

(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
2015 年 10 月 29 日(29.10.2015)



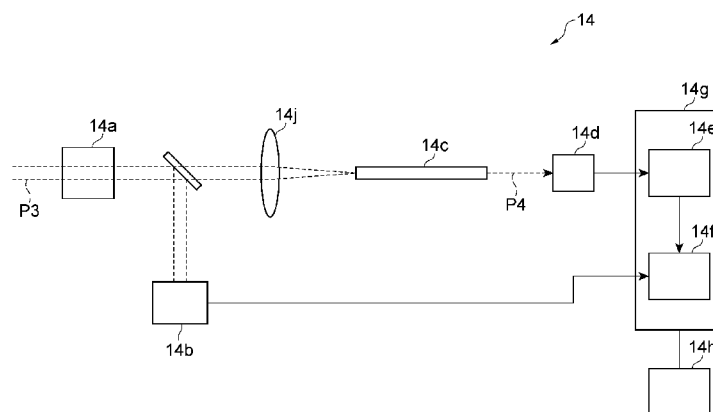
(10) 国際公開番号
WO 2015/163149 A1

- (51) 国際特許分類:
G01J 11/00 (2006.01) *G02F 1/01* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/061006
- (22) 国際出願日: 2015 年 4 月 8 日(08.04.2015)
- (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 2014-087971 2014 年 4 月 22 日(22.04.2014) JP
- (71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社(HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) [JP/JP]; 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 Shizuoka (JP).
- (72) 発明者: 井上 卓(INOUE Takashi); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 渡辺 向陽(WATANABE Koyo); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 高橋 考二(TAKAHASHI Koji); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 松本 直也(MATSUMOTO Naoya); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1 番 1 号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル) 9 階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (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, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, 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, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロピア (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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: WAVEFORM MEASUREMENT DEVICE AND PULSED-LIGHT-GENERATING DEVICE

(54) 発明の名称: 波形計測装置およびパルス光生成装置



(57) Abstract: This waveform measurement device is provided with: an input spectrum acquisition unit for acquiring an input intensity spectrum which is the intensity spectrum of pulsed light; an optical element for inputting pulsed light, and outputting light that has an intensity spectrum corresponding to the phase spectrum of the pulsed light; an output spectrum acquisition unit for acquiring an output intensity spectrum which is the intensity spectrum of the light outputted by the optical element; and a phase spectrum determination unit for comparing an output intensity spectrum that is calculated on the assumption that pulsed light having an input intensity spectrum and a hypothetical phase spectrum has been inputted to the optical element, and the output intensity spectrum that was acquired by the output spectrum acquisition unit, and determining the phase spectrum of the pulsed light. The phase spectrum determination unit reshapes a controlled phase spectrum, and sets a hypothetical phase spectrum.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2015/163149 A1



添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

波形計測装置は、パルス光の強度スペクトルである入力強度スペクトルを取得する入力スペクトル取得部と、パルス光を入力し、パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光を出力する光学素子と、光学素子から出力された光の強度スペクトルである出力強度スペクトルを取得する出力スペクトル取得部と、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルと、出力スペクトル取得部において取得された出力強度スペクトルとを比較して、パルス光の位相スペクトルを決定する位相スペクトル決定部と、を備える。位相スペクトル決定部は、制御位相スペクトルを変形させて、仮想の位相スペクトルを設定する。

明 細 書

発明の名称： 波形計測装置およびパルス光生成装置

技術分野

[0001] 本発明の一側面は、波形計測装置およびパルス光生成装置に関するものである。

背景技術

[0002] 近年、アト秒オーダーないしナノ秒オーダーといった極めて短い時間幅を有する超短パルス光を利用したレーザ加工装置や顕微鏡などが開発されている。また、非線形光学効果を利用した情報通信システムの開発も進められている。例えばこれらのような技術分野では、所望の時間波形を有する超短パルス光を生成することが望まれている。

[0003] 超短パルス光の所望の時間波形は、例えば、様々な波長成分を有する光を重ね合わせ、各波長成分の位相を調整することによって得られる。そして、所望の時間波形をより精度良く実現するためには、生成された超短パルス光の時間波形を計測し、各波長成分の位相の調整にその計測結果をフィードバックするとよい。なお、特許文献1及び2には、超短パルス光の時間波形を正確に計測するための波形再構成装置が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2010-204308号公報

特許文献2：特開2013-170905号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 超短パルス光の時間幅は極めて短いので、超短パルス光の時間波形を直接計測することは難しい。従って、様々な波長成分を重ね合わせることに対応する強度スペクトルと、各波長成分の位相を調整することに対応する位相スペクトルとを個別に求め、これらに基づいて超短パルス光の時間波形を算出

する手法が検討されている。

[0006] ここで、超短パルス光の強度スペクトルは、比較的容易に計測可能である。しかしながら、超短パルス光の位相スペクトルの計測は容易ではない。位相スペクトルを計測する手法としては、周波数分解光ゲーティング（FROG）計測法やSPIDER（Spectral Interferometry for Direct Electric Field Reconstruction）計測法、TADPOLE（Temporal Analysis of Dispersing by a Pair Of Light E-fields）計測法、複素電界スペクトル分布再構成（CESDR；Complex Electric field Specyrum Distribution Retrieval）計測法などがある。そのうち、FROGやCESDRは反復最適化計算を必要とし、最適解に収束するまでに長時間を要する場合や、最適解に収束せずに局所解に収束して正確な位相スペクトルを計測できない場合があるという課題がある。

[0007] 本発明の一側面は、このような課題に鑑みてなされたものであり、正確に且つ短時間で位相スペクトルの計測が可能な波形計測装置およびパルス光生成装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 上述した課題を解決するために、本発明の一側面による波形計測装置は、パルス光の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用ホログラムが呈示された空間光変調器において2以上の波長成分を含む入力光の位相が波長毎に変調されることにより得られるパルス光の時間波形を計測する装置であって、パルス光の強度スペクトルである入力強度スペクトルを取得する入力スペクトル取得部と、パルス光を入力し、パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光を出力する光学素子と、光学素子から出力された光の強度スペクトルである出力強度スペクトルを取得する出力スペクトル取得部と、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルと、出力スペクトル取得部において取得された出力強度スペクトルとを比較して、パルス光の位相スペクトルを決定する位相スペクトル

ル決定部と、周波数－時間変換により、位相スペクトル決定部において決定された位相スペクトルと入力強度スペクトルとに基づいて、パルス光の時間波形を算出する波形算出部とを備え、位相スペクトル決定部は、制御位相スペクトルを変形させて、仮想の位相スペクトルを設定する。

[0009] この波形計測装置は、まず、空間光変調器からパルス光を入力する。そして、入力スペクトル取得部は、このパルス光の強度スペクトル（入力強度スペクトル）を取得する。また、光学素子は、パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトル（出力強度スペクトル）を有する光を出力する。出力スペクトル取得部は、出力強度スペクトルを取得する。位相スペクトル決定部は、パルス光の仮想の位相スペクトルを設定し、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が上記光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルと、出力スペクトル取得部において取得された実際の出力強度スペクトルとを比較することにより、パルス光の位相スペクトルを決定する。なお、位相スペクトル決定部は、算出される出力強度スペクトルが実際の出力強度スペクトルに近づくように、仮想の位相スペクトルを繰り返し設定してもよい。波形算出部は、周波数－時間変換（frequency-time transform）により、位相スペクトル決定部において決定された位相スペクトルと入力強度スペクトルとに基づいて、パルス光の時間波形を算出する。以上の構成によれば、パルス光の強度スペクトル及び位相スペクトルを個別に求め、これらに基づいてパルス光の時間波形を算出することができる。

[0010] 更に、この波形計測装置では、位相スペクトル決定部が、制御位相スペクトルを変形させることにより仮想の位相スペクトルを設定する。パルス光の時間波形を形成する位相スペクトルは、制御位相スペクトルによる影響を主に受けている。故に、該位相スペクトルは、制御位相スペクトルから大きくは変化しないことが多い。従って、制御位相スペクトルに基づいて仮想の位相スペクトルを設定することにより、位相スペクトル決定部における計算量を低減して、位相スペクトルの計測に要する時間を短縮することができる。

[0011] 上記の波形計測装置において、位相スペクトル決定部は、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルが、出力スペクトル取得部において取得された出力強度スペクトルに近づくように、仮想の位相スペクトルを最適化する演算を行い、該演算における仮想の位相スペクトルの初期値として制御位相スペクトルを用いてもよい。これにより、実際の位相スペクトルに近い仮想の位相スペクトルを、正確に且つ短時間で求めることができる。

[0012] また、上述した課題を解決するために、本発明の一側面によるパルス光生成装置は、所望の時間波形を有するパルス光を生成する装置であって、2以上の波長成分を含む入力光を生成する光出力部と、パルス光の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用ホログラムが呈示され、パルス光を生成するために入力光の位相を波長毎に変調する空間光変調器と、位相変調用ホログラムを空間光変調器に与える制御部と、パルス光の時間波形を計測する波形計測部とを備え、制御部は、波形計測部における計測結果に基づいて、パルス光の時間波形が所望の波形に近づくように位相変調用ホログラムを調整し、波形計測部は、パルス光の強度スペクトルである入力強度スペクトルを取得する入力スペクトル取得部と、パルス光を入力し、パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光を出力する光学素子と、光学素子から出力された光の強度スペクトルである出力強度スペクトルを取得する出力スペクトル取得部と、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルと、出力スペクトル取得部において取得された出力強度スペクトルとを比較して、パルス光の位相スペクトルを決定する位相スペクトル決定部と、周波数－時間変換（frequency-time transform）により、位相スペクトル決定部において決定された位相スペクトルと入力強度スペクトルとに基づいて、パルス光の時間波形を算出する波形算出部とを有し、位相スペクトル決定部は、制御位相スペクトルを変形させて、仮想

の位相スペクトルを設定する。

[0013] このパルス光生成装置では、まず、光出力部が、2以上の波長成分を含む入力光を生成する。次に、空間光変調器が、入力光の時間波形が変化したパルス光を出力するために、入力光の位相を波長毎に変調する。このとき、制御部が、パルス光の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用プログラムを空間光変調器に与える。波形計測部は、パルス光の時間波形を計測する。なお、波形計測部の構成及び動作は、前述した波形計測装置と同様である。

[0014] また、波形計測部では、位相スペクトル決定部が、制御位相スペクトルを変形させて、仮想の位相スペクトルを設定する。従って、このパルス光生成装置によれば、前述した波形計測装置と同様に、位相スペクトル決定部における計算量を低減して、位相スペクトルの計測に要する時間を短縮することができる。

[0015] 上記のパルス光生成装置において、位相スペクトル決定部は、入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光が光学素子に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルが、出力スペクトル取得部において取得された出力強度スペクトルに近づくように、仮想の位相スペクトルを最適化する演算を行い、該演算における仮想の位相スペクトルの初期値として制御位相スペクトルを用いてもよい。これにより、実際の位相スペクトルに近い仮想の位相スペクトルを、正確に且つ短時間で求めることができる。

発明の効果

[0016] 本発明の一側面による波形計測装置およびパルス光生成装置によれば、正確に且つ短時間で位相スペクトルの計測が可能となる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]一実施形態に係るパルス光生成装置の構成を示すブロック図である。

[図2]入力光の波長毎の強度分布の一例を示すグラフである。

[図3] (a), (b) 2以上の波長成分を重ね合わせたときの電場及び光強度

の時間変化の一例を示すグラフである。

[図4] (a) ビート光の位相スペクトルの一例を示すグラフである。(b) ビート光のエンベロープが時間方向にシフトする様子を示す図である。

[図5] 波長成分毎の位相変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図6] 波長成分毎の位相変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図7] 波長成分毎の位相変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図8] 波長成分毎の位相変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図9] 波長成分毎の位相変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図10] 波長成分毎の強度変調によって生成される時間波形を示すグラフである。(a) パルス光の強度スペクトルと位相スペクトルとの組み合わせを示している。(b) (a) の組み合わせによってパルス光に実現される時間波形を示している。

[図11] 波形制御部の構成例を示すブロック図である。

[図12]波形計測部の構成例を示すブロック図である。

[図13]波形計測部の動作を示すフローチャートである。

[図14]一変形例に係る波形計測部の構成を概念的に示す図である。

[図15]スペクトログラムの一例である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、添付図面を参照しながら本発明の一側面による波形計測装置およびパルス光生成装置の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0019] 図1は、一実施形態に係るパルス光生成装置1Aの構成を示すブロック図である。図1に示されるように、本実施形態のパルス光生成装置1Aは、光出力部11と、波形制御部12と、制御部13と、波形計測部（波形計測装置）14とを備える。

