

(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
2014年9月18日(18.09.2014)



(10) 国際公開番号

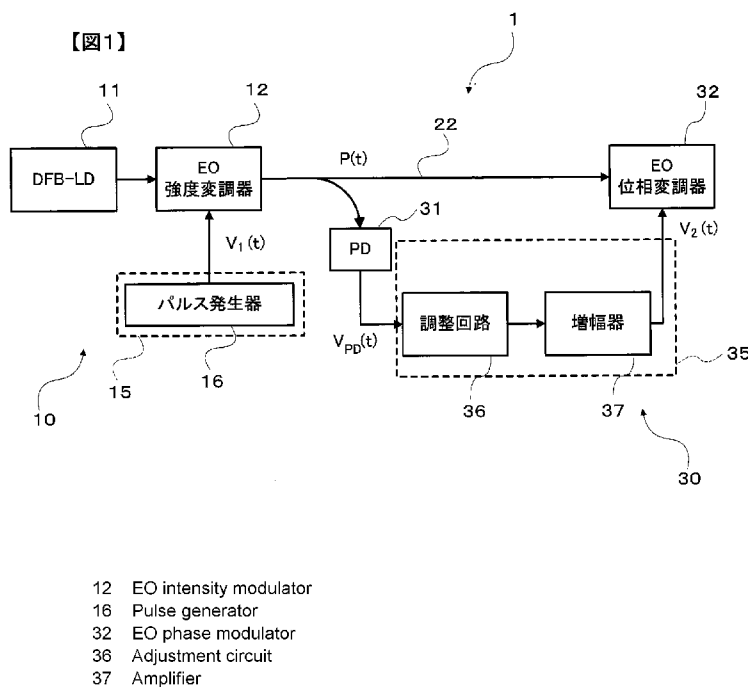
WO 2014/141973 A1

- (51) 国際特許分類:
G02F 1/01 (2006.01) H01S 3/10 (2006.01)
G02F 1/365 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/055663
- (22) 国際出願日: 2014年3月5日(05.03.2014)
- (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 2013-050235 2013年3月13日(13.03.2013) JP
- (71) 出願人: 株式会社ニコン(NIKON CORPORATION)
[JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目
1 2 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 徳久 章(TOKUHISA, Akira); 〒1008331
東京都千代田区有楽町一丁目 1 2 番 1 号 株式
会社ニコン内 Tokyo (JP). 稲葉 直人(INABA, Na-
oto); 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目 1 2
番 1 号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 永井 冬紀, 外(NAGAI, Fuyuki et al.); 〒
1000011 東京都千代田区内幸町 2 丁目 2 番 2 号
富国生命ビル 永井特許事務所 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, JP, KE, KG, 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, 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, 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

[続葉有]

(54) Title: PULSE LASER DEVICE

(54) 発明の名称: パルスレーザ装置



(57) Abstract: A pulse laser device comprises: a laser source for outputting a pulse beam; a phase modulator for changing the phase of the pulse beam output from the laser source; a beam detector for detecting a pulse beam output from the laser source and outputting a detection signal that is a time-based waveform of a change in intensity; and a phase modulator driving power source for outputting a drive signal generating a phase change in proportion to the time-based waveform of the change in intensity on the basis of the detection signal output from the beam detector, and driving the phase modulator.

(57) 要約: パルスレーザ装置は、パルス光を出力するレーザ光源と、レーザ光源から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器と、レーザ光源から出力されたパルス光を検出して強度変化の時間軸波形である検出信号を出力する光検出器と、光検出器から出力された検出信号に基づいて、強度変化の時間軸波形に比例した位相変化を生じさせる駆動信号を出力し、位相変調器を駆動する位相変調器駆動電源とを備える。

WO 2014/141973 A1



(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, 添付公開書類:
MR, NE, SN, TD, TG).

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：パルスレーザ装置

技術分野

[0001] 本発明は、レーザ光源から出力されたパルス光を、伝送用の光ファイバや増幅用の光ファイバ等に入射して出力させる使用形態のパルスレーザ装置に関する。

背景技術

[0002] 上記のようなパルスレーザ装置を有するレーザ装置は、半導体や液晶パネルの製造工程で用いられる露光装置や検査装置用の光源、顕微鏡や望遠鏡等のような観察装置の光源として好適に用いられる（例えば特許文献1を参照）。

[0003] このようなパルスレーザ装置では、レーザ光源から出射されたパルス光が伝送用の光ファイバにより伝送され、場合によっては、光ファイバ増幅器の増幅用光ファイバにより増幅される。増幅用光ファイバのコアは小径なため、高いピークパワーのパルス光を伝送あるいは増幅すると、非線形光学効果によって自己位相変調（SPM：Self Phase Modulation＝SPM）が発生する（例えば特許文献2を参照）。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2002-50815号公報

特許文献2：日本国特開2012-2965号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 自己位相変調（SPM）は、多くの場合、光ファイバ内を伝播するレーザ光のスペクトル幅を拡げるように作用するため、光ファイバから出射されるレーザ光（出力光）のスペクトル幅が、光ファイバに入射するレーザ光（入射光）のスペクトル幅よりも広くなるスペクトル拡がりが発生する。特に、

コア直径が数 μm ～十数 μm 程度の小径なシングルモードファイバでは、伝播するレーザ光のパワー密度が極めて高くなるため、自己位相変調によるスペクトル拡がりが大きくなる。スペクトル幅が広くなることは、単色性が高い狭帯域の光源が求められる際の障害となる。

[0006] 例えば、ピークパワー P が10kWのパルス光を、モードフィールド径が15 μm 、長さ L が1mの伝送用の光ファイバに入射して伝送させる場合、光ファイバから出射するパルス光は、 $\phi \doteq \gamma P L \doteq 7\text{ rad}$ の自己位相変調が発生する。ここで、 γ は非線形光学効果を表す量であり、 $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}$ で求められる。また、 n_2 は非線形屈折率であり、 $n_2 \doteq 3 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$ 、 A_{eff} は光ファイバの導波モードにおける実効断面積である。

[0007] 自己位相変調の発生により、仮に、光ファイバに入射する入射光がフーリエ限界のパルス光で狭帯域のスペクトルをもっていたとしても、光ファイバ伝播後には、出射光は ϕ 倍程度にスペクトルが拡大する。これは、狭帯域が要求される光源を実現する際の大きな障害となる。

[0008] 本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、狭帯域のパルス光を出力可能なパルスレーザ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

