

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-53423  
(P2020-53423A)

(43) 公開日 令和2年4月2日(2020.4.2)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)		
HO1S	3/10	(2006.01)	HO1S	3/10	D	5F172		
HO1S	3/00	(2006.01)	HO1S	3/00	G	5F173		
HO1S	5/062	(2006.01)	HO1S	5/062				

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2018-177894 (P2018-177894)  
(22) 出願日 平成30年9月21日 (2018.9.21)

(71) 出願人 000236436  
浜松ホトニクス株式会社  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1  
(74) 代理人 100088155  
弁理士 長谷川 芳樹  
(74) 代理人 100113435  
弁理士 黒木 義樹  
(74) 代理人 100140442  
弁理士 柴山 健一  
(74) 代理人 100174399  
弁理士 寺澤 正太郎  
(72) 発明者 栗田 隆史  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1  
浜松ホトニクス株式会社内

最終頁に続く

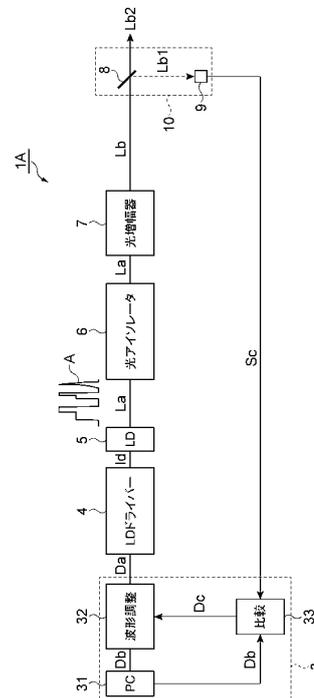
(54) 【発明の名称】 レーザ装置及びレーザ波形制御方法

(57) 【要約】

【課題】装置寸法の小型化が可能なレーザ装置及びレーザ波形制御方法を提供する。

【解決手段】レーザ装置1Aは、半導体レーザ素子5と、入力波形データDaを演算する波形演算部3と、入力波形データDaに応じた時間波形を有する駆動電流Idを半導体レーザ素子5に供給するドライバ回路4と、半導体レーザ素子5から出力されたレーザ光Laを増幅する光増幅器7と、光増幅器7から出力された増幅後のレーザ光Lbの波形を検出する光波形検出部10とを備える。波形演算部3は、光波形検出部10により検出された増幅後のレーザ光Lbの波形と目標波形とを比較して、入力波形データDaの時間波形を調整し、増幅後のレーザ光Lbの波形を目標波形に近づける。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

半導体レーザ素子と、  
入力波形データを演算する波形演算部と、  
前記波形演算部及び前記半導体レーザ素子と電気的に接続され、前記入力波形データに応じた時間波形を有する駆動電流を生成し、該駆動電流を前記半導体レーザ素子に供給するドライバ回路と、  
前記半導体レーザ素子と光学的に結合され、前記半導体レーザ素子から出力された光を増幅する光増幅器と、  
前記光増幅器から出力された増幅後の光波形を検出する光波形検出部と、  
を備え、  
前記波形演算部は、前記光波形検出部により検出された増幅後の光波形と目標波形とを比較して、前記入力波形データの時間波形を調整し、増幅後の光波形を前記目標波形に近づける、レーザ装置。

10

**【請求項 2】**

前記波形演算部は、前記光波形検出部により検出された増幅後の光波形と前記目標波形との差分が 0 に近づくように前記入力波形データの時間波形を調整する、請求項 1 に記載のレーザ装置。

**【請求項 3】**

前記波形演算部は、前記目標波形を示すデータを予め記憶する記憶部を有する、請求項 1 または 2 に記載のレーザ装置。

20

**【請求項 4】**

前記ドライバ回路は、  
デジタルの前記入力波形データをアナログの駆動信号に変換する D / A 変換部と、  
前記駆動信号を前記駆動電流に変換する電流変換部と、  
を有し、  
前記 D / A 変換部は、前記入力波形データの時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データを、時間差を与えながら前記駆動信号に順次変換する、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載のレーザ装置。

**【請求項 5】**

入力波形データに応じた時間波形を有する駆動電流を生成し、前記駆動電流を半導体レーザ素子に供給する電流供給ステップと、  
前記半導体レーザ素子から出力された光を増幅する光増幅ステップと、  
増幅後の光波形を検出する光波形検出ステップと、  
前記光波形検出ステップにより検出された増幅後の光波形と目標波形とを比較して、前記入力波形データの時間波形を調整し、増幅後の光波形を前記目標波形に近づける波形調整ステップと、  
を含む、レーザ波形制御方法。

30

**【請求項 6】**

前記波形調整ステップでは、前記光波形検出ステップにより検出された増幅後の光波形と前記目標波形との差分が 0 に近づくように前記入力波形データの時間波形を調整する、請求項 5 に記載のレーザ波形制御方法。

40

**【請求項 7】**

前記電流供給ステップは、  
デジタルの前記入力波形データをアナログの駆動信号に変換する D / A 変換ステップと、  
前記駆動信号を前記駆動電流に変換する電流変換ステップと、  
を含み、  
前記 D / A 変換ステップでは、前記入力波形データの時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データを、時間差を与えながら前記駆動信号に順次変換する、請求項 5 ま

50

たは 6 に記載のレーザ波形制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ装置及びレーザ波形制御方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

非特許文献 1 には、ナノ秒オーダーのパルス幅を有する光パルスを出力するレーザ装置が開示されている。このレーザ装置は、連続光 (CW) であるレーザ光を出力する光源と、光源から出力されたレーザを時間的に切り取ってパルス光とする音響光学光変調器 (AOM) と、AOM から出力されたパルス光を任意の波形に整形する電気光学光変調器 (EOM) とを備えている。光源は、レーザダイオード (LD) 励起のファイバレーザである。

10

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】Saumyabrata Banerjee et al., "100 J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser", Optics Letters, Vol. 41, No. 9 (2016)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

20

【0004】

超短パルス光、又は、短パルス光の時間波形を任意に整形することは、例えばレーザ加工や各種の計測器 (例えば形状モニタ、衝撃波モニタ) にとって極めて有用である。加工対象や計測対象に応じた適切なパルス光の波形を選択することによって、加工精度や計測精度の向上が見込めるからである。しかしながら、所望の波形を精度良く生成したとしても、必要なパルス光強度を得る為に光増幅を行うと、光増幅器の非線形性に起因して、増幅後の光波形が歪んでしまうという問題がある。そこで、光増幅器の非線形性を予め考慮して、増幅後の光波形が所望の形状となるような波形のパルス光を光増幅器に入力することが考えられる。

【0005】

30

従来のパルス光生成装置は、例えば非特許文献 1 に記載されているように、ファイバレーザ若しくは固体レーザから出力された連続光を EOM によって任意の波形に整形する。ファイバレーザ及び固体レーザの寸法は大きくなり易く、また、EOM では温度変化による特性の変動 (温度ドリフト) が大きいので、EOM の温度ドリフトを補償するための構成が別途必要となる。これらは、レーザ装置の小型化を妨げる要因となる。

【0006】

本発明は、上記の問題点に鑑みてなされたものであり、装置寸法の小型化が可能なレーザ装置及びレーザ波形制御方法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】