[0020] 光出力部11は、2以上の波長成分を含む入力光P1を生成する。この入力光P1は、例えばフェムト秒オーダーの時間幅を有するレーザパルス光である。或いは、入力光P1はインコヒーレントなパルス光であってもよい。入力光P1がインコヒーレントな光である場合、光出力部11として例えばLED（Light Emitting Diode）光源、SLD（Super Luminescent Diode）光源、ASE（Amplified Spontaneous Emission）光源などが用いられ得る。図2は、入力光P1の波長毎の強度分布の一例を示すグラフである。この例では、互いに異なる波長成分 $P\lambda_1 \sim P\lambda_n$ が入力光P1に含まれている。

[0021] 波形制御部12は、入力光P1の位相及び強度（振幅）を波長成分毎に変調することにより、入力光P1から変化した任意の時間波形を有するパルス光P3を生成する。ここで、図3（a）及び図3（b）は、2以上の波長成分を重ね合わせたときの電場及び光強度の時間変化の一例を示すグラフである。図3（a）及び図3（b）に示されるように、2以上の波長成分が互いに重ね合わされると、これらの波長成分が相互に干渉し、パルス状のビート光P2が生じる。そして、このビート光P2の時間波形（エンベロープ）は、各波長成分の位相が個別に変化することにより、更に変化することができ

る。図4（a）は、ビート光P2の位相スペクトルの一例を示すグラフである。波形制御部12は、例えば図4（a）に示されるように、ビート光P2の波長毎の位相を制御する。これにより、図4（b）に示されるように、ビート光P2のエンベロープが時間方向にシフトする。なお、図4では、一例として2つの波長成分の位相を異ならせた場合の変化を示している。波長成分 $P\lambda_1 \sim P\lambda_n$ の数 n が3つ以上である場合には、更に多様な時間波形の変化がビート光P2に生じる。こうして時間波形が変化した光は、パルス光P3として波形制御部12から出力される。

[0022] 図5～図10は、波長成分毎の位相変調及び強度変調によって生成される様々な時間波形を示すグラフである。図5～図10において、（a）は、パルス光P3の強度スペクトルG11と位相スペクトルG12との組み合わせを示している。また、（b）は、（a）の組み合わせによってパルス光P3に実現される時間波形（時間強度波形）G13を示している。

[0023] 図5に示されるように、位相スペクトルG12が平坦（フラット）である場合、時間波形G13は入力光P1の時間波形と略同一となる。これに対し、図6に示されるように、位相スペクトルG12が一次関数である場合、時間波形G13は、入力光P1の時間波形が時間方向にシフトされた波形となる。また、図7に示されるように、位相スペクトルG12が二次関数である場合、時間波形G13は、入力光P1の時間幅が広がった波形となる。また、図8に示されるように、位相スペクトルG12が三次関数である場合、時間波形G13は、前後非対称な波形となる。また、図9に示されるように、位相スペクトルG12が $-\pi/2$ （rad）と $\pi/2$ （rad）とを繰り返す波形である場合、時間波形G13は2つの超短パルス波形を含む波形となる。なお、図10に示されるように、位相スペクトルG12が平坦（フラット）であっても、パルス光P3の強度スペクトルG11がコサイン変調された場合には、時間波形G13は3つの超短パルス波形を含む波形となる。

[0024] 図11は、波形制御部12の構成例を示すブロック図である。図11に示されるように、波形制御部12は、光出力部11と光学的に結合されている

。また、波形制御部 12 は、所定の光軸 L1 上に並んで配置された、ビームスプリッタ 121、分光素子 122、結像レンズ 123、及び空間光変調器 124 を有する。

[0025] ビームスプリッタ 121 は、光出力部 11 と光学的に結合されている。ビームスプリッタ 121 は、光軸 L1 に対して傾斜した光透過反射面 121a を有する。光透過反射面 121a は、一方の側から光軸 L1 に沿って入力する入力光 P1 を透過する。分光素子 122 は、ビームスプリッタ 121 と光学的に結合されている。分光素子 122 は、ビームスプリッタ 121 を透過した入力光 P1 を、各波長成分 $P\lambda_1 \sim P\lambda_n$ に分光する。分光素子 122 は、例えばグレーティング（回折格子）やプリズムなどの光学素子によって構成され得る。分光素子 122 は、反射型及び透過型の何れであってもよい。分光素子 122 によって分光された各波長成分 $P\lambda_1 \sim P\lambda_n$ は、結像レンズ 123 を通過して、空間光変調器 124 の光変調面 124a における各波長成分 $P\lambda_1 \sim P\lambda_n$ に対応する領域上に結像される。なお、結像レンズ 123 に代えて、例えば凹面鏡といった反射型の結像手段が用いられてもよい。

[0026] 空間光変調器 124 は、分光素子 122 と光学的に結合されている。空間光変調器 124 は、入力光 P1 の時間波形が変化したパルス光 P3 を生成するために、入力光 P1 の位相及び強度のうち少なくとも一方を波長毎に変調する。空間光変調器 124 は、例えば屈折率変化材料型空間光変調器（例えば液晶を用いたものでは、LCOS（Liquid Crystal on Silicon）型、LCD（Liquid Crystal Display））、Segment Mirror型空間光変調器、Continuous Deformable Mirror型空間光変調器などが挙げられる。屈折率変化材料型空間光変調器、Segment Mirror型空間光変調器、Continuous Deformable Mirror型空間光変調器は各装置に電圧や電流、あるいは書き出し光が印加されることによって制御される。また、屈折率変化材料型空間光変調器は、透過型及び反射型の何れであってもよい。光変調面 124a は、一次元、或いは二次元状に配列された複数の画素を有しており、各画素において独立した変調量を入力光 P1 に付与する。但し、一次元の空間光変調器 124 を用いて位

相及び強度の双方を変調する場合は、位相を変調するための空間光変調器と、強度を変調するための別の空間光変調器とが必要である。空間光変調器 124 には、パルス光 P3 の時間波形を制御するための位相スペクトル（以下、制御位相スペクトルと称する）に基づく位相変調用ホログラム（CGH；Computer Generated Hologram）が与えられる。ここで、位相変調用ホログラムが与えられるとは、該位相変調用ホログラムに含まれる複数の画素毎の位相変調量を実現するための電気信号が空間光変調器 124 に提供されることをいう。

[0027] なお、入力光 P1 の位相スペクトルが平坦ではない場合には、その非平坦な位相スペクトルと平坦な位相スペクトルとの差分を補うための別の位相変調用ホログラムが、上記位相変調用ホログラムに重畳して空間光変調器 124 に与えられてもよい。また、光変調面 124a から照射対象物までの間に存在する各種光学部品に起因する波長分散等を補償するための更に別の位相変調用ホログラムが、上記位相変調用ホログラムに重畳して空間光変調器 124 に与えられてもよい。

[0028] 空間光変調器 124 によって変調された光は、レンズ 123 及び分光素子 122 を経て、パルス光 P3 となり、ビームスプリッタ 121 に達する。ビームスプリッタ 121 の光透過反射面 121a は、他方の側から光軸 L1 に沿って入力されるパルス光 P3 を、光軸 L1 と交差する方向に反射する。この後、図 1 に示されるように、パルス光 P3 は、ビームスプリッタ 16 に達する。ビームスプリッタ 16 は、波形制御部 12 から出力されたパルス光 P3 を分割する光学素子である。ビームスプリッタ 16 としては、例えばハーフミラーなどが用いられ得る。ビームスプリッタ 16 において分割された一方のパルス光 P3 は、光増幅器やレンズ、光ファイバ等を含む光出力光学系 17 を経て、照射対象物（レーザ加工装置での加工対象物若しくは顕微鏡での観察対象物など）に照射される。また、ビームスプリッタ 16 において分割された他方のパルス光 P3 は波形計測部 14 に導かれる。

[0029] なお、上記の波形制御部 12 の構成において、ビームスプリッタ 121 を

用いることなく、光変調面 1 2 4 a の角度を調整してパルス光 P 3 の出力方向を入力光 P 1 の入力方向と異ならせることにより、入力光 P 1 とパルス光 P 3 とを互いに分離してもよい。また、ビームスプリッタ 1 6 を用いることなく、光出力光学系 1 7 から出力されたパルス光 P 3 を波形計測部 1 4 に導いてもよい。

[0030] 再び図 1 を参照する。制御部 1 3 は、例えば CPU 及び記憶媒体を有するコンピュータによって構成され得る。制御部 1 3 は、光出力部 1 1、波形制御部 1 2、及び後述する波形計測部 1 4 の動作を制御する動作制御部 1 3 a と、波形制御部 1 2 から出力されるパルス光 P 3 の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用ホログラムを作成する CGH 作成部 1 3 b と、位相変調用ホログラムを補正する変調補正部 1 3 c とを有する。変調補正部 1 3 c は、波形計測部 1 4 における計測結果、すなわちパルス光 P 3 の時間波形情報（例えば位相スペクトル及び強度スペクトル）に基づいて、パルス光 P 3 の時間波形が所望の波形に更に精度良く近づくように、波形制御部 1 2 の空間光変調器 1 2 4 に呈示される位相変調用ホログラムを調整（補正）する。

[0031] 波形計測部 1 4 は、パルス光 P 3 の時間波形を計測する。図 1 2 は、波形計測部 1 4 の構成例を示すブロック図である。本実施形態の波形計測部 1 4 は、いわゆる CESDR 計測法に従ってパルス光 P 3 の時間波形を計測するものである。図 1 2 に示されるように、波形計測部 1 4 は、光強度制御器（アッテネータ）1 4 a、入力スペクトル取得部 1 4 b、光伝播素子 1 4 c、出力スペクトル取得部 1 4 d、位相スペクトル決定部 1 4 e、及び波形算出部 1 4 f を有する。

[0032] 光強度制御器 1 4 a は、波形制御部 1 2 の空間光変調器 1 2 4 と光学的に結合されている。また、光強度制御器 1 4 a は、波形計測部 1 4 に入力されるパルス光 P 3 の強度を調整する。具体的には、光強度制御器 1 4 a は、入力されたパルス光 P 3 の強度スペクトル比を保ったまま、各波長成分の強度を所定の倍率でもって変化させる。なお、波形制御部 1 2 に強度変調機能が

ある場合は、波形制御部 1 2 においてパルス光 P 3 の強度を調整できるので、光強度制御器 1 4 a を省くことが可能である。

[0033] 入力スペクトル取得部 1 4 b は、ビームスプリッタを介して光強度制御器 1 4 a と光学的に結合され、波形制御部 1 2 の空間光変調器 1 2 4 と光学的に結合される。入力スペクトル取得部 1 4 b は、パルス光 P 3 の強度スペクトル（以下、入力強度スペクトルと称する）を検出する。パルス光 P 3 の強度スペクトルは、例えば、図 5 ～図 1 0 の（a）に示されたグラフ G 1 1 のような形状を有する。入力スペクトル取得部 1 4 b は、例えば、グレーティングやプリズムなどの分光素子と、該分光素子によって分光された各波長成分の強度を検出するラインセンサなどの光検出器とによって構成される。入力スペクトル取得部 1 4 b は、入力強度スペクトルを示す検出信号を計算機 1 4 g に出力する。

[0034] 光伝播素子 1 4 c は、ビームスプリッタを介して光強度制御器 1 4 a と光学的に結合され、波形制御部 1 2 の空間光変調器 1 2 4 と光学的に結合される。光伝播素子 1 4 c は、パルス光 P 3 を入力し、パルス光 P 3 の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光 P 4 を出力する光学素子である。すなわち、光伝播素子 1 4 c は、その内部を伝搬されるパルス光 P 3 に自己位相変調を誘起させる。ここで、自己位相変調とは、非線形光学効果の一つであり、光ファイバなどの媒質の屈折率が、該媒質中を伝搬される光の強度に比例して僅かに変化し、位相変調が生じる現象である。光伝播素子 1 4 c としては、例えば、自己位相変調に関するパラメータ（例えば、非線形光学係数や n 次分散（ n は正の整数）を示すパラメータ）が既知である光学素子が用いられ得る。一実施例では、光伝播素子 1 4 c はフォトニック結晶ファイバなどの高非線形光ファイバである。パルス光 P 3 は、例えば集光レンズ 1 4 j によって集光されつつ光伝播素子 1 4 c の一端に入力される。