[0009] 上記課題を解決する手段のひとつとして、本願発明者らは図4に示すようなパルスレーザ装置9を考案した。このパルスレーザ装置9は、パルス光を出力するレーザ光源110と、レーザ光源110から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器132とを備える。レーザ光源110は、レーザ光を発生する光源111と、光源111により発生されたレーザ光の強度を変調してパルス光を出力する強度変調器112と、パルス発生器116を有し強度変調器112および位相変調器132を駆動する変調器駆動電源115とを備えて構成される。図4には、光源111の一例としてDFB半導体レーザ（DFB-LD：Distributed Feedback Laser Diode）、強度変調器112の一例として強度変調型の電気光学変調器（EOM：Electro Optic Modulator、以下EO強度変調器という）、位相変調器132の一例として

位相変調型の電気光学変調器（EOM、以下EO位相変調器という）を用いた構成を例示する。

- [0010] 本構成例において、光源111はCW（Continuous Wave）で発光させる。EO強度変調器112には、レーザ光源から出力すべきパルス光のパルスパターンに対応した波形の強度変調器駆動信号 $V_1(t)$ を変調器駆動電源115から与え、光源111から出力されたレーザ光の一部を切り出してパルス光を生成する。EO強度変調器112により生成されるパルス光の時間的な強度変化である時間軸波形 $P(t)$ は、EO強度変調器112の透過率と印加電圧の関係から次式で表わされる。式中の V_π はEO強度変調器112の半波長電圧である。

[数1]

$$P(t) \propto \sin^2(\pi V_1(t)/2V_\pi) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

- [0011] パルスレーザ装置9から出力されたパルス光を伝送しあるいは増幅する光ファイバについて、分散などに起因する時間軸波形の歪みがないと仮定すると、光ファイバ内で生じる自己位相変調（SPM）による位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ は時間軸波形 $P(t)$ に比例し、次式で表わされる。

[数2]

$$\phi_{\text{SPM}}(t) \propto P(t) \propto \sin^2(\pi V_1(t)/2V_\pi) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

- [0012] そこで、EO位相変調器132により予めパルス光に対して、光ファイバ内で生じるSPMによる位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ と逆の位相変調をすることによって、光ファイバ内で生じるSPMによる位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ を相殺し、光ファイバから狭帯域のパルス光を出力させることができる。あるいは、EO位相変調器132を光ファイバの出射端近傍に設け、光ファイバ内で生じるSPMによる位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ と逆の位相変調をすることによって、光ファイバ内で生じたSPMによる位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ を相殺し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。なお、逆の位相変調とは、光ファイバ内で生じるSPMによる位相変調と変調量が略同一で逆位相の位相変調をいう。

- [0013] EO位相変調器132により $\phi_{\text{SPM}}(t)$ と逆の位相変調をするためには、EO

位相変調器 1 3 2 を駆動する位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ は次式のようなになる。

[数3]

$$V_2(t) \propto P(t) \propto \sin^2(\pi V_1(t)/2V_\pi) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

[0014] このような構成により、伝送用あるいは増幅用の光ファイバ内で生じる自己位相変調によるスペクトル拡がりを抑制し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。このとき、変調器駆動電源のパルス発生器 1 1 6 からは、 $V_2(t)$ のような信号を発生させる必要があり、比較的複雑な電気回路を必要とする。また、この方法では、パルス光 $P(t)$ が外部から与えられるような場合、例えば、モードロックレーザや Q スイッチレーザから与えられるような場合に、位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を高い時間精度で入射パルスに同期させる必要があり、電気回路を含めた制御構成が一層複雑になるおそれがある。そこで、発明者らはさらに研究を進め、以下のような構成のパルスレーザを提案する。

[0015] 本発明の第 1 の態様のパルスレーザ装置は、パルス光を出力するレーザ光源と、レーザ光源から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器と、レーザ光源から出力されたパルス光を検出して強度変化の時間軸波形である検出信号を出力する光検出器と、光検出器から出力された検出信号に基づいて、強度変化の時間軸波形に比例した位相変化を生じさせる駆動信号を出力し、位相変調器を駆動する位相変調器駆動電源とを備えて構成される。

[0016] 本発明の第 2 の態様のパルスレーザ装置は、第 1 の態様のパルスレーザ装置において、レーザ光源から出力されたパルス光を増幅するファイバ増幅器をさらに有し、光検出器は、レーザ光源から出力されてファイバ増幅器により増幅されたパルス光を検出して強度変化の時間軸波形である検出信号を出力することが好ましい。

[0017] 本発明の第 3 の態様のパルスレーザ装置は、第 1 または第 2 の態様のパルスレーザ装置において、位相変調器による位相変調は、レーザ光源から出力されたパルス光が入射する光ファイバにおいて生じるパルス光の自己位相変調と変調量が略同一で逆位相の位相変調とすることが好ましい。また、本発

明の第4の態様のパルスレーザ装置は、第1～3のいずれか一つの態様のパルスレーザ装置において、位相変調器は位相変調型の電気光学変調器であり、駆動信号は光検出器から出力された検出信号に比例した時間軸波形の電気信号であることが好ましい。

[0018] 本発明の第5の態様のパルスレーザ装置は、第1～4のいずれか一つの態様のパルスレーザ装置において、レーザ光源から出力されたパルス光が入射する光ファイバは、シングルモードファイバであることが好ましい。

[0019] 本発明の第6の態様のパルスレーザ装置は、第1～5のいずれか一つの態様のパルスレーザ装置において、レーザ光源は、レーザ光を発生する光源と、光源により発生されたレーザ光の強度を変調する強度変調器と、出力すべきパルス光のパターンに対応した駆動信号を生成して強度変調器を駆動する強度変調器駆動電源とを備えて構成することが好ましい。

発明の効果

[0020] 本発明によれば、光検出器から出力された検出信号、すなわち前述したパルス光の時間的な強度変化である時間軸波形 $P(t)$ に基づき、これに比例した位相変化を生じさせる駆動信号が位相変調器駆動電源から位相変調器に供給される。そのため、SPMによる位相変調 $\phi_{\text{SPM}}(t)$ を相殺し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。

[0021] また、位相変調器駆動電源は前述した $V_2(t)$ のような比較的複雑な信号を人為的に生成する必要がないため、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザを提供することができる。さらに、本構成においては光検出器によりパルス光を検出するため、パルス光が外部から与えられるか内部で発生するかに拘わらず、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]本発明の適用例として示す、第1構成形態のパルスレーザ装置の概要構成図(ブロック図)である。