【0007】

40

上述した課題を解決するために、本発明の一態様によるレーザ装置は、半導体レーザ素子と、入力波形データを演算する波形演算部と、波形演算部及び半導体レーザ素子と電気的に接続され、入力波形データに応じた時間波形を有する駆動電流を生成し、該駆動電流を半導体レーザ素子に供給するドライバ回路と、半導体レーザ素子と光学的に結合され、半導体レーザ素子から出力された光を増幅する光増幅器と、光増幅器から出力された増幅後の光波形を検出する光波形検出部と、を備える。波形演算部は、光波形検出部により検出された増幅後の光波形と目標波形とを比較して、入力波形データの時間波形を調整し、増幅後の光波形を目標波形に近づける。

【0008】

また、本発明の一態様によるレーザ波形制御方法は、入力波形データに応じた時間波形

50

を有する駆動電流を生成し、駆動電流を半導体レーザ素子に供給する電流供給ステップと、半導体レーザ素子から出力された光を増幅する光増幅ステップと、増幅後の光波形を検出する光波形検出ステップと、光波形検出ステップにより検出された増幅後の光波形と目標波形とを比較して、入力波形データの時間波形を調整し、増幅後の光波形を目標波形に近づける波形調整ステップと、を含む。

【0009】

上記のレーザ装置及びレーザ波形制御方法では、連続光を出力するファイバレーザ若しくは固体レーザではなく、半導体レーザ素子を光源として用いている。そして、半導体レーザ素子を駆動するための駆動信号の波形を、光波形検出部（光波形検出ステップ）により検出した増幅後の光波形に基づいて調整する。これにより、半導体レーザ素子から出力される光波形を調整して、増幅後の光波形を目標波形に近づけることができる。また、波形演算部といった電子回路、及び半導体レーザ素子のサイズは、ファイバレーザ若しくは固体レーザ、及びEOMのサイズと比較して格段に小さい。更に、半導体レーザ素子の温度ドリフトに関しては、ペルチェ素子等によって半導体レーザ素子の温度を一定に維持すれば足りる。以上のことから、上記のレーザ装置及びレーザ波形制御方法によれば、従来の装置及び方法と比較して、装置寸法の小型化が可能となる。

10

【0010】

上記のレーザ装置において、波形演算部は、光波形検出部により検出された増幅後の光波形と目標波形との差分が0に近づくように入力波形データの時間波形を調整してもよい。同様に、上記のレーザ波形制御方法の波形調整ステップでは、光強度検出ステップにより検出された増幅後の光波形と目標波形との差分が0に近づくように入力波形データの時間波形を調整してもよい。これにより、増幅後の光波形を目標波形に更に精度良く近づけることができる。この場合、波形演算部は、目標波形を示すデータを予め記憶する記憶部を有してもよい。

20

【0011】

上記のレーザ装置において、ドライバ回路は、デジタルの入力波形データをアナログの駆動信号に変換するD/A変換部と、駆動信号を駆動電流に変換する電流変換部と、を有し、D/A変換部は、入力波形データの時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データを、時間差を与えながら駆動信号に順次変換してもよい。同様に、上記のレーザ波形制御方法の電流供給ステップは、デジタルの入力波形データをアナログの駆動信号に変換するD/A変換ステップと、駆動信号を駆動電流に変換する電流変換ステップと、を含み、D/A変換ステップでは、入力波形データの時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データを、時間差を与えながら駆動信号に順次変換してもよい。これらの装置及び方法によれば、駆動信号をより高速化して光波形の時間分解能を高めることができる。

30

【発明の効果】

【0012】

本発明の一態様によれば、装置寸法の小型化が可能なレーザ装置及びレーザ波形制御方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

40

【0013】

【図1】本発明の一実施形態に係るレーザ装置1Aの構成を示すブロック図である。

【図2】レーザ装置1Aの具体例を示すブロック図である。

【図3】ドライバ回路4の詳細な構成例を示すブロック図である。

【図4】波形タイミング調整部43の機能を模式的に示す図である。

【図5】レーザ装置1Aの動作を示すフローチャートである。

【図6】(a)～(d)光パルス波形を模式的に示す図である。

【図7】(a)増幅前のレーザ光Laの時間波形(矩形波)を示す。(b)(a)に示された時間波形を有するレーザ光Laを増幅した後のレーザ光Lbの時間波形を示す。

【図8】(a)増幅前のレーザ光Laの時間波形(ランプ波)を示す。(b)(a)に示

50

された時間波形を有するレーザ光 L a を増幅した後のレーザ光 L b の時間波形を示す。

【図 9】半導体レーザ素子 5 から出力されるレーザ光 L a の時間波形の例を示すグラフである。( a ) 半値全幅が 4 ナノ秒のガウス波形を示している。( b ) 半値全幅が 3 2 ナノ秒のガウス波形を示している。

【図 10】半導体レーザ素子 5 から出力されるレーザ光 L a の時間波形の例を示すグラフである。( a ) 半値全幅が 1 2 0 ナノ秒の矩形波を示している。( b ) 半値全幅が 4 ナノ秒のランプ波形を示している。

【図 11】従来のレーザ装置の構成を示すブロック図である。

【図 12】図 11 に示されたレーザ装置に、出力波形に基づいて駆動信号を調整するフィードバック回路を追加した場合の構成を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、添付図面を参照しながら本発明によるレーザ装置及びレーザ波形制御方法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。

【0015】

図 1 は、本発明の一実施形態に係るレーザ装置 1 A の構成を示すブロック図である。図 1 に示されるように、本実施形態のレーザ装置 1 A は、波形演算部 3 と、ドライバ回路 4 と、半導体レーザ素子 5 と、光アイソレータ 6 と、光増幅器 7 と、光分岐部 8 と、光検出部 9 とを備えている。

【0016】

波形演算部 3 は、電子回路によって構成され、ドライバ回路 4 と電気的に接続されている。波形演算部 3 は、光増幅器 7 から出力される光パルスの波形（以下、出力波形という）を目標波形に近づけるための入力波形データ D a を演算して生成し、その入力波形データ D a をドライバ回路 4 に提供する。一例では、波形演算部 3 は、コンピュータ 3 1 と、波形調整部 3 2 と、比較部 3 3 とを有する。コンピュータ 3 1 は、CPU 及びメモリを有し、メモリに記憶されたプログラムに従って動作する。コンピュータ 3 1 のメモリは、本実施形態における記憶部であって、所望（任意）の光波形、すなわち目標波形を表すデータ（以下、目標波形データという）を予め記憶している。この目標波形データは、レーザ装置 1 A の動作前に、コンピュータ 3 1 のデータ入力端子を通じて、操作者により予めメモリに記憶される。或いは、コンピュータ 3 1 が、波形設計部として、目標波形を自ら設計してもよい。すなわち、外部より与えられた光照射条件（加工条件、観察条件）を実現するための目標波形を、コンピュータ 3 1 が算出してもよい。算出された目標波形を表す目標波形データは、コンピュータ 3 1 のメモリに記憶される。

【0017】

比較部 3 3 は、後述する光検出部 9 と電気的に接続されており、光検出部 9 から得られた検出信号（光強度信号 S c ）に基づいて、出力波形を取得する。また、比較部 3 3 は、コンピュータ 3 1 と電気的に接続されており、目標波形データ D b をコンピュータ 3 1 から取得する。比較部 3 3 は、出力波形と目標波形とを比較し、その差分を示す差分データ D c を波形調整部 3 2 に送る。なお、比較部 3 3 は、CPU 及びメモリを有するコンピュータによって構成されてもよい。その場合、比較部 3 3 は、コンピュータ 3 1 とは別体であってもよいし、コンピュータ 3 1 と共通のコンピュータ内に実現されてもよい。