[0035] 出力スペクトル取得部 1 4 d は、光伝播素子 1 4 c と光学的に結合されている。出力スペクトル取得部 1 4 d は、光伝播素子 1 4 c から出力された光 P 4 の強度スペクトル（以下、出力強度スペクトルと称する）を検出する。

出力スペクトル取得部 14 d は、例えば、グレーティングやプリズムなどの分光素子と、該分光素子によって分光された各波長成分の強度を検出するラインセンサなどの光検出器とによって構成される。出力スペクトル取得部 14 d は、出力強度スペクトルを示す検出信号を計算機 14 g に出力する。

[0036] 位相スペクトル決定部 14 e は、出力スペクトル取得部 14 d と電氣的に結合されている。位相スペクトル決定部 14 e は、入力スペクトル取得部 14 b において取得された入力強度スペクトルと、出力スペクトル取得部 14 d において取得された出力強度スペクトルとに基づいて、パルス光 P 3 の位相スペクトルを決定する。具体的には、位相スペクトル決定部 14 e は、仮想の位相スペクトルを設定し、その仮想の位相スペクトルを有するパルス光 P 3 が光伝播素子 14 c に入力されたと仮定したときの出力強度スペクトルをシミュレーションにより算出する。また、位相スペクトル決定部 14 e は、出力スペクトル取得部 14 d より実際の出力強度スペクトルを取得する。位相スペクトル決定部 14 e は、算出される出力強度スペクトルが実際の出力強度スペクトルに近づくように、焼きなまし法などの最適化アルゴリズムに従い、仮想の位相スペクトルを変形しながら実際の出力強度スペクトルとの比較を繰り返し行う。このような処理（フィッティング）によって、実際の出力強度スペクトルに十分に近い仮想の位相スペクトルが決定され、該仮想の位相スペクトルがパルス光 P 3 の位相スペクトルとして認識される。位相スペクトル決定部 14 e において決定された位相スペクトル、及び入力スペクトル取得部 14 b において取得された入力強度スペクトルは、時間波形情報として制御部 13 の変調補正部 13 c に提供される。

[0037] 波形算出部 14 f は、入力スペクトル取得部 14 b と電氣的に結合されている。また、波形算出部 14 f は、位相スペクトル決定部 14 e と電氣的に結合されている。波形算出部 14 f は、位相スペクトル決定部 14 e において決定された位相スペクトルと、入力スペクトル取得部 14 b において取得された入力強度スペクトルとに基づいて、周波数－時間変換（例えば、逆フーリエ変換）により、パルス光 P 3 の時間波形の再構成を行う。再構成され

た時間波形は、表示部 14 h に表示される。

[0038] 位相スペクトル決定部 14 e 及び波形算出部 14 f は、例えば一つの計算機 14 g によって実現され得る。計算機 14 g は、CPU と記憶媒体とを備えるコンピュータである。計算機 14 g は、前述した制御部 13 と共通のコンピュータによって構成されてもよい。その場合、時間波形情報はコンピュータの記憶媒体に記憶される。

[0039] なお、上記の例では入力スペクトル取得部 14 b が入力強度スペクトルを検出しているが、入力強度スペクトルが既知である場合には、計算機 14 g の記憶媒体に入力強度スペクトルを記憶しておき、入力スペクトル取得部 14 b が記憶媒体から入力強度スペクトルを読み出してもよい。この場合、入力スペクトル取得部 14 b は、計算機 14 g によって実現され得る。

[0040] ここで、本実施形態における位相スペクトル決定部 14 e での処理内容について、更に詳細に説明する。アト秒オーダーないしナノ秒オーダーといった極めて短い時間幅を有するパルス光 P 3 の時間波形を計測するためには、パルス光 P 3 の強度スペクトル及び位相スペクトルに関する情報が必要となる。これらのうち、強度スペクトル（入力強度スペクトル）は直接的に計測可能であるが、位相スペクトルの直接的な計測は難しい。従って、本実施形態の波形計測部 14 では、仮想の位相スペクトルを設定し、仮想の位相スペクトルと入力強度スペクトルとを基に、光伝播素子 14 c に関するパラメータを用いて光伝播素子 14 c 内での伝播のシミュレーションを行うことにより、仮想の強度スペクトルを算出する。そして、仮想の強度スペクトルと出力強度スペクトルとを互いに比較して、仮想の強度スペクトルと出力強度スペクトルとの合致度合いを算出し、その合致度合いを評価する。合致度合いとしては、例えば、波長成分毎に求めた仮想の強度スペクトルと出力強度スペクトルとの差分値の平均や標準偏差、最小二乗値などが用いられ得る。この合致度合いが所定の閾値以下であるか否かによって、合致度合いを評価する。合致度合いが不十分であると判断された場合には、仮想の位相スペクトルを焼きなまし法や遺伝的アルゴリズムに従って変化させて再び仮想の強度

スペクトルを作成し、出力強度スペクトルとの合致度合いを評価する。以上の処理を、合致度合いが十分であると評価されるまで繰り返す。

[0041] 上述した処理では、仮想の位相スペクトルの初期設定が重要である。初期設定が実際の位相スペクトルとかけ離れたものであると、合致度合いが十分であると評価されるまでに長時間を要する場合や、或いは、合致度合いが不十分なスペクトルに収束してしまい本来の位相スペクトルが得られない場合がある。特に、パルス光 P 3 の時間波形が、2つの超短パルス波形を含むダブルパルス波形や対称性の低い波形である場合、上記の問題が生じやすい。そこで、本実施形態の位相スペクトル決定部 14 e では、波形制御部 12 の空間光変調器 124 に与えられる位相変調用ホログラムを作成する基となった、パルス光 P 3 の時間波形を制御するための制御位相スペクトルを例えば初期値として用い、制御位相スペクトルを変形させることによって仮想の位相スペクトルを設定する。このように、制御位相スペクトルに基づいて仮想の位相スペクトルを設定し、焼きなまし法等を用いて位相スペクトル形状を変化させることにより、短時間でかつ正確に本来の位相スペクトルを決定することができる。

[0042] 図 13 は、本実施形態の波形計測部 14 の動作を示すフローチャートである。図 13 を参照しながら、波形計測部 14 の動作及び本実施形態の波形計測方法について説明する。パルス光 P 3 が波形計測部 14 に入力された状態において、まず、入力スペクトル取得部 14 b においてパルス光 P 3 の入力強度スペクトルが取得される（ステップ S 11）。前述したように、入力強度スペクトルが既知である場合には、このステップ S 11 は、入力スペクトル取得部 14 b が計算機 14 g の記憶媒体に記憶されている入力強度スペクトルを読み出すことで実現され得る。次に、出力スペクトル取得部 14 d において光 P 4 の出力強度スペクトルが取得される（ステップ S 12）。そして、位相スペクトル決定部 14 e において、制御部 13 から制御位相スペクトルが取得される（ステップ S 13）。続いて、仮想の位相スペクトルに基づく仮想の強度スペクトルが算出される（ステップ S 14）。仮想の強度ス

ペクトルを最初に算出するときには、仮想の位相スペクトルとして、例えばステップS 1 3において取得された制御位相スペクトルが用いられる。

[0043] 続いて、ステップS 1 4において算出された仮想の強度スペクトルと、ステップS 1 2において取得された出力強度スペクトルとが比較され、それらの合致度合いが求められる（ステップS 1 5）。そして、ステップS 1 5における合致度合いが十分か（所定の条件を満たしているか）否かが判定される（ステップS 1 6）。判定の結果、合致度合いが不十分な場合には、上述したステップS 1 4、S 1 5が再び行われる。合致度合いが十分な場合には、そのときの仮想の位相スペクトルが入力位相スペクトルとして決定される（ステップS 1 7）。その後、ステップS 1 7において決定された入力位相スペクトルと、ステップS 1 1において取得された入力強度スペクトルとに基づいて、パルス光P 3の時間波形が算出される（ステップS 1 8）。

[0044] ここで、パルス光P 3の時間波形を所望の波形とすることを意図した制御位相スペクトルと、パルス光P 3の実際の位相スペクトルとが互いに合致していない場合、パルス光P 3の位相スペクトルの時間波形が所望の波形に近づくように、制御位相スペクトルを補正することができる。本実施形態では、制御部1 3の変調補正部1 3 cが、波形計測部1 4において計測された位相スペクトルに基づいて、制御位相スペクトルを補正する。そして、CGH作成部1 3 bは、補正後の制御位相スペクトルに基づいて位相変調用ホログラムを作成し、波形制御部1 2は、新たな位相変調用ホログラムに基づいてパルス光P 3を生成する。上記の動作を繰り返すことによって、パルス光P 3の時間波形を所望の波形に更に近づけることが可能となる。

[0045] 波形計測部1 4における計測結果を用いてパルス光P 3の時間波形を制御する方法について、詳細に説明する。パルス光P 3の時間波形の制御は、パルス光P 3の位相スペクトルを制御することによって行われる。ここで、所望の時間波形に対応する位相スペクトルを $\phi_{\text{target}}(\lambda)$ 、波形制御部1 2に入力される位相スペクトルを $\phi^{(k)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ 、波形計測部1 4によって計測された位相スペクトルを $\phi^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ とする。但し、 λ は波長であり、 k は繰り返し

返し処理の序数である。パルス光 P 3 の時間波形の制御は、以下の手順（１）～（５）に従って行われる。

（１）波形計測部 １４によってパルス光 P 3 の位相スペクトルを計測し、 $\phi_{\text{measure}}^{(1)}(\lambda)$ を得る。

（２） $\phi_{\text{shaper}}^{(1)}(\lambda) = \phi_{\text{target}}(\lambda) - \phi_{\text{measure}}^{(1)}(\lambda)$ として、波形制御部 １２による波形制御を行う。

（３）波形計測部 １４によってパルス光 P 3 の位相スペクトルを再び計測し、 $\phi_{\text{measure}}^{(2)}(\lambda)$ を得る。

（４） $\phi_{\text{shaper}}^{(2)}(\lambda) = \phi_{\text{target}}(\lambda) - \phi_{\text{measure}}^{(2)}(\lambda) + \phi_{\text{shaper}}^{(1)}(\lambda)$ として、波形制御部 １２による波形制御を行う。

（５） $\phi_{\text{target}}(\lambda) - \phi_{\text{measure}}^{(k)}(\lambda)$ が許容可能な値になるまで、上記手順（３）及び（４）を繰り返し行う。

上記の手順（１）～（５）によって、波形計測部 １４による計測結果に基づく時間波形のフィードバック制御が行われ得る。

[0046] 以上に説明した本実施形態の波形計測装置（波形計測部 １４）及びパルス光生成装置 １Ａによって得られる効果を纏めると、次のようになる。すなわち、本実施形態の波形計測部 １４及びパルス光生成装置 １Ａによれば、時間波形の直接的な計測が困難なパルス光 P 3 の強度スペクトル及び位相スペクトルを個別に求め、これらに基づいてパルス光 P 3 の時間波形を算出することができる。更に、波形計測部 １４では、位相スペクトル決定部 １４e が、制御位相スペクトルを変形させることにより仮想の位相スペクトルを設定する。パルス光 P 3 の時間波形を形成する位相スペクトルは、制御位相スペクトルによる影響を主に受けている。故に、該位相スペクトルは、制御位相スペクトルから大きくは変化しないことが多い。従って、制御位相スペクトルに基づいて仮想の位相スペクトルを設定することにより、位相スペクトル決定部 １４e における計算量を低減して、位相スペクトルの計測に要する時間を短縮することができる。

[0047] また、本実施形態のように、位相スペクトル決定部 １４e は、入力強度ス

ペクトル及び仮想の位相スペクトルを有するパルス光 P 3 が光伝播素子 1 4 c に入力されたと仮定したときに算出される出力強度スペクトルが、出力スペクトル取得部 1 4 d において取得された出力強度スペクトルに近づくように、仮想の位相スペクトルを最適化する演算を行い、該演算における仮想の位相スペクトルの初期値として制御位相スペクトルを用いてもよい。これにより、実際の位相スペクトルに近い仮想の位相スペクトルを、正確に且つ短時間で求めることができる。

[0048] (第 1 の変形例)

上記実施形態に係る波形計測装置及びパルス光生成装置 1 A に関する第 1 変形例について説明する。図 1 4 は、本変形例に係る波形計測部 2 4 の構成を概念的に示す図である。上記実施形態の波形計測部 1 4 は、いわゆる C E S D R 計測法に従ってパルス光 P 3 の時間波形を計測するが、本変形例の波形計測部 2 4 は、周波数分解光ゲート法 (F R O G ; FrequencyResolved Optical Gating) を用いてパルス光 P 3 の時間波形を計測する。上記実施形態のパルス光生成装置 1 A は、波形計測部 1 4 に代えて、本変形例の波形計測部 2 4 を備えてもよい。