[図2]本発明の適用例として示す、第2構成形態のパルスレーザ装置の概要構

成図(ブロック図)である。

[図3]本発明の適用例として示す、第3構成形態のパルスレーザ装置の概要構成図(ブロック図)である。

[図4]狭帯域化を実現するための、他の構成形態のパルスレーザ装置の概要構成図(ブロック図)である。

発明を実施するための形態

[0023] 以下、本発明を実施するための形態について、図面を参照しながら説明する。本発明の適用例として、第1構成形態のパルスレーザ装置1の概要構成図(ブロック図)を図1に示す。パルスレーザ装置1は、パルス光を出力するレーザ光源10と、自己位相変調を補償するSPM補償部30と、パルスレーザ装置全体の作動を制御する制御部(不図示)とを備えて構成される。

[0024] パルスレーザ装置1から出力されたパルス光は、図示省略する増幅用の光ファイバまたは伝送用の光ファイバに入射される。これらの光ファイバは、シングルモードファイバ/マルチモードファイバのいずれを用いることもできるが、モード径が小さく自己位相変調の影響を受けやすいシングルモードファイバの場合に、より大きな効果を得ることができる。以下に説明するパルスレーザ装置1, 2, 3には、光ファイバ内で生じる自己位相変調の影響を排除して、シングルモードファイバを用いることができる。

[0025] レーザ光源10は、CWのレーザ光を発生する光源11と、光源11により発生されたレーザ光の強度を変調する強度変調器12と、パルスレーザ装置1から出力すべきパルス光のパターンに対応した強度変調器駆動信号 $V_1(t)$ を生成して強度変調器12を駆動する強度変調器駆動電源15とを備えて構成される。

[0026] 図1には、光源11としてDFB半導体レーザ(DFB-LD)を用い、強度変調器12として強度変調型の電気光学変調器(EOM、EO強度変調器)を用いた構成を例示する。強度変調器駆動電源15は、パルスレーザ装置1から出力すべきパルス光のパターン(例えば、オン時間1 nsec、繰り返し周波数1 MHz等)に対応したパルス信号を発生するパルス発生器16、およ

びパルス発生器 16 により発生されたパルス信号を E O 強度変調器 12 の駆動に必要な振幅レベルまで増幅して出力する増幅器(不図示)を有して構成される。

[0027] すなわち、強度変調器駆動電源 15 は、パルスレーザ装置 1 から出力すべきパルス光のパターンに対応した強度変調器駆動信号 $V_1(t)$ を E O 強度変調器 12 に出力する。これにより、光源 11 で発生された CW のレーザ光は、E O 強度変調器 12 によって一部が切り出され、時間軸波形 $P(t)$ のパルス光がレーザ光源 10 から出力される。

[0028] このように、光源 11 である DFB 半導体レーザから CW のレーザ光を出力させ、その一部を E O 強度変調器 12 により切り出すように構成すると、DFB 半導体レーザを直接パルス変調したときに発生するチャープ（周波数変調）を伴うことなくフーリエ限界に近い極めて狭帯域のパルス光を発生させることができる。なお、パルス光の帯域幅は多少広がるが、光源 11 からオン時間が十分に長いパルス光を出力させ、E O 強度変調器 12 によってその一部を切り出すように構成しても良い。

[0029] SPM 補償部 30 は、レーザ光源 10 から出力されたパルス光を検出して、その時間軸波形 $P(t)$ に比例した検出信号 $V_{pd}(t)$ を出力する光検出器 31 と、レーザ光源 10 から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器 32 と、光検出器 31 から出力された検出信号に基づいて時間軸波形 $P(t)$ に比例した位相変化を生じさせる位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を出力する位相変調器駆動電源 35 とを備えて構成される。強度変調器 12 と位相変調器 32 との間は接続用の光ファイバ 22 で接続され、この光ファイバ 22 にパルス光の一部（例えば数%程度）を分岐して取り出すカプラ（不図示）が設けられる。そして、カプラを介して取り出されたパルス光が光検出器 31 に導かれて検出される。

[0030] 図 1 には、光検出器 31 としてフォトダイオード (PD) を用い、位相変調器 32 として位相変調型の電気光学変調器 (EOM、E O 位相変調器) を用いた構成を例示する。位相変調器駆動電源 35 には、光検出器 (PD) 3

1 から出力された検出信号 $V_{PD}(t)$ に所要の遅延を与え、必要に応じて波形を調整する調整回路 36 が設けられる。また、調整回路 36 から出力された信号を EO 位相変調器 32 の駆動に必要な振幅レベルまで増幅する増幅器 37 が設けられる。

[0031] このとき、光検出器 31 から出力される検出信号 $V_{PD}(t)$ は、パルス光の時間軸波形 $P(t)$ に比例し、次式で示される。

[数4]

$$V_{PD}(t) \propto P(t) \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

[0032] 前述したように、パルス光を伝送しあるいは増幅する光ファイバについて、分散などに起因する時間軸波形の歪みがないと仮定すると、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ は、パルス光の時間軸波形 $P(t)$ に比例する（前述の（2）式を参照）。そして、EO 位相変調器 32 により予めパルス光に対して、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ と逆の位相変調をすることによって、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ を相殺することができる。

[0033] すなわち、光検出器 31 から出力される検出信号 $V_{PD}(t)$ は、光ファイバ内の SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ を相殺するために EO 位相変調器 32 に印加すべき電気信号と相似する波形であることが分かる。調整回路 36 により、光検出器 31 から出力された検出信号 $V_{PD}(t)$ は、必要に応じて波形が調整され、さらに必要に応じて、EO 位相変調器 32 においてパルス光 $P(t)$ と位相変調とのタイミングが正確に合うように所要の遅延が与えられる。調整回路 36 により調整された検出信号は、増幅器 37 により EO 位相変調器 32 の駆動に必要な振幅レベルに増幅され、増幅された位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ が EO 位相変調器 32 に入力される。

[0034] 位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ は、光ファイバにおいて生じるパルス光の自己位相変調と逆の位相変調を EO 位相変調器 32 において生じさせる電気信号である。パルス光の自己位相変調 ϕ_{SPM} と変調量が同一となる V_2 の振幅は、およそ次式で示す関係となる。