【0018】

波形調整部 3 2 は、コンピュータ 3 1 と電気的に接続されており、目標波形データ D b をコンピュータ 3 1 から取得する。また、波形調整部 3 2 は、比較部 3 3 と電気的に接続されており、比較部 3 3 から出力された差分データ D c を取得する。波形調整部 3 2 は、これらのデータ D b , D c に基づいて、出力波形が目標波形に近づくように（すなわち差分が小さくなるように）入力波形データ D a を生成する。なお、波形調整部 3 2 もまた、CPU 及びメモリを有するコンピュータによって構成されてもよい。その場合、波形調整部 3 2 は、コンピュータ 3 1 及び比較部 3 3 とは別体であってもよいし、コンピュータ 3

10

20

30

40

50

1 及び比較部 3 3 のうち少なくとも一方と共通のコンピュータ内に実現されてもよい。

【0019】

ドライバ回路 4 の入力端は、波形演算部 3 の波形調整部 3 2 と電氣的に接続されており、波形調整部 3 2 から入力波形データ D a を受け取る。ドライバ回路 4 は、入力波形データ D a に応じた時間波形を有する駆動電流 I d を生成する。ドライバ回路 4 の出力端は、半導体レーザ素子 5 と電氣的に接続されており、生成した駆動電流 I d を半導体レーザ素子 5 に供給する。なお、駆動電流 I d には、時間変化がなく大きさ一定のバイアス電流が重畳される場合もある。

【0020】

半導体レーザ素子 5 は、レーザダイオードであって、ドライバ回路 4 と電氣的に接続されている。ドライバ回路 4 は、半導体レーザ素子 5 のカソード及びアノードのいずれかに対して駆動電流 I d を供給する。半導体レーザ素子 5 は、駆動電流 I d を受けてレーザ光 L a を発生する。このレーザ光 L a は、光増幅器 7 による増幅前の光であって、入力波形データ D a に応じた時間波形を有する。一例では、半導体レーザ素子 5 は分布帰還型 (DFB) レーザダイオードである。半導体レーザ素子 5 が DFB レーザダイオードであることにより、光増幅器 7 の利得の波長特性にあわせた最適化が容易にできる。なお、図中の波形 A は、半導体レーザ素子 5 から出力されるレーザ光 L a の時間波形を模式的に示している。半導体レーザ素子 5 の出力パワーは例えば数ナノジュールである。

10

【0021】

光アイソレータ 6 の光入力端は、半導体レーザ素子 5 のレーザ光出力端と光学的に結合されている。また、光アイソレータ 6 の光出力端は、光増幅器 7 の光入力端と光学的に結合されている。すなわち、光アイソレータ 6 は、半導体レーザ素子 5 と光増幅器 7 との間の光路上に介在している。光アイソレータ 6 は、光増幅器 7 によって増幅された光が半導体レーザ素子 5 に戻ることを防ぐ。

20

【0022】

光増幅器 7 の光入力端は、光アイソレータ 6 を介して半導体レーザ素子 5 と光学的に結合されており、半導体レーザ素子 5 から出力されたレーザ光 L a を増幅する。光増幅器 7 は、レーザ光を電気信号に変換せず、光のまま直接増幅する。光増幅器 7 は、例えば光ファイバ増幅器、固体レーザ増幅器、或いはそれらの組み合わせによって構成され得る。光ファイバ増幅器は、例えば E r、Y b などの不純物を添加したガラスからなる光ファイバを有し、レーザ光 L a とともに励起光が該光ファイバに入力されることによってレーザ光 L a を増幅する。また、固体レーザ増幅器は、例えば N d などの不純物を添加した、ガラス若しくはイットリウム・アルミニウム・ガーネット (YAG) によって構成され得る。固体レーザ増幅器は、レーザ光 L a とともに励起光が入力されることによってレーザ光 L a を増幅する。光増幅器 7 の利得は、例えば 3 ~ 30 dB の範囲内である。

30

【0023】

光分岐部 8 及び光検出部 9 は、光波形検出部 10 を構成する。光波形検出部 10 は、光増幅器 7 から出力された増幅後の光波形を検出する。光分岐部 8 は、光増幅器 7 の光出力端と光学的に結合されている。光分岐部 8 は、光増幅器 7 から出力された増幅後のレーザ光 L b の一部 L b 1 を反射 (若しくは透過) し、残部 L b 2 を透過 (若しくは反射) することにより、増幅後のレーザ光 L b の一部 L b 1 を分岐する。光分岐部 8 は、例えばガラス板によって構成され得る。レーザ光 L b の一部 L b 1 の強度 P 1 と残部 L b 2 の強度 P 2 との比 (分岐比)  $P 1 / P 2$  は、例えば 0.005 ~ 0.01 の範囲内である。光検出部 9 は、光分岐部 8 と光学的に結合されており、増幅後のレーザ光 L b の一部 L b 1 を受ける。なお、レーザ光 L b の残部 L b 2 は、レーザ装置 1 A の外部へ出力され、レーザ加工、各種の計測等に使用される。

40

【0024】

光検出部 9 は、レーザ光 L b の一部 L b 1 の光強度に応じた電気信号である光強度信号 S c を生成し、この光強度信号 S c を比較部 3 3 に提供する。一例では、光検出部 9 は、フォトダイオードと、フォトダイオードを流れる光電流を電圧信号に変換する回路とを含

50

んで構成され得る。光検出部 9 は、生成した電圧信号を光強度信号 S c として出力してもよく、生成した電圧信号をデジタル信号に変換し、該デジタル信号を光強度信号 S c として出力してもよい。光強度信号 S c が電圧信号である場合、比較部 33 においてデジタル信号に変換される。なお、光検出部 9 は、フォトダイオードに代えて、光電管（例えばバイプラナ光電管）を含んでもよい。

#### 【0025】

図 2 は、レーザ装置 1 A の具体例を示すブロック図である。図 2 に示される具体例において、レーザ装置 1 A は、図 1 に示された光アイソレータ 6 としての光アイソレータ 6 1、6 2、6 3、及び 6 4 と、光増幅器 7 としての光ファイバ増幅器 7 1、固体レーザ増幅器 7 2 及び 7 3 を備えている。このように、本具体例では光増幅器 7 が多段に構成されて

10

#### 【0026】

光ファイバ増幅器 7 1 の光入力端と半導体レーザ素子 5 とは、光ファイバ F 1 を介して光学的に結合されている。光ファイバ増幅器 7 1 と半導体レーザ素子 5 との間には、光アイソレータ 6 1 が介在している。光アイソレータ 6 1 は、光ファイバ増幅器 7 1 から半導体レーザ素子 5 へ光（レーザ光 L a 及び励起光）が戻ることを防ぐ。これにより、半導体レーザ素子 5 の損傷を防止できる。光ファイバ増幅器 7 1 の光出力端とバンドパスフィルタ 1 2 とは、光ファイバ F 2 を介して光学的に結合されている。光ファイバ増幅器 7 1 とバンドパスフィルタ 1 2 との間には、光アイソレータ 6 2 が介在している。光アイソレータ 6 2 は、バンドパスフィルタ 1 2 より後段の光が光ファイバ増幅器 7 1 に戻ることを防ぐ。光ファイバ増幅器 7 1 は、第 1 段の光増幅器であって、半導体レーザ素子 5 から出力されたレーザ光 L a を増幅する。光ファイバ増幅器 7 1 の利得は、例えば 20 ~ 30 dB の範囲内である。バンドパスフィルタ 1 2 は、光ファイバ増幅器 7 1 から出力された光に含まれる、蛍光の波長成分を遮断する。バンドパスフィルタ 1 2 は、例えば誘電体多層膜によって構成され得る。