[0049] 波形計測部 2 4 は、次のようにしてパルス光 P 3 の時間波形情報を取得する。すなわち、波形計測部 2 4 は、非線形光学効果を有する光学素子を用いて、パルス光 P 3 の時間分割された一部分にゲートをかけて該一部分を切り出す。そして、波形計測部 2 4 は、その一部分の強度スペクトルを計測することによって得られるスペクトログラム (パルス光の各時間における強度スペクトル波形が、時間軸及び波長軸によって表された波形) について実測値と計算値とを比較し、或るスペクトログラムを生じさせる時間波形は限定されるという特徴を利用して、パルス光 P 3 の時間波形の再構成を行う。なお、図 1 5 は、スペクトログラムの一例である。

[0050] 具体的には、波形計測部 2 4 は、フレッチャーリーブス法やポーラビーア法などの最適化アルゴリズムに従ってシミュレーションにより計算されるスペクトログラムの計算値が実測値に近づくように、仮想の時間波形を変化さ

せる。この変化は、スペクトログラムの計算値と実測値との合致度合いが十分であると評価されるまで繰り返される。このような処理によって、実測のスペクトログラムに十分に近い仮想の時間波形が決定され、該仮想の時間波形がパルス光 P 3 の時間波形として認識される。そして時間一周波数変換によってパルス光 P 3 の位相スペクトルが求められる。図 14 に示されるように、波形計測部 24 は、ビームスプリッタ 24 a、ディレイライン 24 b、非線形光学素子 24 c、スペクトル検出器 24 d、及び計算機 24 e を有する。ビームスプリッタ 24 a は、パルス光 P 3 を二つのパルス光 P 3 a、P 3 b に分岐する。ディレイライン 24 b は、分岐された二つのパルス光 P 3 a、P 3 b のうち一方に対し、時間遅延を与える。このように、分岐された二つのパルス光 P 3 a、P 3 b のうち何れか一方に時間遅延を与えることにより、パルス光 P 3 a、P 3 b が互いに重なり合う時間を変化させて、ゲートをかける時間を操作することができる。この後、パルス光 P 3 a、P 3 b は、レンズ 24 f を通過し、非線形光学素子 24 c において互いに重なり合う。

[0051] 非線形光学素子 24 c は、パルス光 P 3 a、P 3 b の非線形光学効果を誘起する。ここで、F R O G に利用される非線形光学効果は、二次の非線形光学効果である第二高調波発生や、三次の非線形光学効果である第三高調波発生、或いは光カー効果などである。また、非線形光学素子 24 c を構成する非線形光学材料としては、例えば、S H G 結晶、T H G 結晶、ガラスなどが用いられ得る。

[0052] スペクトル検出器 24 d は、非線形光学素子 24 c から出力された光の強度スペクトルを計測する。スペクトル検出器 24 d は、例えば、グレーティングやプリズムなどの分光素子と、該分光素子によって分光された各波長成分の強度を検出するラインセンサとによって構成される。

[0053] 計算機 24 e は、例えば、C P U 及び記憶媒体を備えるコンピュータによって構成される。計算機 24 e は、パルス光 P 3 のスペクトログラムであるスペクトログラムと、パルス光 P 3 の仮想のスペクトログラムである仮想ス

ペクトログラムとに基づいて、パルス光 P 3 の時間波形を決定する。

[0054] 波形計測部（波形計測装置）は、上記実施形態に限られず、例えば本変形例の波形計測部 2 4 の構成を備えてもよい。このような場合であっても、計算機 2 4 e における初期値に、制御位相スペクトル及び入力強度スペクトルに基づく周波数－時間変換により算出した時間波形を用いることにより、上記実施形態と同様の効果を奏することができる。

[0055] （第 2 の変形例）

続いて、上記実施形態の波形計測部 1 4 における計測結果を用いてパルス光 P 3 の時間波形を制御する方法の別の例について説明する。上記実施形態では、波形制御部 1 2 に入力される位相スペクトル $\phi^{(k)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を位相スペクトル $\phi_{\text{target}}(\lambda)$ に近づけるために、波形計測部 1 4 により計測される位相スペクトル $\phi^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ を利用している。このような場合、計測されるスペクトル強度 $I^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ が、位相スペクトル $\phi_{\text{target}}(\lambda)$ に対応するスペクトル強度 $I_{\text{target}}(\lambda)$ と等しい場合には、最終的に $I^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ と $\phi^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ とを利用して、所望の波形を設計することができる。しかし、 $I^{(k)}_{\text{measure}}(\lambda)$ と $I_{\text{target}}(\lambda)$ とにずれが生じる場合には、パルス光 P 3 の時間波形は所望の波形から変化してしまう。

[0056] そこで、本変形例では、まず、波形制御部 1 2 に入力される位相スペクトルであって所望の時間波形の振幅 $A^{(1)}_{\text{target}}(t)$ を実現するための位相スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を求める。位相スペクトル $\phi^{(k)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ の求め方としては、例えば、GS 法、Fineup が提案した input-output、input-input 法などの反復フーリエ変換法に基づいた方法や、ORA、SA、GA などの 1 画素ずつ位相を変化させて所望の波形を設計する方法などが挙げられる。このとき、予め計測された入力光のスペクトル強度 $I^{(1)}_{\text{measure}}(\lambda)$ を位相スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ の設計に用いてもよい。

[0057] 次に、求められた位相スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を空間光変調器 1 2 4 に入力し、入力光 P 1 の変調を行う。変調後のパルス光 P 3 を計測し、位相スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{measure}}(\lambda)$ または、時間波形 $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ の振幅を求める。位相

スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{measure}}(\lambda)$ を計測した場合には、スペクトル強度 $I^{(1)}_{\text{measure}}(\lambda)$ を用いて時間波形 $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ を導出する。次に $A^{(1)}_{\text{target}}(t)$ と $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ と比較し、 $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ が所望の結果であるかを調べる。所定の範囲内にない場合は、 $A^{(2)}_{\text{target}}(t)$ を新たに作成し、波形制御部 12 に入力される位相スペクトル $\phi^{(2)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を求める。具体的には、 $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ が $A^{(1)}_{\text{target}}(t)$ より大きな部分は $A^{(2)}_{\text{measure}}(t)$ の計測の際に小さくなるように、 $A^{(1)}_{\text{measure}}(t)$ が $A^{(1)}_{\text{target}}(t)$ より小さくなる部分は $A^{(2)}_{\text{measure}}(t)$ の計測の際に大きくなるように、ウェイト w を用いて $A^{(1)}_{\text{target}}(t)$ を変更する。具体的には次式 (1) 及び (2) のようになる。

$$A^{(k+1)}_{\text{target}}(t) = w \times A^{(k)}_{\text{target}}(t) \quad \cdots (1)$$

$$w^{(k)} = A^{(k)}_{\text{target}}(t) / A^{(k)}_{\text{measure}}(t) \quad \cdots (2)$$

上式によって、時間波形の振幅 $A^{(2)}_{\text{target}}(t)$ を導出した後、波形制御部 12 に入力される位相スペクトル $\phi^{(2)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を求める。このとき、位相スペクトル $\phi^{(2)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ の設計に、前回用いた位相スペクトル $\phi^{(1)}_{\text{shaper}}(\lambda)$ を初期位相として用いてもよい。上述の処理を繰り返すことによって、光学系の影響を考慮した所望の位相パターンを設計できる。

[0058] 本発明の一側面による波形計測装置およびパルス光生成装置は、上述した実施形態に限られるものではなく、他に様々な変形が可能である。例えば、上記実施形態及び変形例では、パルス光の時間波形を計測する方式として C E S D R 及び F R O G を例示したが、本発明の一側面は、これらに限らず様々な計測方式に適用することが可能である。

産業上の利用可能性

[0059] 本発明の一側面によれば、正確に且つ短時間で位相スペクトルの計測が可能な波形計測装置およびパルス光生成装置を提供することができる。

符号の説明

[0060] 1 A …パルス光生成装置、11 …光出力部、12 …波形制御部、13 …制御部、13a …動作制御部、13b …C G H 作成部、13c …変調補正部、14 …波形計測部、14a …光強度制御器、14b …入力スペクトル取得部

、 1 4 c …光伝播素子、 1 4 d …出力スペクトル取得部、 1 4 e …位相スペクトル決定部、 1 4 f …波形算出部、 1 4 g …計算機、 1 4 h …表示部、 1 4 j …集光レンズ、 1 2 1 …ビームスプリッタ、 1 2 2 …分光素子、 1 2 3 …結像レンズ、 1 2 4 …空間光変調器、 L 1 …光軸、 P 1 …入力光、 P 2 …ビート光、 P 3 …パルス光、 $P \lambda_1 \sim P \lambda_n$ …波長成分。

請求の範囲

[請求項1]

パルス光の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用ホログラムが呈示された空間光変調器において2以上の波長成分を含む入力光の位相が波長毎に変調されることにより得られる前記パルス光の時間波形を計測する波形計測装置であって、

前記パルス光の強度スペクトルである入力強度スペクトルを取得する入力スペクトル取得部と、

前記パルス光を入力し、前記パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光を出力する光学素子と、

前記光学素子から出力された光の強度スペクトルである出力強度スペクトルを取得する出力スペクトル取得部と、

前記入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有する前記パルス光が前記光学素子に入力されたと仮定したときに算出される前記出力強度スペクトルと、前記出力スペクトル取得部において取得された前記出力強度スペクトルとを比較して、前記パルス光の位相スペクトルを決定する位相スペクトル決定部と、

周波数－時間変換により、前記位相スペクトル決定部において決定された位相スペクトルと前記入力強度スペクトルとに基づいて、前記パルス光の時間波形を算出する波形算出部とを備え、

前記位相スペクトル決定部は、前記制御位相スペクトルを変形させて、前記仮想の位相スペクトルを設定する、波形計測装置。

[請求項2]

前記位相スペクトル決定部は、前記入力強度スペクトル及び前記仮想の位相スペクトルを有する前記パルス光が前記光学素子に入力されたと仮定したときに算出される前記出力強度スペクトルが、前記出力スペクトル取得部において取得された前記出力強度スペクトルに近づくように、前記仮想の位相スペクトルを最適化する演算を行い、該演算における前記仮想の位相スペクトルの初期値として前記制御位相スペクトルを用いる、請求項1に記載の波形計測装置。

[請求項3]