[数5]

$$|V_2| \sim \phi_{SPM} V_\pi / \pi \quad \dots\dots\dots (5)$$

[0035] 位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を、パルス光が透過するタイミングに合わせて E O 位相変調器 3 2 に入力し、位相変調をすることにより、光ファイバにおいて生じる S P M による位相変調と変調量が同一で逆位相の変調を受けたパルス光となる。このため、光ファイバ内では S P M によって生じる位相変調が相殺され、光ファイバの出射端からスペクトル幅が狭い狭帯域のパルス光が出力される。

[0036] なお、上記実施例では、E O 位相変調器 3 2 において、パルス光 $P(t)$ と位相変調のタイミングを合わせるため、光検出器 3 1 から出力された検出信号（電気信号）に所要の遅延を与える構成を例示した。しかしながら、パルスレーザ装置は、E O 位相変調器 3 2 においてパルス光 $P(t)$ と位相変調のタイミングが合致するように構成すれば他の手段であっても良い。例えば、E O 強度変調器 1 2 と E O 位相変調器 3 2 との間を結ぶ接続用の光ファイバ 2 2 の長さ、または、この光ファイバ 2 2 から分岐して光検出器 3 1 との間を結ぶ光ファイバの長さを調整するか、あるいは、光の遅延回路（delay line）によって調整するようにパルスレーザ装置を構成しても良い。電氣的な遅延回路と光学的な遅延回路とを適宜組み合わせることも可能である。また、調整回路 3 6 は、増幅器 3 7 の持つ入力／出力の非線形応答を補正するように構成しても良い。

[0037] 以上説明したパルスレーザ装置 1 によれば、光ファイバ内で生じる S P M による位相変調を相殺し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。また、図 4 を参照して説明したように、E O 位相変調器 3 2 を駆動する位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ として、複雑な信号を独立して発生させる必要がないため、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザ装置を提供することができる。

[0038] 次に、第 2 構成形態のパルスレーザ装置 2 について、その概要構成を例示

する図2を参照して説明する。パルスレーザ装置2は、パルス光を出力するレーザ光源10と、レーザ光源10から出力されたパルス光を増幅するファイバ増幅器20と、自己位相変調を補償するSPM補償部30と、パルスレーザ装置全体の作動を制御する制御部(不図示)とを備えて構成される。

[0039] 本構成形態のパルスレーザ装置2は、ファイバ増幅器20により増幅されたパルス光を光検出器31で検出し、その検出信号に基づいてファイバ増幅器20の増幅用ファイバ25で生じる自己位相変調を補償するように構成される。すなわち、本構成形態のパルスレーザ装置2は、実際に光ファイバを透過したパルス光に基づいてSPMによる位相変調を補償する点において、光ファイバを透過する前のパルス光に基づいてSPMによる位相変調を補償する第1構成形態のパルスレーザ装置1と相違する。パルス光を出力するレーザ光源10、および自己位相変調を補償するSPM補償部30の基本的な構成は、前述したパルスレーザ装置1のレーザ光源10およびSPM補償部30と同様である。そこで、図2には同様の構成部分に同一番号を付して説明を簡略化し、相違する部分を中心に説明する。

[0040] レーザ光源10は、CWのレーザ光を発生する光源11と、光源11により発生されたレーザ光の強度を変調する強度変調器12と、パルスレーザ装置2から出力すべきパルス光のパターンに対応した強度変調器駆動信号 $V_1(t)$ を生成して強度変調器12を駆動する強度変調器駆動電源15とを備えて構成される。光源11としてDFB半導体レーザ(DFB-LD)、強度変調器12としてEO強度変調器(EOM)を用いた構成を例示する。強度変調器駆動電源15は、パルス発生器16および不図示の増幅器を有して構成される。本構成により、光源11で発生されたCWのレーザ光は、EO強度変調器12によって一部が切り出され、時間軸波形 $P(t)$ のパルス光がレーザ光源10から出力される。

[0041] ファイバ増幅器20は、コアにレーザ媒質がドーピングされた増幅用の光ファイバ(増幅用ファイバ)25と、増幅用ファイバ25を励起する不図示の励起光源と、励起光源の作動を制御する不図示の制御部とを備えて構成される。

。図2には、増幅用ファイバ25のコアにエルビウム（Er）がドープされたエルビウム・ドープ・ファイバ増幅器（EDFA）を用いた構成を例示する。増幅用ファイバ25は、モードフィールド径が1～15 μm 程度以下のシングルモードファイバである。なお、レーザ光源10およびファイバ増幅器20は、パルスレーザ装置から出力するパルス光の波長に応じて適宜選定することができる。例えば、ファイバ増幅器20として、イッテルビウム・ドープ・ファイバ増幅器（YDFA）やツリウム・ドープ・ファイバ増幅器（TDFA）などを用いることもできる。

[0042] SPM補償部30は、レーザ光源10から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器32と、ファイバ増幅器20から出力される増幅されたパルス光（以下、増幅パルス光という）を検出して、その時間軸波形 $P_A(t)$ に比例した検出信号を出力する光検出器31と、光検出器31から出力された検出信号に基づいて時間軸波形 $P_A(t)$ に比例した位相変化を生じさせる位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を出力する位相変調器駆動電源35とを備えて構成される。位相変調器32はレーザ光源10とファイバ増幅器20との間に設けられる。

[0043] 増幅用ファイバ25の出力端部近傍には、増幅パルス光の一部（例えば1%程度）を分岐して取り出すカプラ（不図示）が設けられ、このカプラを介して取り出された増幅パルス光が光検出器31に導かれて検出される。図2は、光検出器31としてフォトダイオード（PD）、位相変調器32としてEO位相変調器（EOM）を用いた構成を例示している。

[0044] 位相変調器駆動電源35には、光検出器31から出力された検出信号 $V_{PD}(t)$ に所要の遅延を与え、必要に応じて波形を調整する調整回路36が設けられるとともに、その出力信号をEO位相変調器32の駆動に必要な振幅レベルまで増幅する増幅器37が設けられる。光検出器31により検出されるパルス光は、EO位相変調器32を通過したパルス光である。そのため、EO位相変調器32による位相変調は、所定の繰り返し周期で入射する光パルスのうち、光検出器31で検出された光パルスを基準として1パルス～数パルス

程度後の光パルスに対して行われる。調整回路 36 は、E O 位相変調器 32 において、パルス光 $P(t)$ と位相変調駆動信号 $V_2(t)$ とのタイミングが合致するように、光検出器 31 の検出信号に所要の遅延を与える。