20

#### 【0027】

バンドパスフィルタ 1 2 は、光ファイバ F 3 を介して光ファイバコネクタ 1 3 と光学的に結合されている。光ファイバコネクタ 1 3 は、光ファイバ F 3 を終端する。すなわち、バンドパスフィルタ 1 2 を通過した光は、光ファイバ F 3 を伝搬して光ファイバコネクタ 1 3 に達した後、空間に出力される。コリメータレンズ 1 4 は、空間を介して光ファイバコネクタ 1 3 と光学的に結合されており、光ファイバコネクタ 1 3 から放射状に出力された光を平行化（コリメート）する。後述する固体レーザ増幅器 7 2 及び 7 3 によって増幅された光の強度は大きいので、ガラス等の光学材料のレーザによる損傷を回避するため、このように光ファイバコネクタ 1 3 より後段においては光ファイバではなく空間中を伝搬させる。なお、図 2 では、空間中を伝搬する光を破線で示している。

30

#### 【0028】

固体レーザ増幅器 7 2 は、光アイソレータ 6 3 を介してコリメータレンズ 1 4 と光学的に結合されている。光アイソレータ 6 3 は、固体レーザ増幅器 7 2 の光が固体レーザ増幅器 7 2 より前段に戻ることを防ぐ。これにより、光ファイバ増幅器 7 1 の損傷を防止できる。固体レーザ増幅器 7 2 は、第 2 段の光増幅器であって、光ファイバ増幅器 7 1 から出力された増幅後のレーザ光を更に増幅する。固体レーザ増幅器 7 2 の利得は、例えば 3 ~ 20 dB の範囲内である。

40

#### 【0029】

固体レーザ増幅器 7 3 は、光アイソレータ 6 4 を介して固体レーザ増幅器 7 3 と光学的に結合されている。すなわち、光ファイバ増幅器 7 1、固体レーザ増幅器 7 2 及び 7 3 は、互いに直列に結合されている。光アイソレータ 6 4 は、固体レーザ増幅器 7 3 の光が固体レーザ増幅器 7 3 より前段に戻ることを防ぐ。これにより、固体レーザ増幅器 7 2 の損傷を防止できる。固体レーザ増幅器 7 3 は、第 3 段の光増幅器であって、固体レーザ増幅器 7 2 から出力された増幅後のレーザ光を更に増幅する。固体レーザ増幅器 7 3 の利得は

50

、例えば3～10 dBの範囲内である。固体レーザ増幅器72によって増幅された光は、増幅後のレーザ光Lbとして出力される。

【0030】

図3は、ドライバ回路4の詳細な構成例を示すブロック図である。図3に示されるように、ドライバ回路4は、コントロール基板41、波形データ格納部42、波形タイミング調整部43、波形信号生成部44、及び電流変換部45を有する。また、コントロール基板41は、CPU41aと、高速DACインターフェース41bとを含んで構成される。このうち、高速DACインターフェース41b、波形データ格納部42、波形タイミング調整部43、及び波形信号生成部44は、D/A変換部46を構成する。D/A変換部46は、電子回路であって、デジタルの入力波形データDaをアナログの駆動信号Sdに

10

【0031】

コントロール基板41は、波形演算部3とのインターフェースを担う回路基板である。CPU41aは、波形演算部3の波形調整部32(図1を参照)と通信回線を介して電氣的に接続され、波形調整部32から入力波形データDaを受け取る。CPU41aは、この入力波形データDaを、適切なタイミングで高速DACインターフェース41bに送信する。高速DACインターフェース41bは、入力波形データDaを波形データ格納部42に一時的に記憶させる。波形データ格納部42は、高速DACインターフェース41bと電氣的に接続され、例えば揮発性の記憶素子によって構成される。本実施形態の波形調整部32は、入力波形データDaを、入力波形データDaの時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データとして出力する(図4を参照)。これらの区間波形データは、2以上の区間波形データ毎に並列且つ同時に出力される。そして、波形データ格納部42は、この複数の区間波形データを記憶するとともに、要求に応じて複数の区間波形データを出力する。

20

【0032】

波形タイミング調整部43は、波形データ格納部42と電氣的に接続されており、波形データ格納部42から入力波形データDaが出力されるタイミングを調整(制御)する。図4は、波形タイミング調整部43の機能を模式的に示す図である。図4に示されるように、波形タイミング調整部43は、波形データ格納部42から読み出した複数の区間波形データDD1～DD4を、適切な時間差を与えながら順次出力する。ここで、適切な時間差とは、例えば各区間波形データの時間幅である。この時間幅は、出力波形の時間分解能を規定し、一実施例では1ナノ秒である。波形信号生成部44は、波形タイミング調整部43から出力された複数の区間波形データDD1～DD4を順次入力し、これらの区間波形データDD1～DD4をアナログ信号(電圧信号)である駆動信号Sdに順次変換する。このとき、区間波形データDD1～DD4の変換タイミングの時間差は、波形タイミング調整部43によって付与された時間差と略一致する。

30

【0033】

電流変換部45は、波形タイミング調整部43と電氣的に接続されており、駆動信号Sdを駆動電流Idに変換する。すなわち電流変換部45は、トランジスタを含むアナログ回路によって構成され、電圧信号である駆動信号Sdを、電流信号である駆動電流Idに変換する。このとき生成される駆動電流Idの時間波形は、駆動信号Sdの時間波形と略同一である。なお、電流変換部45には、更にバイアス電流制御部11が接続されている。バイアス電流制御部11は、駆動電流Idに含まれるバイアス成分の大きさを制御する。半導体レーザ素子5は電流変換部45の電流出力端と電氣的に接続されており、電流変換部45から駆動電流Idを受けてレーザ光Laを出力する。レーザ光Laの時間波形は、駆動電流Idの時間波形と略同一である。

40

【0034】

図5は、レーザ装置1Aの動作を示すフローチャートである。また、図6の(a)～(d)は、光パルス波形を模式的に示す図である。これらの図では、光パルス波形を、連続する複数の単位区間の波高値(光強度)の集合として示している。必要に応じて遅延時間

50

T A が設定され、光パルス波形の始点は基準時間から遅延時間 T A だけ遅れる。図 6 の ( a ) ~ ( d ) において、縦軸は光強度を表し、横軸は時間を表す。図 5 及び図 6 を参照しつつ、レーザ装置 1 A の動作及び本実施形態に係るレーザ波形制御方法について説明する。

#### 【 0 0 3 5 】

まず、波形調整部 3 2 は、初期の入力波形データ D a を設定する ( ステップ S T 1 ) 。この初期の入力波形データ D a は、目標波形データ D b に基づいて設定される。一例では、目標波形データ D b がそのまま初期の入力波形データ D a として用いられる。次に、この初期の入力波形データ D a に基づいてドライバ回路 4 が駆動電流 I d を半導体レーザ素子 5 に供給し、半導体レーザ素子 5 がレーザ光 L a を出力する ( 電流供給ステップ S T 2 ) 。図 6 の ( a ) は、初期の入力波形データ D a に基づいて生成されたレーザ光 L a の時間波形を模式的に示している。このレーザ光 L a は光増幅器 7 によって増幅される ( 光増幅ステップ S T 3 ) 。