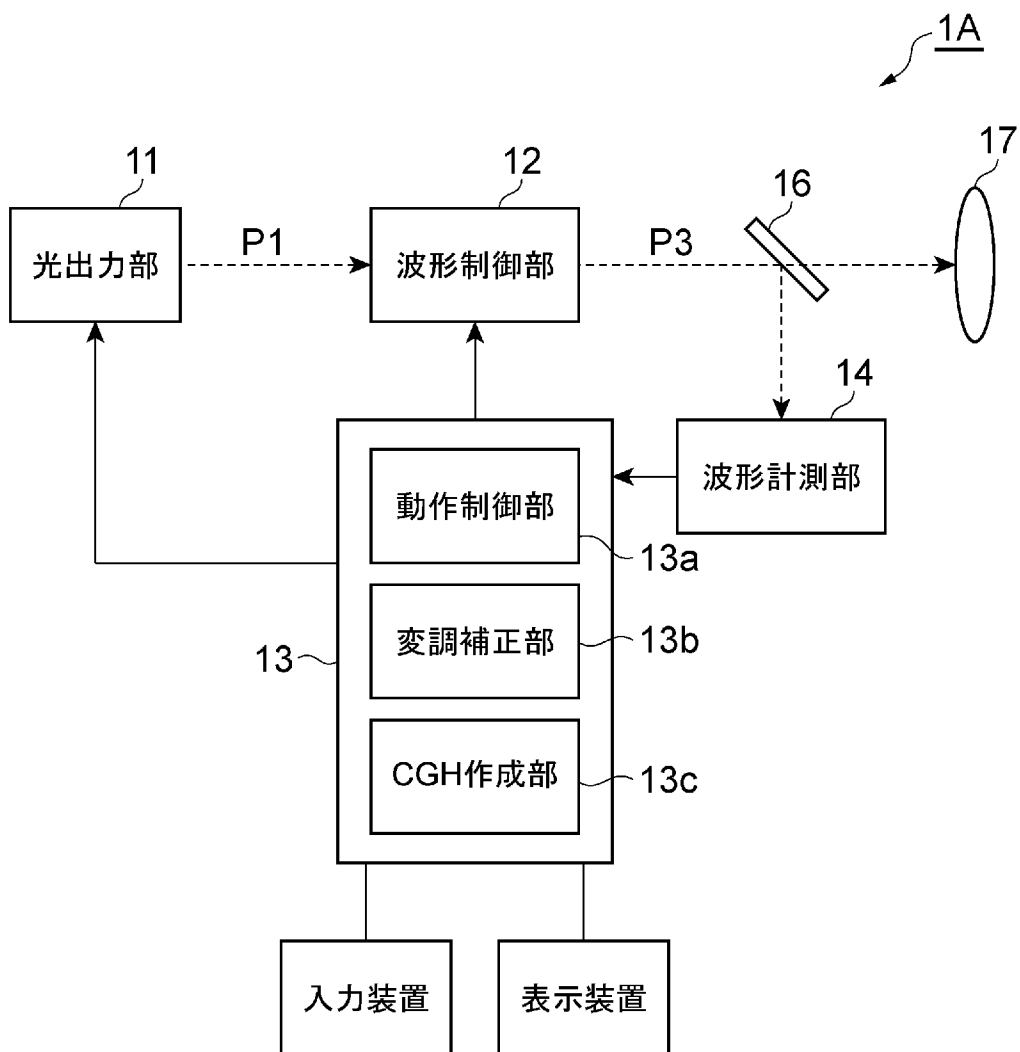
2以上の波長成分を含む入力光を生成する光出力部と、
パルス光の時間波形を制御するための制御位相スペクトルに基づく位相変調用ホログラムが呈示され、前記パルス光を生成するために前記入力光の位相を波長毎に変調する空間光変調器と、
前記位相変調用ホログラムを前記空間光変調器に与える制御部と、
前記パルス光の時間波形を計測する波形計測部とを備え、
前記制御部は、前記波形計測部における計測結果に基づいて、前記パルス光の時間波形が所望の波形に近づくように前記位相変調用ホログラムを調整し、
前記波形計測部は、
前記パルス光の強度スペクトルである入力強度スペクトルを取得する入力スペクトル取得部と、
前記パルス光を入力し、前記パルス光の位相スペクトルに対応する強度スペクトルを有する光を出力する光学素子と、
前記光学素子から出力された光の強度スペクトルである出力強度スペクトルを取得する出力スペクトル取得部と、
前記入力強度スペクトル及び仮想の位相スペクトルを有する前記パルス光が前記光学素子に入力されたと仮定したときに算出される前記出力強度スペクトルと、前記出力スペクトル取得部において取得された前記出力強度スペクトルとを比較して、前記パルス光の位相スペクトルを決定する位相スペクトル決定部と、
周波数－時間変換により、前記位相スペクトル決定部において決定された位相スペクトルと前記入力強度スペクトルとに基づいて、前記パルス光の時間波形を算出する波形算出部とを有し、
前記位相スペクトル決定部は、前記制御位相スペクトルを変形させて、前記仮想の位相スペクトルを設定する、パルス光生成装置。

[請求項4]

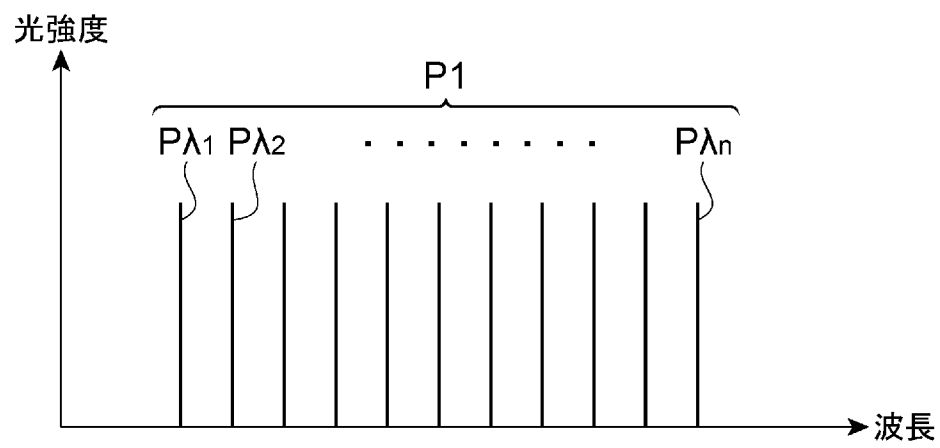
前記位相スペクトル決定部は、前記入力強度スペクトル及び前記仮想の位相スペクトルを有する前記パルス光が前記光学素子に入力され

たと仮定したときに算出される前記出力強度スペクトルが、前記出力スペクトル取得部において取得された前記出力強度スペクトルに近づくように、前記仮想の位相スペクトルを最適化する演算を行い、該演算における前記仮想の位相スペクトルの初期値として前記制御位相スペクトルを用いる、請求項 3 に記載のパルス光生成装置。

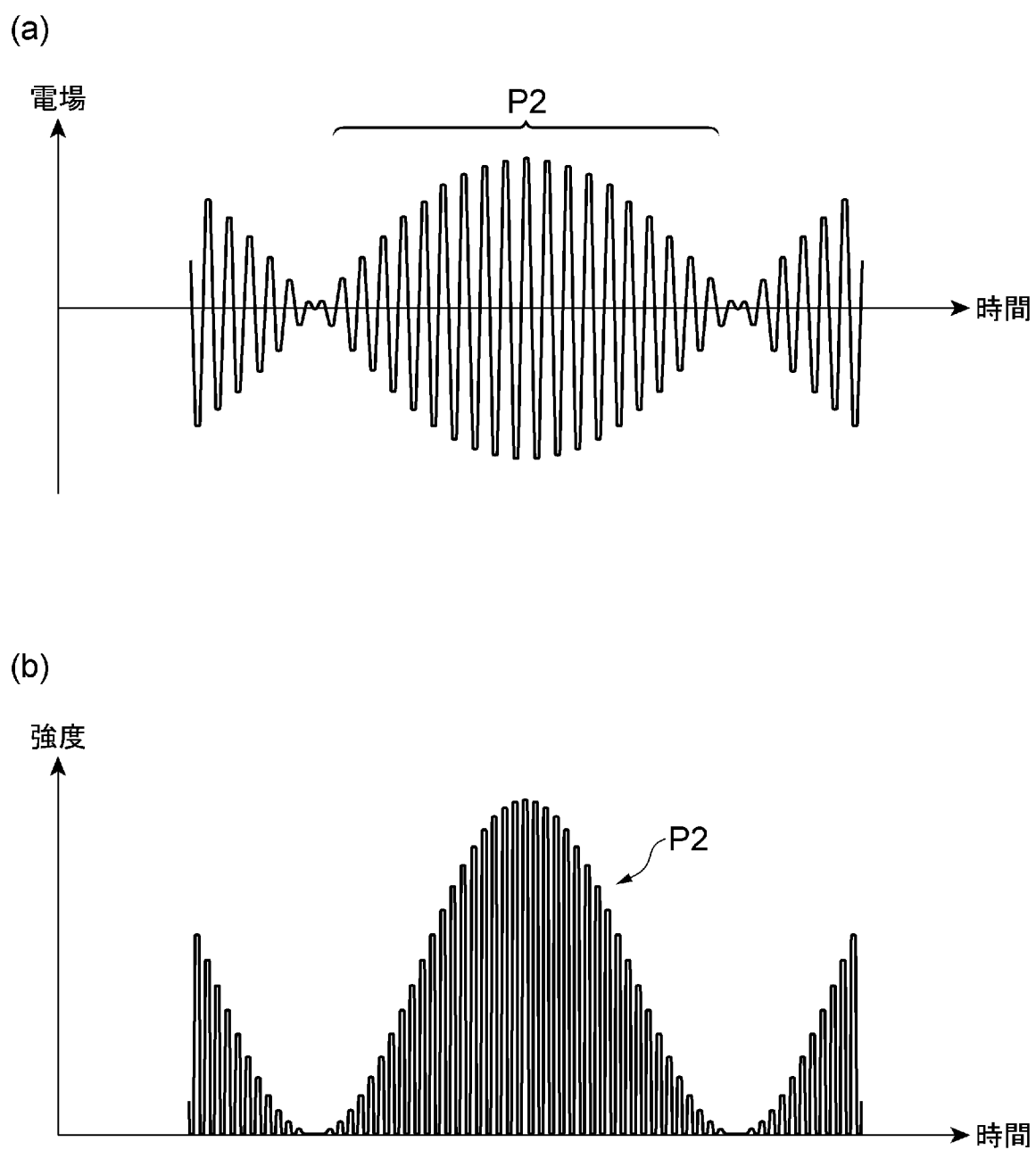
[図1]



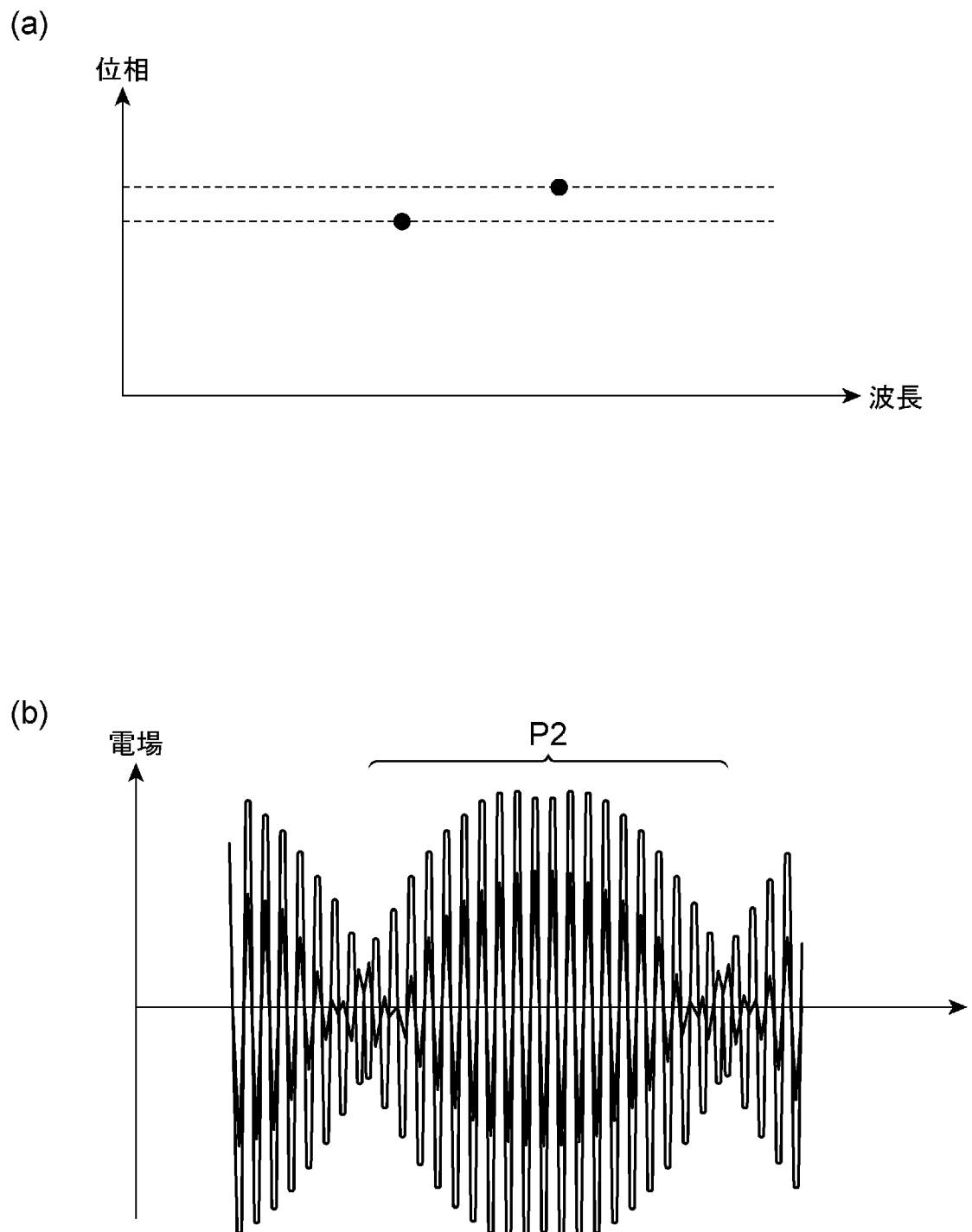
[図2]



