol.35 No.8, Page.R43-R59	1-7
A	JP 2000-514549 A (Rensselaer Polytechnic Institute), 31 October 2000 (31.10.2000), claim 1; fig. 1 & US 5952818 A & EP 902896 A & WO 1997/045747 A1	1-7

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01J11/00(2006.01)i, G01J9/00(2006.01)i											
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01J11/00, G01J9/00-9/04											
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2013年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2013年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2013年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2013年	日本国実用新案登録公報	1996-2013年	日本国登録実用新案公報	1994-2013年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2013年										
日本国実用新案登録公報	1996-2013年										
日本国登録実用新案公報	1994-2013年										
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII), IEEE Xplore											
C. 関連すると認められる文献											
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号									
P, X	Takao Fuji, Yutaka Nomura, Hideto Shirai, Noriaki Tsurumachi, "Frequency-resolved optical gating with electro-optic sampling", [online], EPJ Web of Conferences, 2013.03.13, [検索日 2013.07.25], <URL:http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/02/epjconf_up2012_12001.pdf>	1-7									
A	US 5754292 A (The Regents of the University of California) 1998.05.19, 第3-4欄, 第1-3図 (ファミリーなし)	1-7									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。											
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献									
国際調査を完了した日 25.07.2013		国際調査報告の発送日 06.08.2013									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 森口 正治	2W 4842								
		電話番号 03-3581-1101 内線	3292								

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WU Q, ZHANG X - C, "Free-space electro-optic sampling of terahertz beams." , Appl Phys Lett, 1995.12.11, Vol.67 No.24, Page.3523-3525	1-7
A	CUNDIFF S T, "Phase stabilization of ultrashort optical pulses." , J Phys D, 2002.04.21, Vol.35 No.8, Page.R43-R59	1-7
A	JP 2000-514549 A (レンセレー ポリテクニク インスティテュート) 2000.10.31, [請求項1], 第1図 & US 5952818 A & EP 902896 A & WO 1997/045747 A1	1-7