10

#### 【 0 0 3 6 】

なお、電流供給ステップ S T 2 は、D / A 変換ステップ S T 2 1 と、電流変換ステップ S T 2 2 とを含む。D / A 変換ステップ S T 2 1 では、D / A 変換部 4 6 が、デジタルの入力波形データ D a をアナログの駆動信号 S d に変換する。このとき、前述したように、入力波形データ D a の時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データ D D 1 ~ D D 4 ( 図 4 を参照 ) を、時間差を与えながら駆動信号 S d に順次変換する。電流変換ステップ S T 2 2 では、電流変換部 4 5 が駆動信号 S d を駆動電流 I d に変換する。

20

#### 【 0 0 3 7 】

続いて、光検出部 9 を通じて、増幅後のレーザ光 L b の時間波形 ( 出力波形 ) を検出する ( 光波形検出ステップ S T 4 ) 。図 6 の ( b ) は、検出された出力波形を模式的に示している。多くの場合、増幅後のレーザ光 L b の時間波形は、増幅前のレーザ光 L a の時間波形と異なる。一つの原因としては、光増幅器 7 における励起状態が時間経過に応じて変化することが挙げられる。すなわち、レーザ光 L a の入射直後においては光増幅器 7 が強く励起されており、高い利得をもってレーザ光 L a を増幅する。しかし、レーザ光 L a の入射開始から時間が経過すると、次第に光増幅器 7 の励起強度が低下し、それに伴ってレーザ光 L a の増幅利得も低下する。

30

#### 【 0 0 3 8 】

図 7 及び図 8 は、実際に測定された、増幅前のレーザ光 L a 及び増幅後のレーザ光 L b の各時間波形を示すグラフである。図 7 の ( a ) は、増幅前のレーザ光 L a の時間波形 ( 矩形波 ) を示し、図 7 の ( b ) は、図 7 の ( a ) に示された時間波形を有するレーザ光 L a を増幅した後のレーザ光 L b の時間波形を示す。また、図 8 の ( a ) は、増幅前のレーザ光 L a の時間波形 ( ランプ波 ) を示し、図 8 の ( b ) は、図 8 の ( a ) に示された時間波形を有するレーザ光 L a を増幅した後のレーザ光 L b の時間波形を示す。なお、縦軸は光強度 ( 任意単位 ) を表し、横軸は時間 ( 単位 : ナノ秒 ) を表す。これらの図に示されるように、増幅後のレーザ光 L b の時間波形は、増幅前のレーザ光 L a の時間波形と大きく異なる。

40

#### 【 0 0 3 9 】

再び図 5 を参照する。波形調整ステップ S T 5 では、まず、比較部 3 3 が、検出された出力波形と、目標波形データ D b に示される目標波形 ( 図 6 の ( c ) ) とを比較し、その差分 ( 誤差 ) を出力する ( ステップ S T 5 1 ) 。次に、波形調整部 3 2 は、この差分に基づいて入力波形データ D a の時間波形を調整する。すなわち、波形調整部 3 2 は、この差分がより小さくなるように ( すなわち 0 に近づくように ) 、新たな入力波形データ D a を演算する ( ステップ S T 5 2 ) 。この新たな入力波形データ D a に基づいてドライバ回路 4 が駆動電流 I d を半導体レーザ素子 5 に供給し、半導体レーザ素子 5 がレーザ光 L a を出力する ( 電流供給ステップ S T 2 ) 。図 6 の ( d ) は、新たな入力波形データ D a に基づいて生成されたレーザ光 L a の時間波形を模式的に示している。このレーザ光 L a は光増幅器 7 によって増幅される ( 光増幅ステップ S T 3 ) 。上記のステップ S T 2 ~ S T 5

50

を繰り返すことによって、増幅後のレーザ光 L b の時間波形が目標波形に近づく。こうして生成されたレーザ光 L b が、レーザ装置 1 A の外部へ出力される。

【 0 0 4 0 】

以上の構成を備える本実施形態のレーザ装置 1 A 及びレーザ波形制御方法によって得られる効果について、従来のレーザ装置及び制御方法が有する課題と共に説明する。図 1 1 は、従来のレーザ装置の構成を示すブロック図である。このレーザ装置は、光アイソレータ 6 及び光増幅器 7 を備えている。更に、このレーザ装置は、半導体レーザ素子 1 0 0、ドライバ回路 1 0 1、光増幅器 1 0 2、音響光学光変調器 ( A O M ) 1 0 3、電気光学光変調器 ( E O M ) 1 0 4、コンピュータ 1 0 5、任意パルス発生器 1 0 6、タイミング制御部 1 0 7、及び R F アンプ 1 0 8 を備えている。

10

【 0 0 4 1 】

ドライバ回路 1 0 1 は、半導体レーザ素子 1 0 0 に一定の大きさの駆動電流 I b を供給する。半導体レーザ素子 1 0 0 は、種光源として光強度一定の連続光 L e 1 を出力する。光増幅器 1 0 2 は、例えば光ファイバ増幅器若しくは固体レーザ増幅器であって、この連続光 L e 1 を増幅する。増幅前の連続光 L e 1 の光強度は例えば 1 0 m W であり、増幅後の連続光 L e 2 の光強度は例えば 2 W である。A O M 1 0 3 は、増幅後の連続光 L e 2 の時間幅を規定することにより、パルス光 L p 1 を生成する。パルス光 L p 1 の時間幅は、例えば 1 0 0 ナノ秒である。

【 0 0 4 2 】

コンピュータ 1 0 5 は、目標波形データを予め記憶するか、若しくは目標波形データを生成する。任意パルス発生器 1 0 6 は、コンピュータ 1 0 5 から目標波形データを受け取り、目標波形データに基づいて駆動信号を生成する。任意パルス発生器 1 0 6 は、駆動信号を R F アンプ 1 0 8 に提供する。タイミング制御部 1 0 7 は、任意パルス発生器 1 0 6 が駆動信号を R F アンプ 1 0 8 に提供するタイミングと、A O M 1 0 3 がパルス光 L p 1 を生成するタイミングとを同期させる。R F アンプ 1 0 8 は、駆動信号を増幅して E O M 1 0 4 に提供する。E O M 1 0 4 は、駆動信号により駆動され、パルス光 L p 1 の時間波形を駆動信号に応じた波形に調整して、パルス光 L p 2 を生成する。E O M 1 0 4 は、例えばリチウムニオブ酸 ( L N ) 変調器である。パルス光 L p 2 は、光アイソレータ 6 を通って光増幅器 7 に送られる。光増幅器 7 は、パルス光 L p 2 を増幅する。増幅後のパルス光 L p 2 は、レーザ装置の外部へ出力される。

20

30

【 0 0 4 3 】

図 1 2 は、図 1 1 に示されたレーザ装置に、出力波形に基づいて駆動信号を調整するフィードバック回路を追加した場合の構成を示すブロック図である。図 1 2 に示されるレーザ装置は、図 1 1 に示された各要素に加えて、光分岐部 8、光検出部 9、比較部 1 0 9、及び波形調整部 1 1 0 を更に備えている。光分岐部 8 は、光増幅器 7 による増幅後のパルス光 L p 2 の一部を分岐する。光検出部 9 は、分岐された一部のパルス光 L p 2 の光強度を検出する。比較部 1 0 9 は、コンピュータ 1 0 5 から出力された目標波形データと、検出したパルス光 L p 2 の時間波形とを比較し、その差分を出力する。波形調整部 1 1 0 は、この差分が 0 に近づくように、駆動信号を調整する。