[図3]

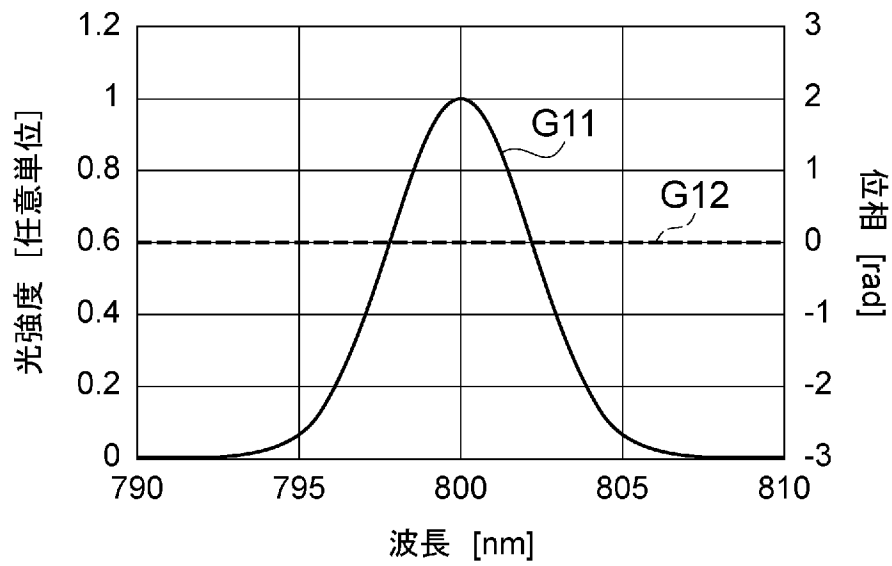


[図4]

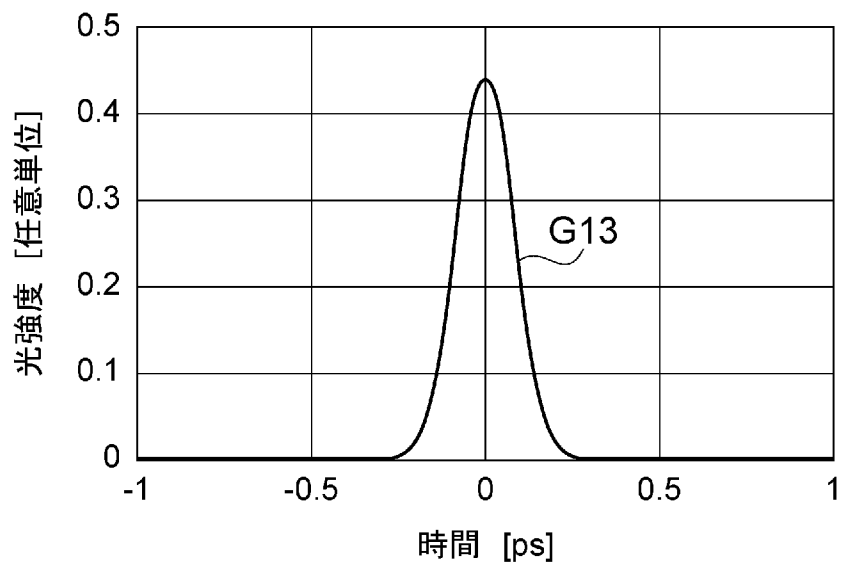


[図5]

(a)

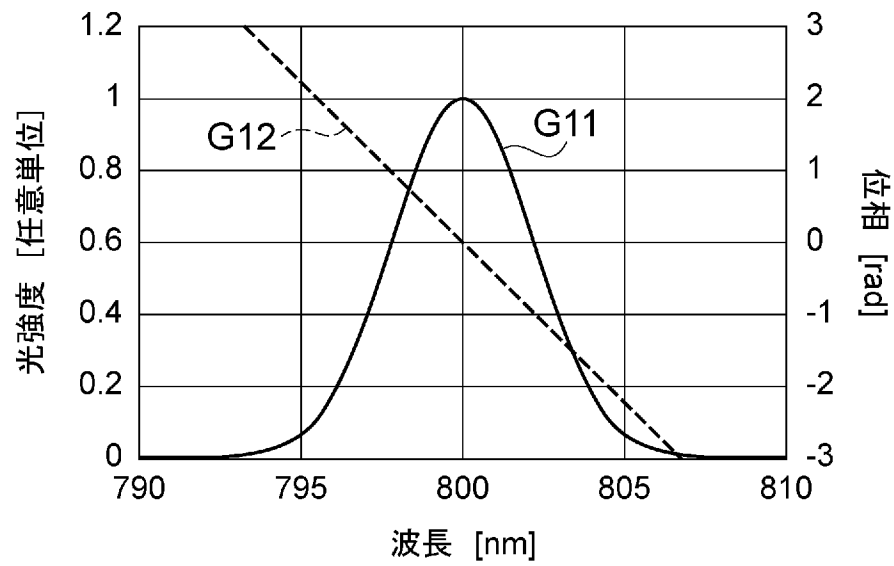


(b)

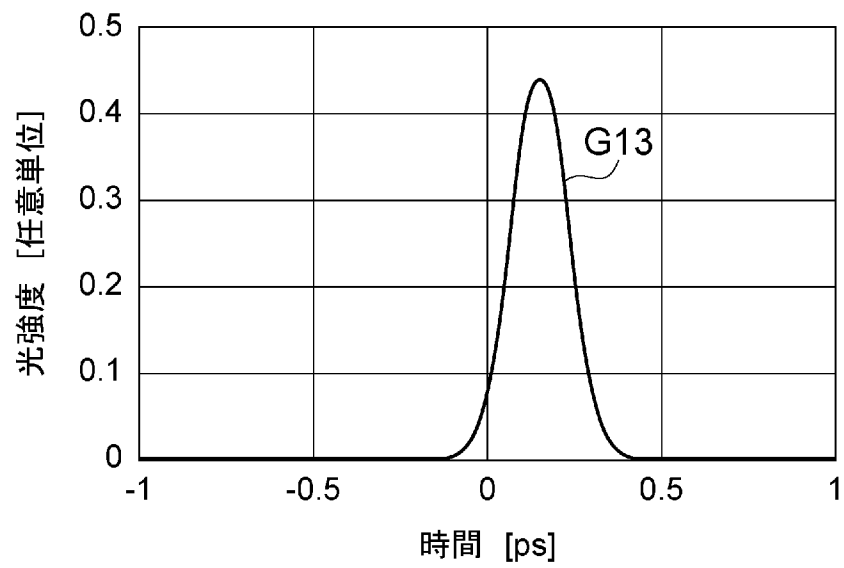


[図6]

(a)

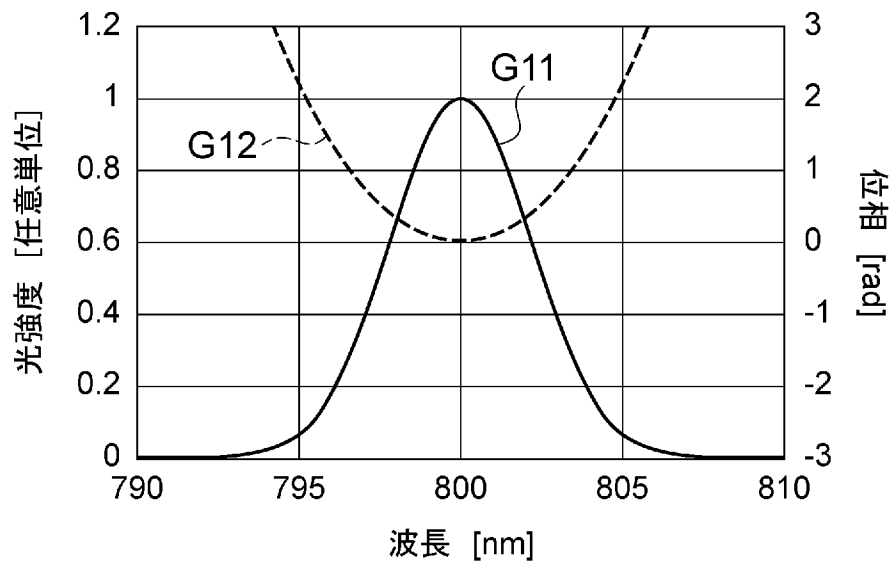


(b)

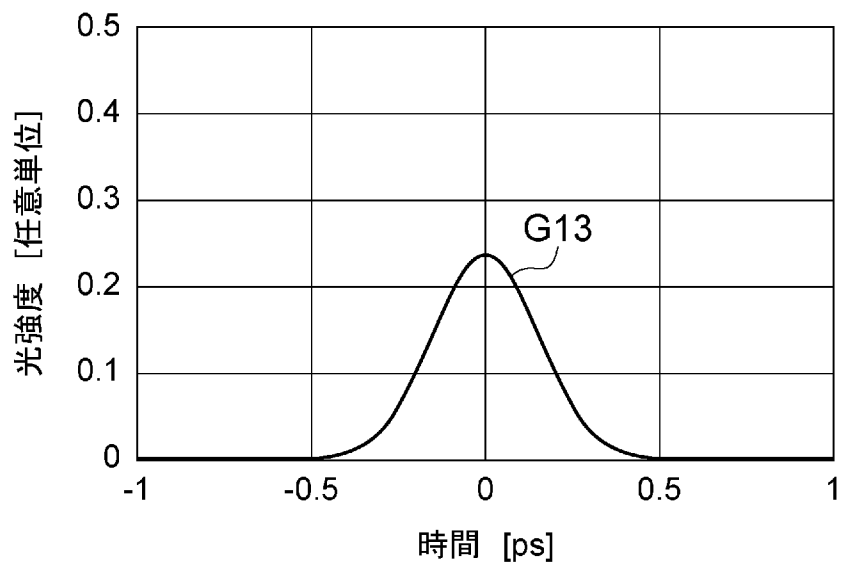


[図7]

(a)

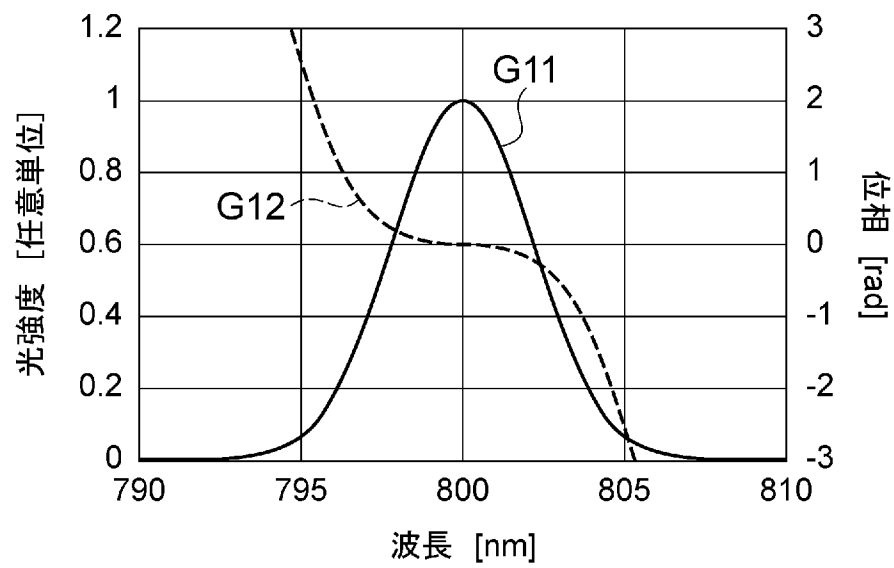


(b)

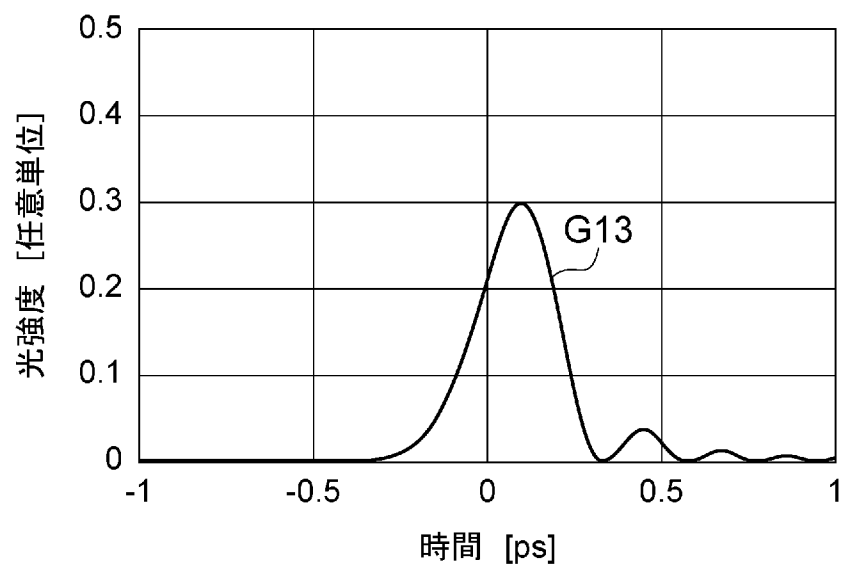


[図8]