[0045] ファイバ増幅器 20 で増幅後のパルス光のパルスエネルギーが、増幅用ファイバ 25 の飽和エネルギー (saturation energy) に対して十分に小さい場合には、増幅用ファイバ 25 から出射する増幅パルス光の時間軸波形 $P_A(t)$ は、増幅用ファイバ 25 に入射するパルス光の時間軸波形 $P(t)$ と相似した波形になる。すなわち、この場合には $P_A(t) \propto P(t)$ であり、光検出器 31 から出力される検出信号 $V_{PD}(t)$ は $V_{PD}(t) \propto P_A(t) \propto P(t)$ となる。従って、この場合の効果は、前述したパルスレーザ装置 1 と同様に、増幅用ファイバ 25 内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ が相殺される。

[0046] 一方、ファイバ増幅器 20 で増幅後のパルス光のパルスエネルギーが、増幅用ファイバ 25 の飽和エネルギーと比較して無視できない大きさになった場合、増幅用ファイバ 25 から出射する増幅パルス光の時間軸波形 $P_A(t)$ は、増幅用ファイバ 25 に入射するパルス光の時間軸波形 $P(t)$ と相当程度異なったものとなる。増幅用ファイバ 25 に入射するパルス光の時間軸波形すなわちパルス波形 $P(t)$ が綺麗な矩形波であっても、増幅用ファイバ 25 から出射する増幅パルス光のパルス波形 $P_A(t)$ は、例えば、先頭部で急峻に立ち上がった後になだらかに減少するような崩れた波形になり得る。自己位相変調 (SPM) の程度は、パルス光のピークパワーが高いほど大きい。従って、増幅用ファイバ 25 の出射端近傍で最も大きくなる。

[0047] このような場合には、増幅パルス光のパルス波形 $P_A(t)$ が増幅前のパルス光のパルス波形 $P(t)$ と相似せず、パルス波形 $P(t)$ を基準として位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を生成する構成では SPM による自己位相変調を補償しきれない。従って、増幅用ファイバ 25 の飽和エネルギーと同等、またはそれ以上のパルスエネルギーを持つ増幅パルス光を出力するようなパルスレーザ装置においては、増幅用ファイバ 25 から出力される増幅パルス光のパルス波形 $P_A(t)$ に基づいて位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ を生成することが望ましい。本構成の

パルスレーザ装置 2 においては、増幅用ファイバ 2 5 の出力端部近傍から分岐して設けられた光検出器 3 1 が増幅パルス光を検出し、増幅パルス光のパルス波形 $P_A(t)$ に基づいて位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ が生成される。そして、生成された位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ により E O 位相変調器 3 2 が駆動され、パルス光に S P M による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ と逆の位相変調をする。

[0048] 本構成のパルスレーザ装置 2 によれば、増幅前後のパルス波形が必ずしも相似しない比較的大きなパルスエネルギーを持つパルス光を出力するような場合でも、増幅用ファイバ内で生じる S P M による位相変調を相殺することができる。また、 $V_2(t)$ のような比較的複雑な信号を独立して発生させる必要がないため、簡明な構成でスペクトル幅が狭い狭帯域の増幅パルス光を出力するパルスレーザ装置を提供することができる。

[0049] 次に、第 3 構成形態のパルスレーザ装置 3 について、その概要構成を例示する図 3 を参照して説明する。パルスレーザ装置 3 は、パルス光を出力するレーザ光源（パルスレーザ）1 7 と、自己位相変調を補償する S P M 補償部 3 0 と、パルスレーザ装置全体の作動を制御する制御部（不図示）とを備えて構成される。

[0050] 本構成形態のパルスレーザ装置 3 は、第 1 構成形態のパルスレーザ装置 1 の変形例であり、パルス光を出力するレーザ光源 1 7 の構成が、パルスレーザ装置 1 のレーザ光源 1 0 と相違する。一方、自己位相変調を補償する S P M 補償部 3 0 の基本的な構成は、パルスレーザ装置 1 の S P M 補償部 3 0 と同様である。そこで、図 3 には同様の構成部分に同一番号を付して説明を簡略化し、相違する部分を中心に説明する。

[0051] レーザ光源（パルスレーザ）1 7 は、自律的にパルス光を出力する光源である。パルスレーザ装置 3 は、時間軸波形 $P(t)$ のパルス光が外部から与えられるような場合の構成例であり、例えば、レーザ光源 1 7 としてモードロックレーザや Q スイッチレーザ等を用いた場合に好適な構成である。

[0052] レーザ光源 1 7 から出力された時間軸波形 $P(t)$ のパルス光は、接続用の光ファイバ 2 3 を介して位相変調器 3 2 に入射する。光ファイバ 2 3 には、レ

ーザ光源 17 から出力されたパルス光の一部（例えば 1 ～数％程度）を分岐して取り出すカプラ（不図示）が設けられ、このカプラを介して取り出されたパルス光が光検出器 31 に導かれて検出される。図 3 は、光検出器 31 としてフォトダイオード（PD）、位相変調器 32 として EO 位相変調器（EOM）を用いた構成を例示している。

[0053] 光検出器 31 から出力される検出信号 $V_{PD}(t)$ は、パルス光の時間軸波形 $P(t)$ に比例し、前述した（4）式で示される。パルス光を伝送する光ファイバ、あるいは増幅する光ファイバについて、分散などに起因する時間軸波形の歪みがないと仮定すれば、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ は、パルス光の時間軸波形 $P(t)$ に比例する（前述の（2）式を参照）。そのため、EO 位相変調器 32 により予めパルス光に対して、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ と逆の位相変調をすることによって、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調 $\phi_{SPM}(t)$ を相殺することができる。

[0054] 以上説明したパルスレーザ装置 3 によれば、光ファイバ内で生じる SPM による位相変調を相殺し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。また、EO 位相変調器 32 を駆動する位相変調器駆動信号 $V_2(t)$ として、複雑な信号を人為的に生成する必要がないため、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザ装置を提供することができる。

[0055] 以上説明したように、パルスレーザ装置 1, 2, 3 によれば、光検出器により検出されたパルス光を基準とし、これに比例した位相変化を生じさせる位相変調駆動信号が位相変調器に供給される。そのため、光ファイバで生じる SPM による位相変調を相殺し、狭帯域のパルス光を出力させることができる。また、位相変調器駆動電源が複雑な信号を人為的に生成する必要がないため、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザを提供することができる。また、パルス光が装置の外部から与えられるものであるか、あるいは、装置内部で発生させるものであるかに拘わらず、簡明な構成で狭帯域のパルス光を出力するパルスレーザを提供することができる。