【 0 0 4 4 】

図 1 1 及び図 1 2 に示されるレーザ装置では、ファイバレーザ若しくは固体レーザから出力された連続光 L e 2 を E O M 1 0 4 によって任意の波形に整形する。ファイバレーザ及び固体レーザの寸法は大きくなり易く、また、E O M 1 0 4 では温度変化による特性の変動 ( 温度ドリフト ) が大きいので、E O M 1 0 4 の温度ドリフトを補償するための構成が別途必要となる。これらは、レーザ装置の小型化を妨げる要因となる。

40

【 0 0 4 5 】

本実施形態では、連続光を出力するファイバレーザ若しくは固体レーザではなく、半導体レーザ素子 5 を被増幅光の光源として用いている。そして、半導体レーザ素子 5 を駆動するための駆動信号 S d の時間波形を、光波形検出部 1 0 ( 光波形検出ステップ S T 4 ) により検出した増幅後のレーザ光 L b の時間波形に基づいて調整する。これにより、半導

50

体レーザ素子 5 から出力されるレーザ光 L a の時間波形を調整して、増幅後のレーザ光 L b の時間波形を目標波形に近づけることができる。また、波形演算部 3 といった電子回路、及び半導体レーザ素子 5 のサイズは、ファイバレーザ若しくは固体レーザ、及び E O M のサイズと比較して格段に小さい。更に、半導体レーザ素子 5 の温度ドリフトに関しては、ペルチェ素子等によって半導体レーザ素子 5 の温度を一定に維持すれば足りる。

#### 【 0 0 4 6 】

以上のことから、本実施形態によれば、従来装置及び方法と比較して、装置寸法の小型化が可能となる。本発明者が作製した実験設備の例では、幅及び奥行きを本実施形態のレーザ装置 1 A と従来装置とでほぼ同等とした場合、従来装置の高さが 1 5 0 0 mm であるのに対し、本実施形態のレーザ装置 1 A の高さは 8 8 mm であり、従来装置よりも格段に小さくなった。

10

#### 【 0 0 4 7 】

また、連続光 L e 2 を E O M 1 0 4 により整形する従来方式では、光透過率を調整することにより出力波形を整形するが、光透過率を厳密に 0 にすることは難しく、光強度を厳密に 0 としたい区間においても僅かな光強度が残存してしまう。これに対し、本実施形態では、半導体レーザ素子 5 を駆動するための駆動信号 S d の時間波形を調整することにより出力波形を整形する。従って、駆動電流 I d が閾値より小さくなるように駆動信号 S d を制御すれば、半導体レーザ素子 5 からレーザ光 L a が出力されないで、光強度を厳密に 0 とすることが容易にできる。

#### 【 0 0 4 8 】

また、E O M 1 0 4 を用いて光パルス波形を整形する方式と比較して、半導体レーザ素子 5 への駆動電流 I d を整形する本実施形態の方式によれば、短い時間分解能で出力波形を制御することができる。

20

#### 【 0 0 4 9 】

また、E O M 1 0 4 では、入力電圧（駆動信号）と光透過率とが互いに非線形の関係にある。従って、波形調整部 1 1 0 では、光増幅器 7 において生じる時間波形の変化に加えて、E O M 1 0 4 での時間波形の歪みを補償するための計算、又は校正表等が必要になり、計算が複雑化する。これに対し、本実施形態では、半導体レーザ素子 5 の光出力強度と駆動電流 I d とが互いにほぼ線形の関係にあるので、波形調整部 3 2 における計算は比較的容易である。

30

#### 【 0 0 5 0 】

また、E O M 1 0 4 を用いて光パルス波形を整形する方式では、出力可能なパルス光 L p 1 の時間幅が例えば 1 0 0 ナノ秒といった短時間に制限される。これに対し、本実施形態では、半導体レーザ素子 5 がそのような時間制限を有しないので、より長時間の光パルスを生成可能である。

#### 【 0 0 5 1 】

図 9 及び図 1 0 は、半導体レーザ素子 5 から出力されるレーザ光 L a の時間波形の例を示すグラフである。なお、縦軸は光強度（任意単位）を表し、横軸は時間（単位：ナノ秒）を表す。図 9 の（ a ）は、半値全幅が 4 ナノ秒のガウス波形を示している。図 9 の（ b ）は、半値全幅が 3 2 ナノ秒のガウス波形を示している。図 1 0 の（ a ）は、半値全幅が 1 2 0 ナノ秒の矩形波を示している。図 1 0 の（ b ）は、半値全幅が 4 ナノ秒のランプ波形を示している。これらのように、本実施形態のレーザ装置 1 A によれば、任意の様々な時間波形を生成することができる。

40

#### 【 0 0 5 2 】

また、本実施形態のように、波形演算部 3 は（波形調整ステップ S T 5 では）、光波形検出部 1 0 により検出された増幅後のレーザ光 L b の時間波形と目標波形との差分が 0 に近づくように、入力波形データ D a の時間波形を調整してもよい。これにより、増幅後の時間波形を目標波形に更に精度良く近づけることができる。この場合、波形演算部 3 は、目標波形を示すデータを予め記憶する記憶部（コンピュータ 3 1 のメモリ）を有してもよい。

50

## 【 0 0 5 3 】

また、本実施形態のように、ドライバ回路 4 ( 電流供給ステップ S T 2 ) は、デジタルの入力波形データ D a をアナログの駆動信号 S d に変換する D / A 変換部 4 6 ( D / A 変換ステップ S T 2 1 ) と、駆動信号 S d を駆動電流 I d に変換する電流変換部 4 5 ( 電流変換ステップ S T 2 2 ) と、を有してもよい。そして、D / A 変換部 4 6 ( D / A 変換ステップ S T 2 1 ) は、入力波形データ D a の時間波形を分割してなる連続する複数の区間波形データ D D 1 ~ D D 4 を、時間差を与えながら駆動信号 S d に順次変換してもよい。これにより、駆動信号 S d をより高速化して出力波形の時間分解能を高めることができる。

## 【 0 0 5 4 】

本発明によるレーザ装置及びレーザ波形制御方法は、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、上記実施形態では目標波形データを波形演算部 3 において記憶しているが、目標波形データはレーザ装置 1 A の外部から入力されてもよい。また、必要に応じて光アイソレータ 6 を省いてもよい。