(a)

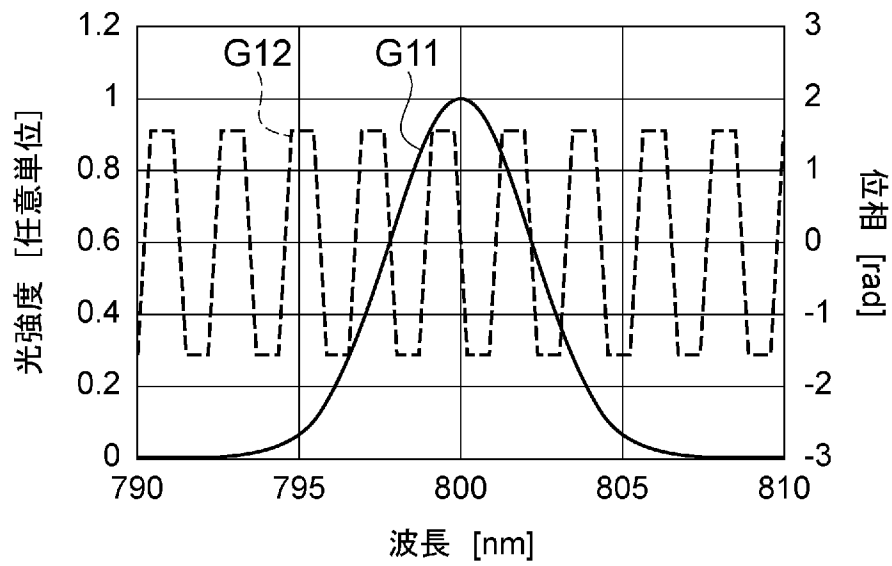


(b)

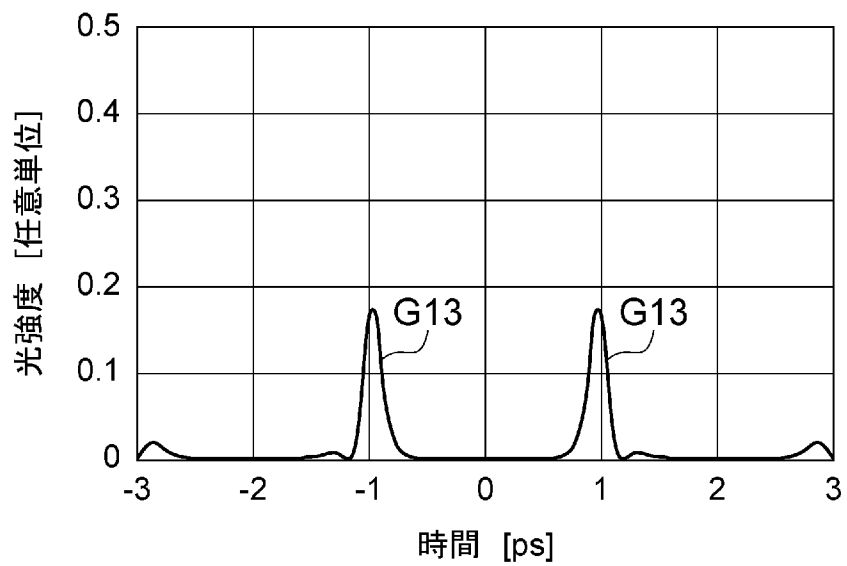


[図9]

(a)

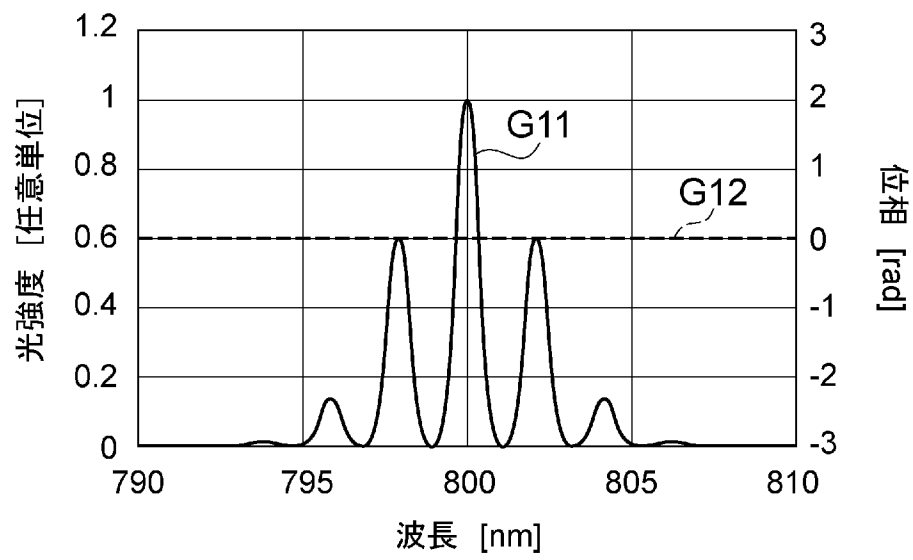


(b)

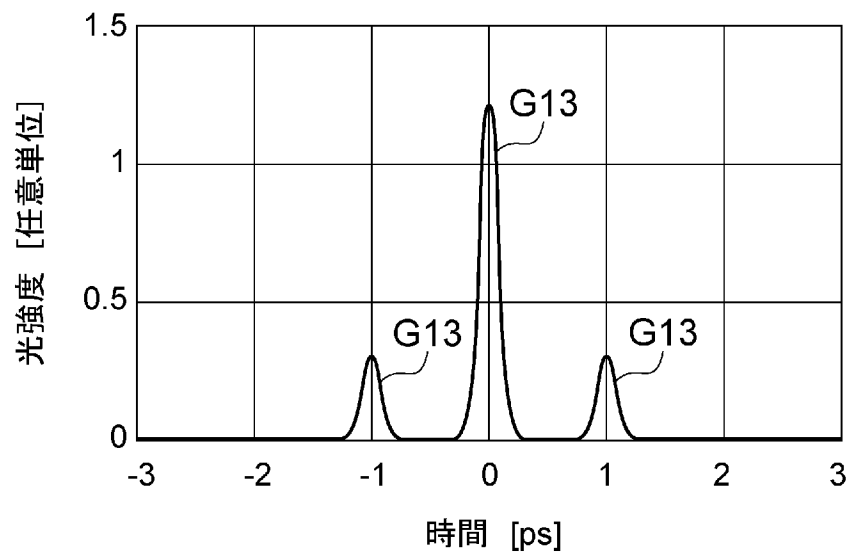


[図10]

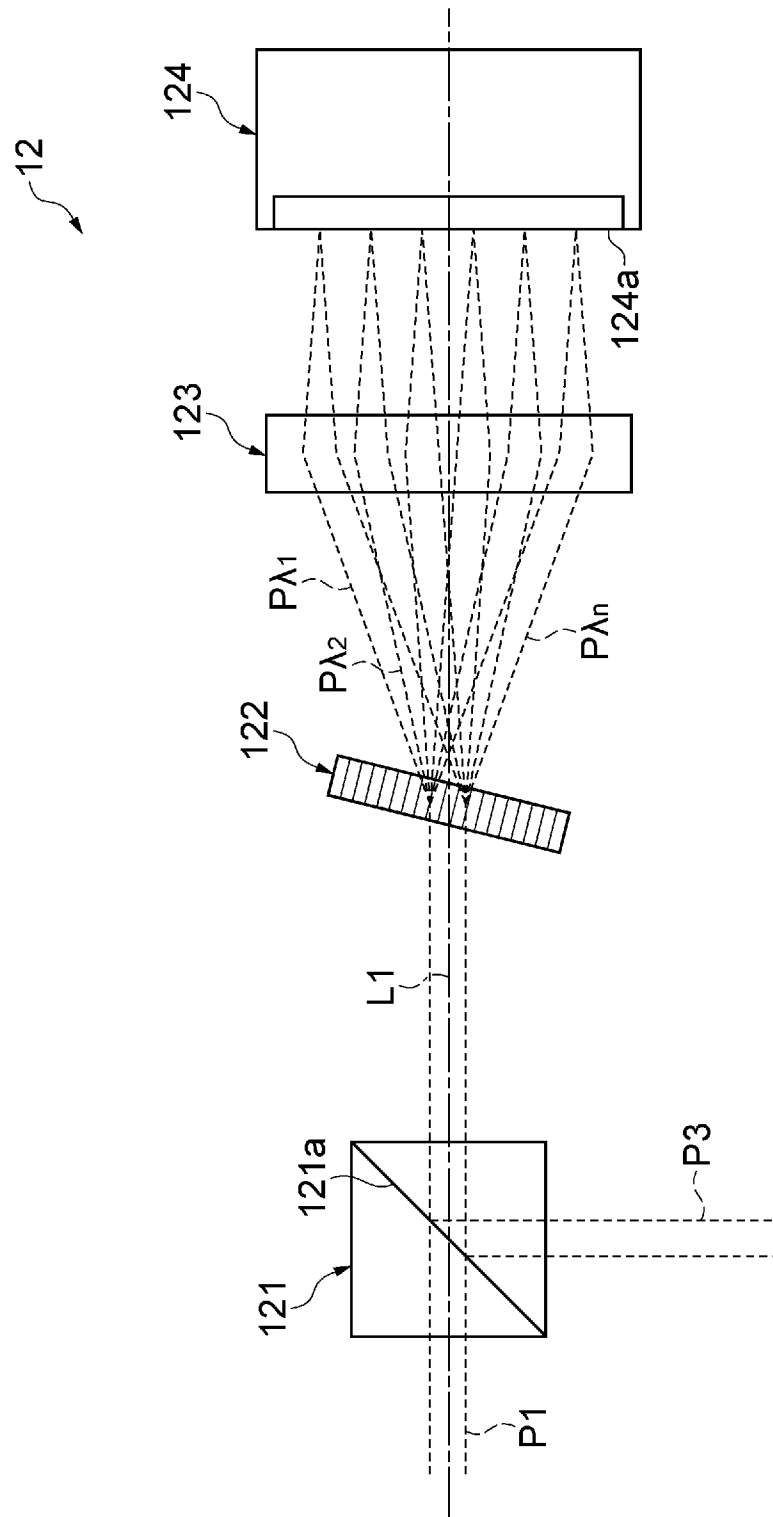
(a)