[0056] なお、以上では、レーザ光源 10, 17 から出力されたパルス光に対して

、送信用または増幅用の光ファイバ内で生じるSPMによる位相変調と逆の位相変調を、これらの光ファイバに入射する以前に、EO位相変調器32により予め行うような構成について説明した。しかし、EO位相変調器32を送信用の光ファイバまたは増幅用の光ファイバの出射端部近傍に設け、これらの光ファイバにおけるSPMにより位相変調が生じた後に相殺するように構成しても良い。また、1つの位相変調器では変調量が不足する場合には、2つ以上の位相変調器を直列に接続することにより、十分な位相変調量を確保する事が可能である。

[0057] 次の優先権基礎出願の開示内容は引用文としてここに組み込まれる。

日本国特許出願2013年第50235号（2013年3月13日出願）

符号の説明

- [0058] 1 第1構成形態のパルスレーザ装置
2 第2構成形態のパルスレーザ装置
3 第3構成形態のパルスレーザ装置
9 他の構成形態のパルスレーザ装置
10 レーザ光源
11 光源
12 強度変調器（EO強度変調器）
15 強度変調器駆動電源
16 パルス発生器
17 レーザ光源
20 ファイバ増幅器
22 接続用の光ファイバ
23 接続用の光ファイバ
25 増幅用の光ファイバ
30 SPM補償部
31 光検出器
32 位相変調器（EO位相変調器）