## 【 符号の説明 】

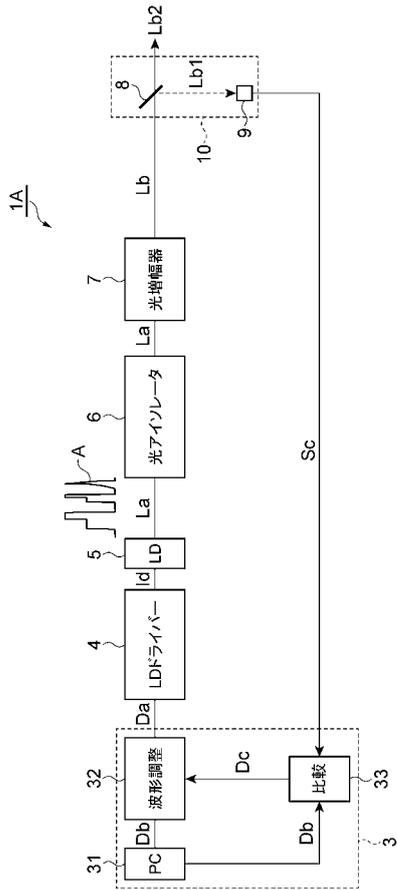
## 【 0 0 5 5 】

1 A ... レーザ装置、 3 ... 波形演算部、 4 ... ドライバ回路、 5 ... 半導体レーザ素子、 6 ... 光アイソレータ、 7 ... 光増幅器、 8 ... 光分岐部、 9 ... 光検出部、 1 0 ... 光波形検出部、 1 1 ... バイアス電流制御部、 1 2 ... バンドパスフィルタ、 1 3 ... 光ファイバコネクタ、 1 4 ... コリメータレンズ、 3 1 ... コンピュータ、 3 2 ... 波形調整部、 3 3 ... 比較部、 4 1 ... コントロール基板、 4 1 a ... C P U、 4 1 b ... 高速 D A C インターフェース、 4 2 ... 波形データ格納部、 4 3 ... 波形タイミング調整部、 4 4 ... 波形信号生成部、 4 5 ... 電流変換部、 4 6 ... D / A 変換部、 6 1 , 6 2 , 6 3 , 6 4 ... 光アイソレータ、 7 1 ... 光ファイバ増幅器、 7 2 , 7 3 ... 固体レーザ増幅器、 D b ... 目標波形データ、 D c ... 差分データ、 D D 1 ~ D D 4 ... 区間波形データ、 F 1 ~ F 3 ... 光ファイバ、 I d ... 駆動電流、 L a , L b ... レーザ光、 S c ... 光強度信号、 S d ... 駆動信号、 T A ... 遅延時間。