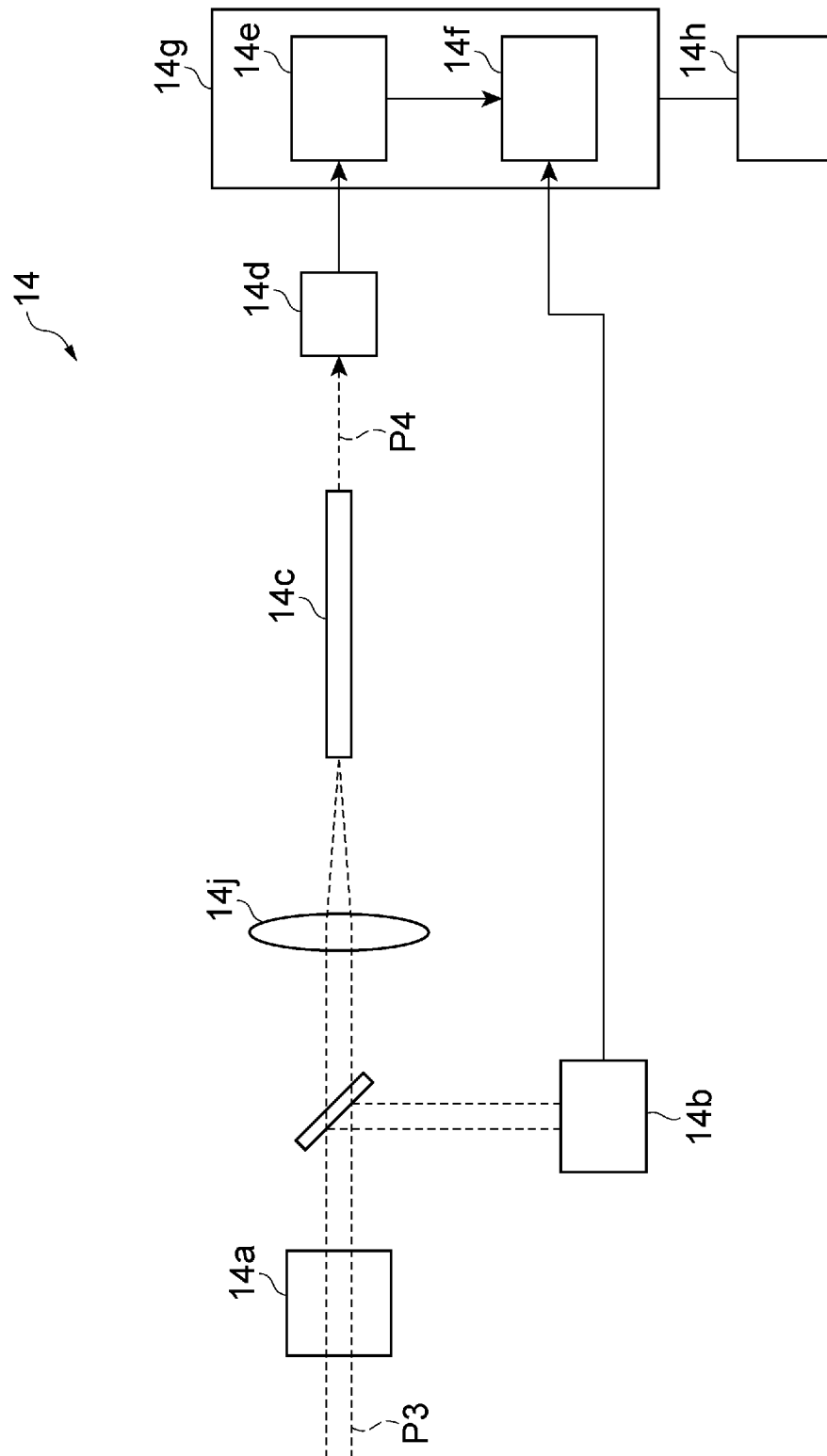
(b)



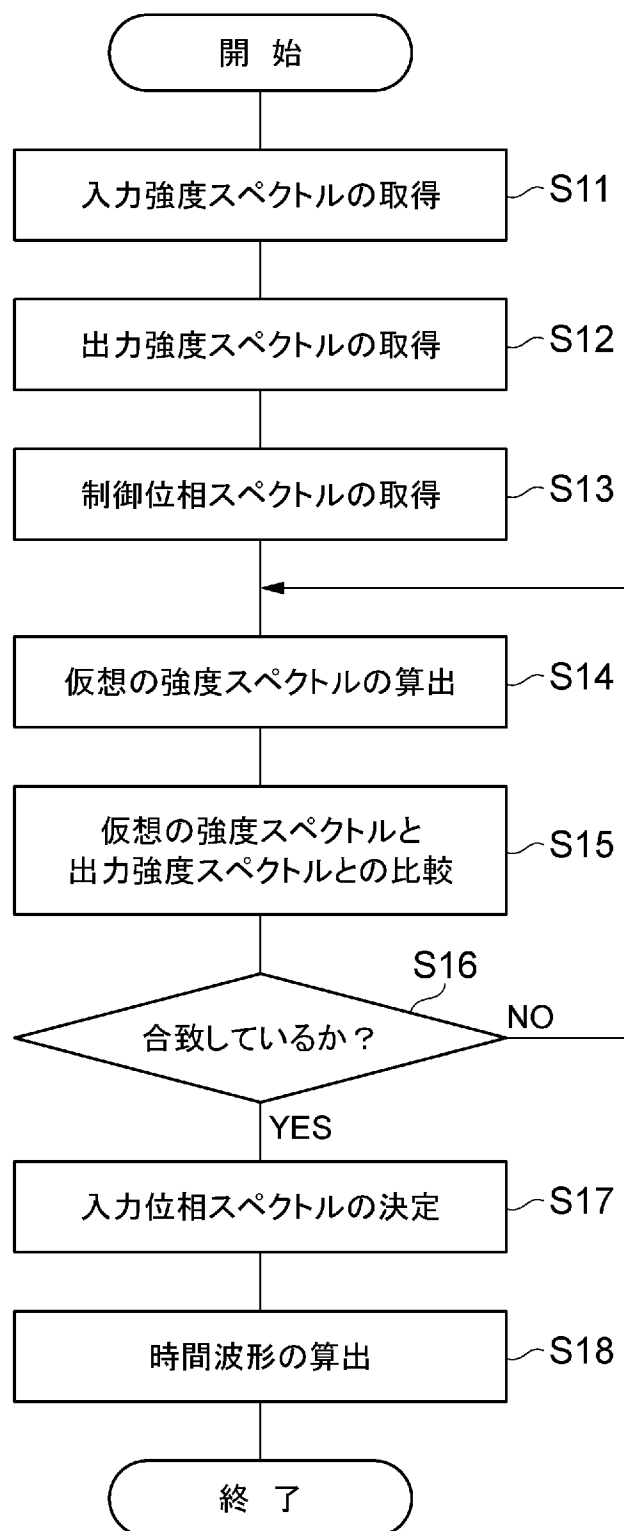
[図11]



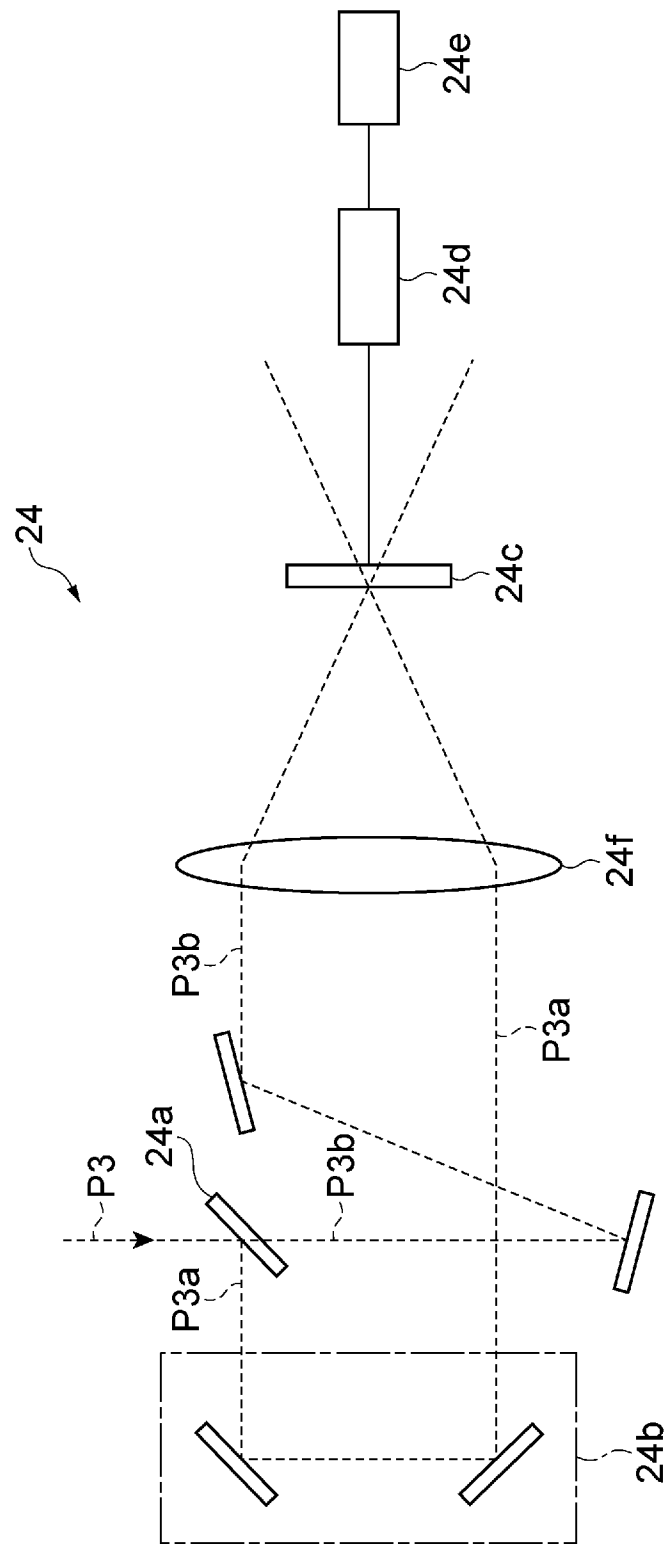
[図12]



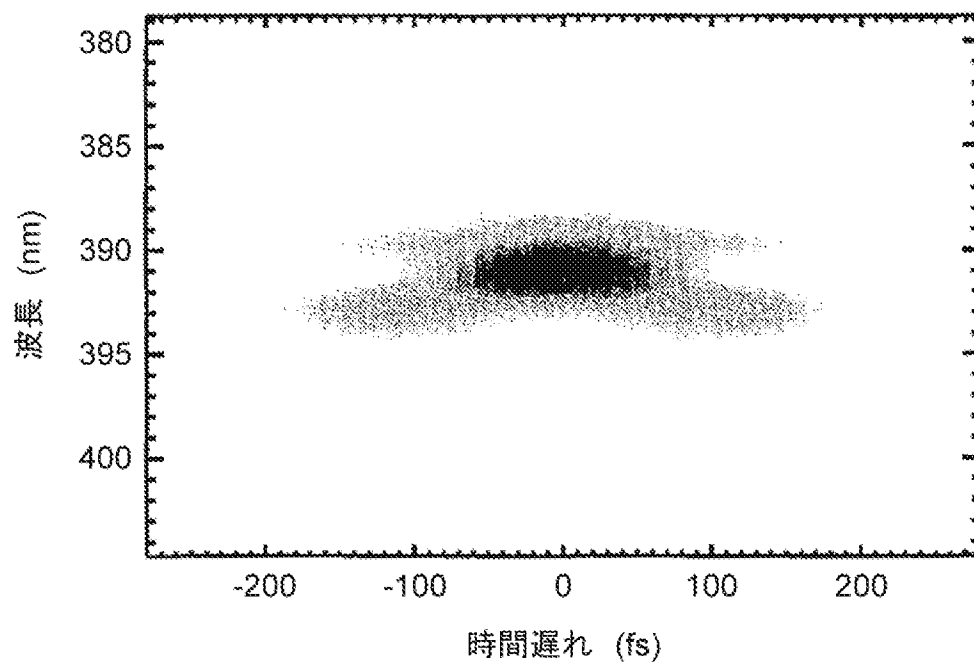
[図13]



[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/061006

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01J11/00(2006.01)i, G02F1/01(2006.01)n

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

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	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2013-170905 A (Osaka University), 02 September 2013 (02.09.2013), paragraphs [0035] to [0054], [0074], [0105]; fig. 1 to 3 & US 2015/0010303 A1 & EP 2818838 A & CN 104272072 A	1-4
A	JP 2010-204308 A (Osaka University), 16 September 2010 (16.09.2010), claim 1 & US 2011/0311223 A1	1-4
A	JP 2007-110089 A (Aisin Seiki Co., Ltd.), 26 April 2007 (26.04.2007), paragraphs [0026] to [0030] (Family: none)	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ 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
17 June 2015 (17.06.15)

Date of mailing of the international search report
30 June 2015 (30.06.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01J11/00(2006.01)i, G02F1/01(2006.01)n

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（I P C））

Int.Cl. G01J11/00

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

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2015年
日本国実用新案登録公報	1996-2015年
日本国登録実用新案公報	1994-2015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）

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
A	JP 2013-170905 A（国立大学法人大阪大学）2013.09.02, [0035]-[0054], [0074], [0105], 図 1-3 & US 2015/0010303 A1 & EP 2818838 A & CN 104272072 A	1-4
A	JP 2010-204308 A（国立大学法人大阪大学）2010.09.16, [請求項 1] & US 2011/0311223 A1	1-4
A	JP 2007-110089 A（アイシン精機株式会社）2007.04.26, [0026]-[0030]（ファミリーなし）	1-4

☐ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ 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

17.06.2015

国際調査報告の発送日

30.06.2015

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/J P）

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）

喜々津 徳胤

2W

4842

電話番号 03-3581-1101 内線 3250