3 5 位相変調器駆動電源

$P(t)$ パルス光の時間軸波形

$P_A(t)$ 増幅パルス光の時間軸波形

$V_1(t)$ 強度変調器駆動信号

$V_2(t)$ 位相変調器駆動信号

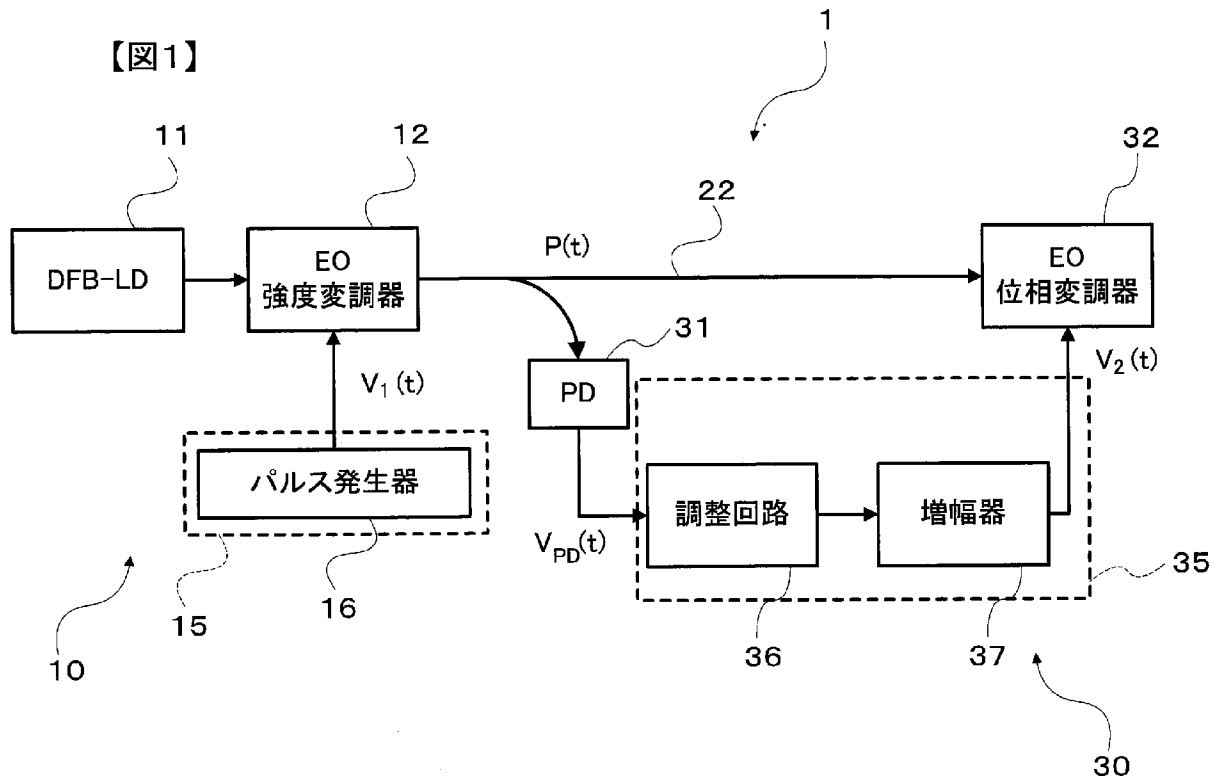
$V_{PD}(t)$ 検出信号

請求の範囲

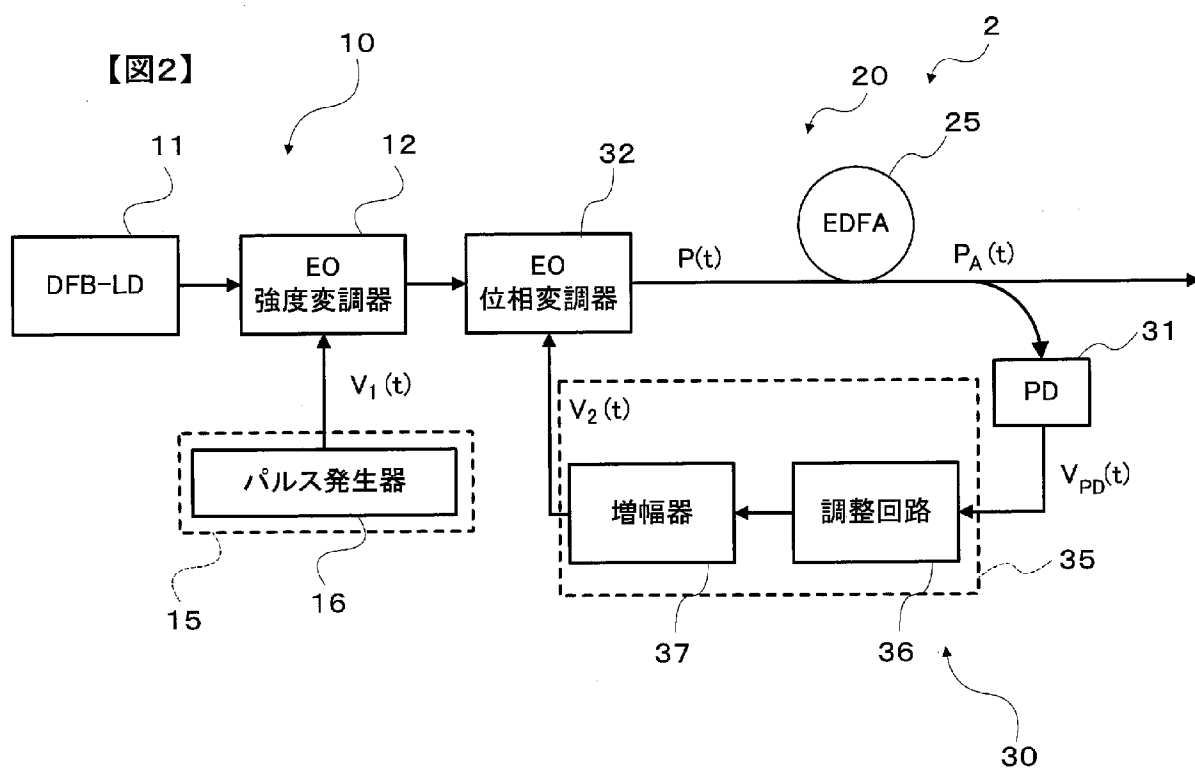
- [請求項1] パルス光を出力するレーザ光源と、
 前記レーザ光源から出力されたパルス光の位相を変化させる位相変調器と、
 前記レーザ光源から出力されたパルス光を検出して強度変化の時間軸波形である検出信号を出力する光検出器と、
 前記光検出器から出力された前記検出信号に基づいて、前記強度変化の時間軸波形に比例した位相変化を生じさせる駆動信号を出力し、
 前記位相変調器を駆動する位相変調器駆動電源と
 を備えたパルスレーザ装置。
- [請求項2] 請求項1に記載のパルスレーザ装置において、
 前記レーザ光源から出力されたパルス光を増幅するファイバ増幅器をさらに有し、
 前記光検出器は、前記レーザ光源から出力されて前記ファイバ増幅器により増幅されたパルス光を検出して強度変化の時間軸波形である検出信号を出力するパルスレーザ装置。
- [請求項3] 請求項1または2に記載のパルスレーザ装置において、
 前記位相変調器による位相変調は、前記レーザ光源から出力されたパルス光が入射する光ファイバにおいて生じるパルス光の自己位相変調と変調量が略同一で逆位相の位相変調であるパルスレーザ装置。
- [請求項4] 請求項1～3のいずれか一項に記載のパルスレーザ装置において、
 前記位相変調器は位相変調型の電気光学変調器であり、前記駆動信号は前記光検出器から出力された前記検出信号に比例した時間軸波形の電気信号であるパルスレーザ装置。
- [請求項5] 請求項1～4のいずれか一項に記載のパルスレーザ装置において、
 前記レーザ光源から出力されたパルス光が入射する光ファイバは、シングルモードファイバであるパルスレーザ装置。
- [請求項6] 請求項1～5のいずれか一項に記載のパルスレーザ装置において、

前記レーザ光源は、レーザ光を発生する光源と、前記光源により発生されたレーザ光の強度を変調する強度変調器と、出力すべきパルス光のパターンに対応した駆動信号を生成して前記強度変調器を駆動する強度変調器駆動電源とを備えるパルスレーザ装置。