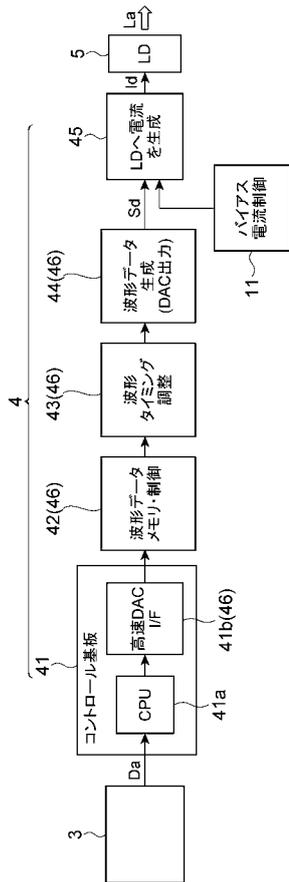
10

20

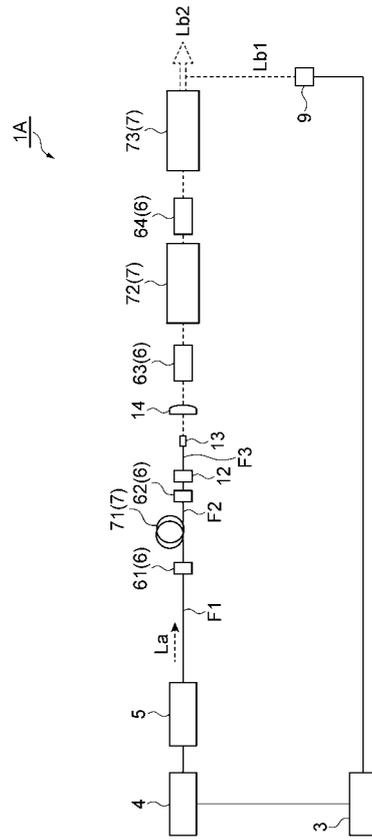
【図1】



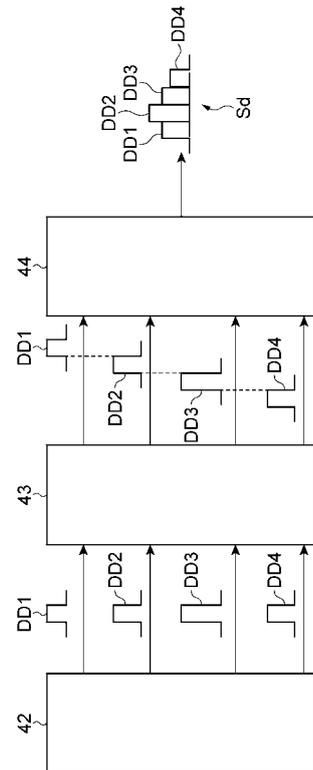
【図3】



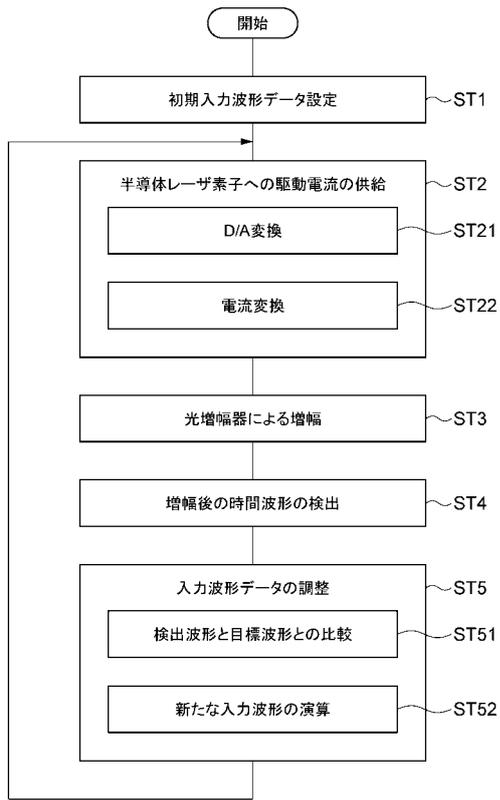
【図2】



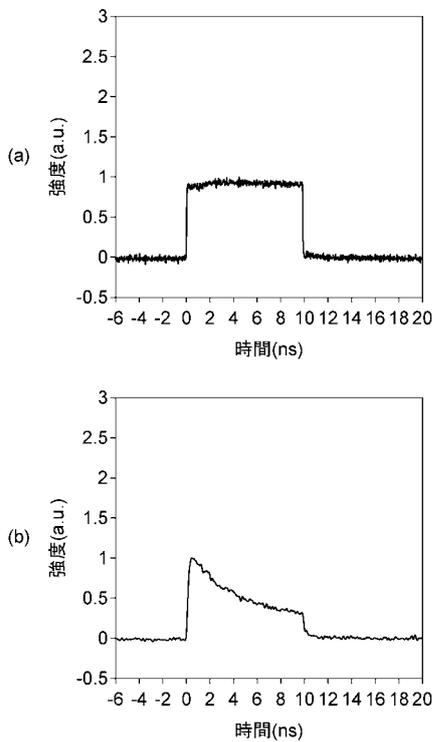
【図4】



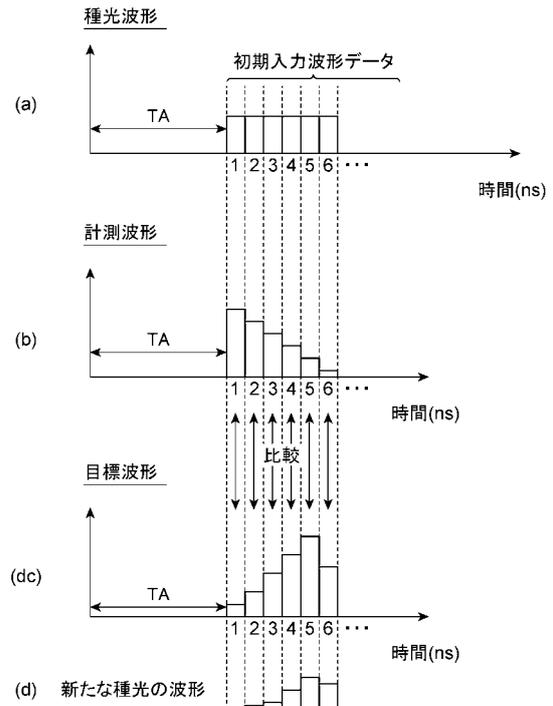
【 図 5 】



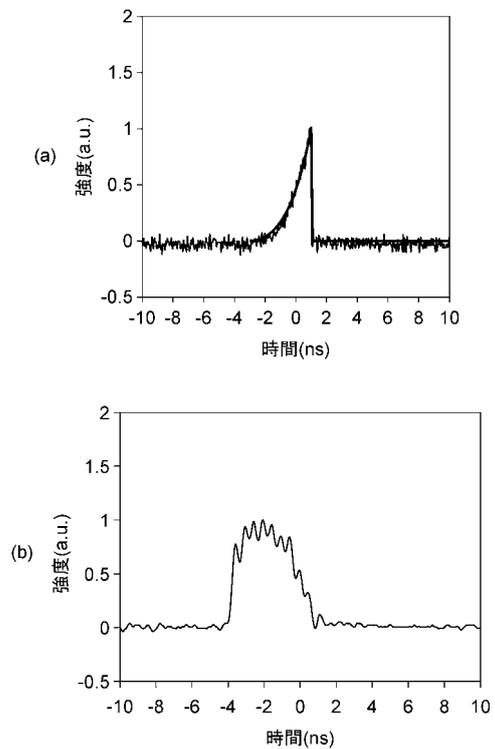
【 図 7 】



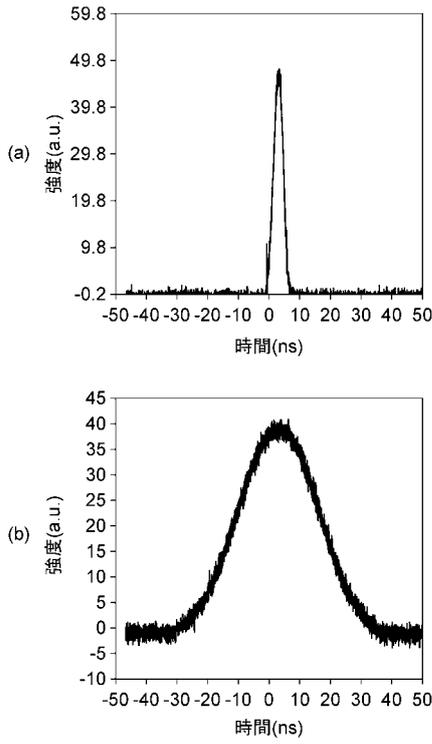
【 図 6 】



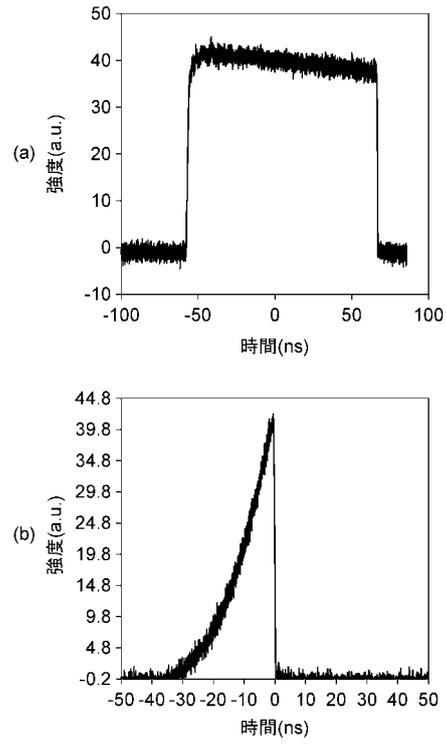
【 図 8 】



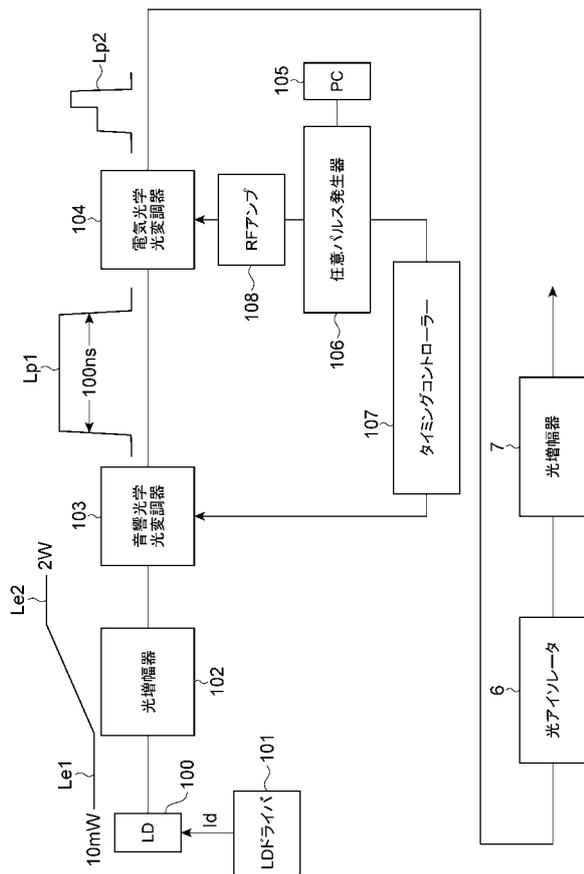
【 図 9 】



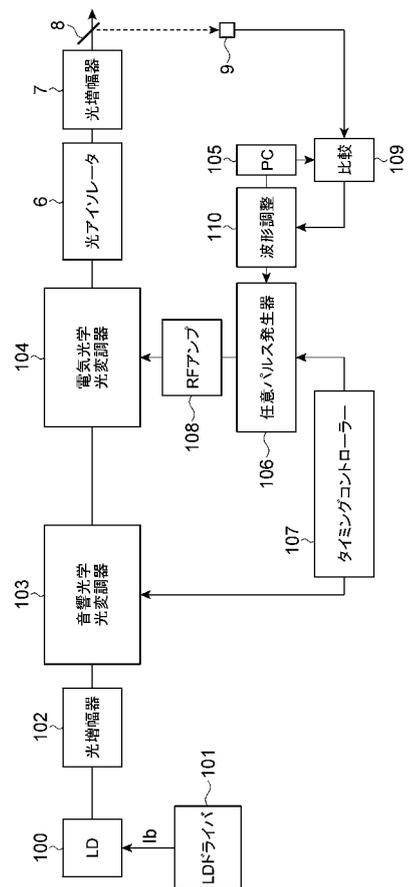
【 図 1 0 】



【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 加藤 義則

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

(72)発明者 川嶋 利幸

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

Fターム(参考) 5F172 AM08 DD01 EE13 NN20 NN26 NP02 NR13 NR28 ZA02

5F173 SA09 SC10 SE01 SF06 SF40 SF43 SF74