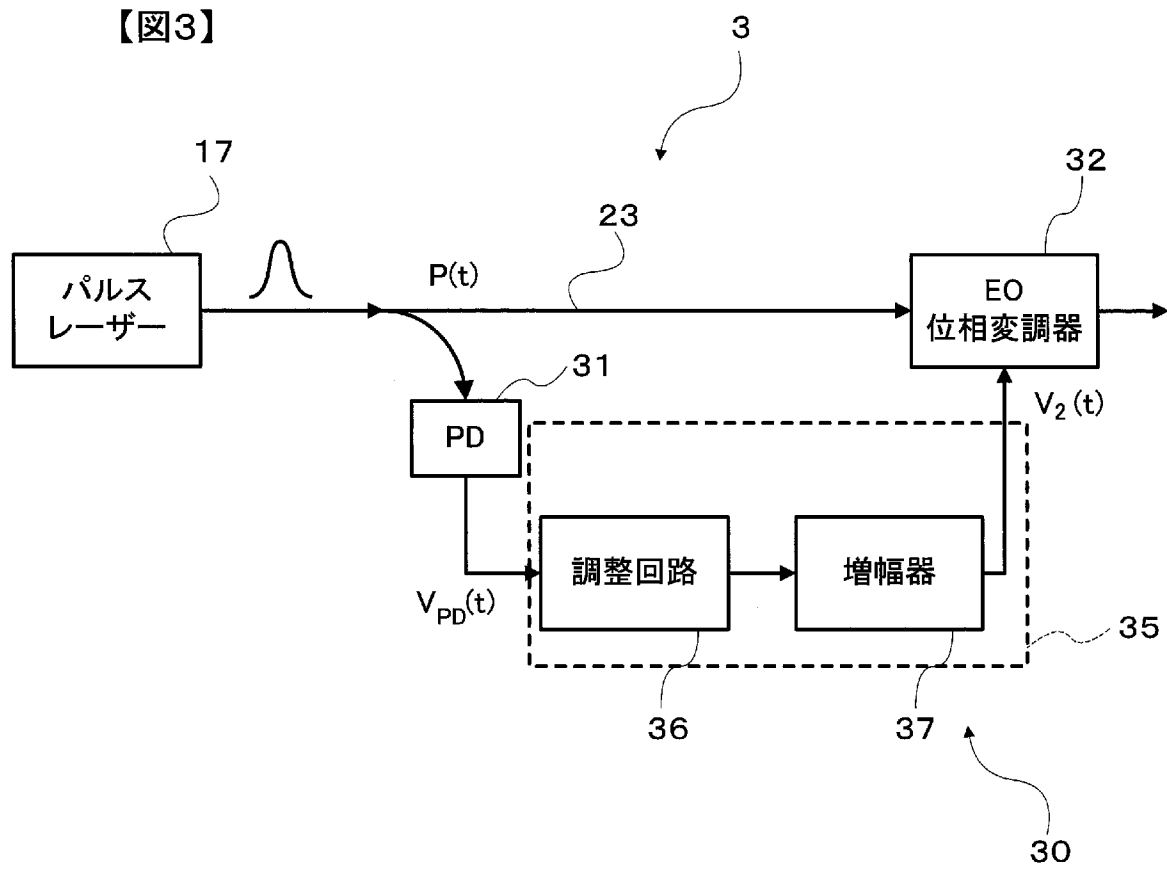
【図1】



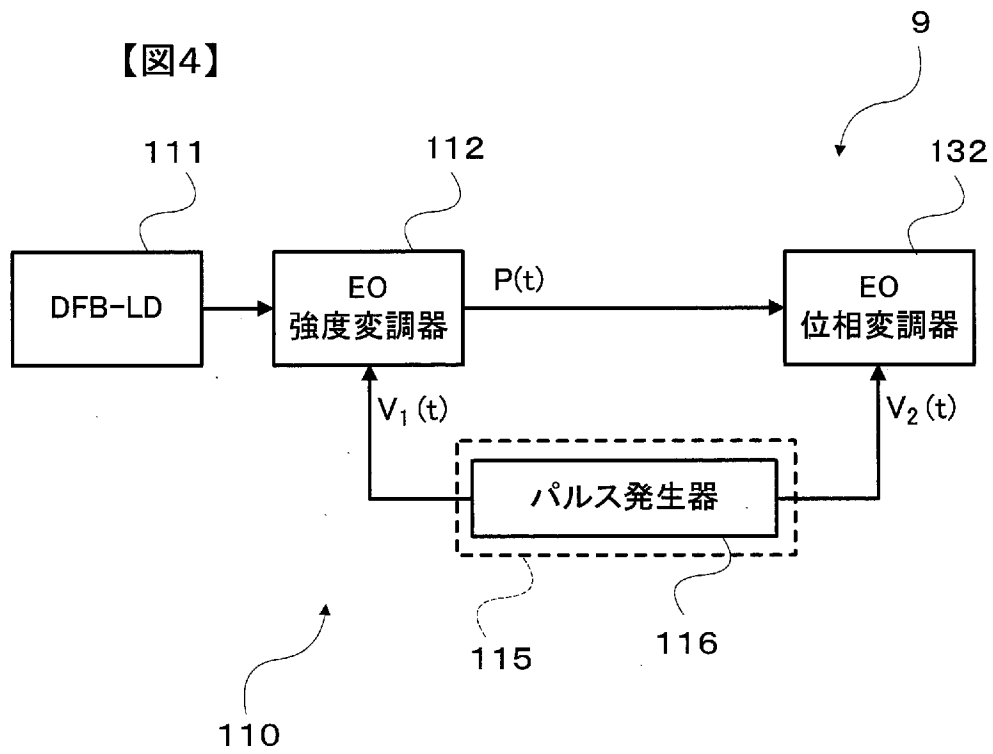
【図2】



[図3]



【図4】



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/055663

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F1/01(2006.01)i, G02F1/365(2006.01)i, H01S3/10(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)

G02F1/00-1/125, 1/35-7/00, H01S3/00-3/30, H04B10/00-10/90

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	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

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.
X Y	JP 7-58698 A (NEC Corp.), 03 March 1995 (03.03.1995), paragraphs [0022] to [0044]; fig. 2 to 4 (Family: none)	1-3 4-6
X Y	JP 7-58699 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 03 March 1995 (03.03.1995), paragraph [0017]; fig. 1 (Family: none)	1, 3 2, 4-6
X Y	JP 8-116307 A (Fujitsu Ltd.), 07 May 1996 (07.05.1996), claim 9; paragraphs [0050] to [0054]; fig. 7 (Family: none)	1, 3, 5 2, 4, 6

☒ 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
20 May, 2014 (20.05.14)

Date of mailing of the international search report
03 June, 2014 (03.06.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/055663

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 9-236781 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 09 September 1997 (09.09.1997), paragraphs [0020] to [0026]; fig. 1, 4 (Family: none)	1, 3, 4, 6 2, 5
X Y	JP 2007-300496 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 15 November 2007 (15.11.2007), paragraphs [0048] to [0050]; fig. 11, 12 (Family: none)	1-3, 6 4, 5
Y	WO 02/095486 A1 (Nikon Corp.), 28 November 2002 (28.11.2002), page 9, line 10 to page 16, line 17; page 25, line 22 to page 29, line 1; fig. 1 to 10 (Family: none)	1-6
Y	JP 2012-2965 A (Nikon Corp.), 05 January 2012 (05.01.2012), paragraph [0033] (Family: none)	5

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G02F1/01(2006.01)i, G02F1/365(2006.01)i, H01S3/10(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（I P C））

Int.Cl. G02F1/00-1/125, 1/35-7/00, H01S3/00-3/30, H04B10/00-10/90

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 4 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 4 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 4 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
X	JP 7-58698 A（日本電気株式会社）	1-3
Y	1995.03.03, 段落【0022】-【0044】, 図2-4（ファミリーなし）	4-6
X	JP 7-58699 A（日本電信電話株式会社）	1, 3
Y	1995.03.03, 段落【0017】, 図1（ファミリーなし）	2, 4-6
X	JP 8-116307 A（富士通株式会社）	1, 3, 5
Y	1996.05.07, 請求項9, 段落【0050】-【0054】, 図7 （ファミリーなし）	2, 4, 6

☒ 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

2 0 . 0 5 . 2 0 1 4

国際調査報告の発送日

0 3 . 0 6 . 2 0 1 4

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）

古田 敦浩

2 X

5 2 6 3

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 4

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
X	JP 9-236781 A (日本電信電話株式会社)	1, 3, 4, 6
Y	1997. 09. 09, 段落【0020】 - 【0026】, 図 1, 図 4 (ファミリーなし)	2, 5
X	JP 2007-300496 A (日本電信電話株式会社)	1-3, 6
Y	2007. 11. 15, 段落【0048】 - 【0050】, 図 11, 図 12 (ファミリーなし)	4, 5
Y	WO 02/095486 A1 (株式会社ニコン) 2002. 11. 28, 第 9 頁第 10 行-第 16 頁第 17 行, 第 25 頁第 22 行-第 29 頁第 1 行, 第 1-10 図 (ファミリーなし)	1-6
Y	JP 2012-2965 A (株式会社ニコン) 2012. 01. 05, 段落【0033】 (ファミリーなし)	5