

(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2012-156175
(P2012-156175A)

(43) 公開日 平成24年8月16日(2012.8.16)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)
H O 1 S 3/067 (2006.01) H O 1 S 3/06 B 5 F 1 7 2

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2011-11656 (P2011-11656)
(22) 出願日 平成23年1月24日(2011.1.24)

(71) 出願人 000005821
パナソニック株式会社
大阪府門真市大字門真1006番地
(74) 代理人 100109667
弁理士 内藤 浩樹
(74) 代理人 100109151
弁理士 永野 大介
(74) 代理人 100120156
弁理士 藤井 兼太郎
(72) 発明者 山崎 隆史
愛媛県東温市南方2131番地1 パナソ
ニックヘルスケア株式会社内
(72) 発明者 水内 公典
愛媛県東温市南方2131番地1 パナソ
ニックヘルスケア株式会社内
最終頁に続く

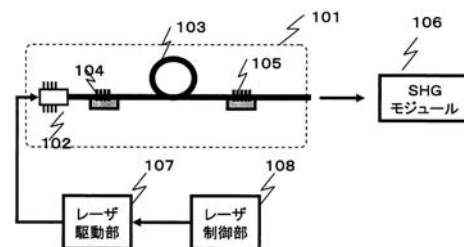
(54) 【発明の名称】 ファイバレーザ光源装置およびそれを用いた波長変換レーザ光源装置

(57) 【要約】

【課題】パルス発光開始から安定したパルス光を出力することができるファイバレーザ光源装置を提供する。

【解決手段】レーザ活性物質を含むファイバとその両端にファイバグレーティングを設けたレーザ共振器と、このレーザ共振器の一端に励起光を入射する励起用レーザ光源と、この励起用レーザ光源から励起光が出力するための電流を供給するレーザ駆動部と、このレーザ駆動部から出力する電流を制御するレーザ制御部と、を備え、前記レーザ制御部は、前記レーザ共振器からパルス光を出力する直前に、前記レーザ共振器がレーザ光を出力するための閾値電流より大きい第1の電流を与え、前記第1の電流を停止した後に休止期間を設けた後、パルス光を出力するための前記第1の電流より大きい第2の電流を前記励起用レーザ光源に与えるレーザ制御部と、から成るファイバレーザ光源装置。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザ活性物質を含むファイバとその両端にファイバグレーティングを設けたレーザ共振器と、

このレーザ共振器の一端に励起光を入射する励起用レーザ光源と、

この励起用レーザ光源から励起光が出力するための電流を供給するレーザ駆動部と、

このレーザ駆動部から出力する電流を制御するレーザ制御部と、を備え、

前記レーザ制御部は、前記レーザ共振器からパルス光を出力する直前に、前記レーザ共振器がレーザ光を出力するための閾値電流より大きい第 1 の電流を与え、

前記第 1 の電流を停止した後に休止期間を設けた後、

パルス光を出力するための前記第 1 の電流より大きい第 2 の電流を前記励起用レーザ光源に与えるレーザ制御部と、から成るファイバレーザ光源装置。

10

【請求項 2】

前記第 1 の電流を与える時間は、前記レーザ共振器が前記第 1 の電流を与えてから連続光を出力開始するまでの時間より長い請求項 1 に記載のファイバレーザ光源装置。

【請求項 3】

前記休止期間は、前記レーザ共振器内部の緩和振動が消滅する時間より長い請求項 1 に記載のファイバレーザ光源装置。

【請求項 4】

前記休止期間は、前記第 2 の電流により周期的な連続パルス光を出力する際に、前記レーザ制御部が前記レーザ駆動部を停止する時間とほぼ等しい請求項 1 に記載のファイバレーザ光源装置。

20

【請求項 5】

請求項 1 に記載のファイバレーザ光源装置と、

このファイバレーザ光源装置から出力されるレーザ光を波長変換して高調波を出力する波長変換部と、を備えた波長変換レーザ光源装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、パルス発光開始時の初期パルスから安定したパルス光を出力できるファイバレーザ光源装置およびそれを用いた波長変換レーザ光源装置に関するものである。

30

【背景技術】

【0002】

1 μm 帯の波長の光を発生するレーザ光源には、Nd:YAG レーザ、Nd:YVO₄ レーザ等の固体レーザが主流であり、これらを用いたレーザ加工機やこれらの光を基本波とした可視光源などが実現されている。ところが、大出力のレーザ出力を得るためには、レーザ媒質の冷却が必要となり装置が大型になる。そこで、簡単な冷却で小型化が実現可能な W 級の高出力を持つファイバレーザ光源が求められている。

【0003】

このファイバレーザ光源の基本動作について説明する。レーザ活性物質を含むファイバの両端側にファイバグレーティングを設けて一対の反射ミラーを形成する共振器を作り、励起用レーザ光源からの励起光をファイバの一端から入射する。この励起光はファイバに含まれるレーザ活性物質で吸収されると、レーザ活性物質が自然発光を発生する。ファイバ内部で発生した自然発光は、共振器の中を何度も反射して往復する間に、位相のそろった光となり、レーザ活性物質により増幅されて光強度が増加する。同時に、ファイバグレーティングにより波長選択されるので、波長のそろったレーザ発振となる。なお、ファイバとファイバグレーティングとは、接続部で融着接続されており、励起用レーザ光源は電流駆動される。

40

【0004】

高いピークパワーを持つパルスレーザ光源であれば、穴あけやマーキングなどのレーザ

50

加工、高効率波長変換などさらに用途が広がる。そのため、Qスイッチを利用したファイバレーザによるパルス光発生装置がある。これは、内部に希土類をレーザ活性物質として添加したファイバの両端にファイブラッググレーティング（以下、「FBG」とする）を設け、2つのFBG間でレーザ共振器を構成する。さらに共振器内に設けた過飽和吸収体よりレーザの過飽和吸収特性を利用してパルス発生が行われている。過飽和吸収特性によりQスイッチ動作が可能となり、モードロックを利用することでファイバレーザ光源の出力端から超短パルスレーザ光を発生させている（例えば、特許文献1を参照。）。

【0005】

また、ファイバを用いた光源でパルス発光させる方法としては、変調された種光源をファイバアンプで増幅する方法がある。このような例として変調された種光源をファイバアンプで増幅する構成として、ファイバレーザ発振器（MO部）とファイバレーザ増幅器（PA部）とを直列に接続して一定出力の高出力パルス列を発生するファイバレーザ光源装置において、発振器と増幅器との励起開始のタイミングを工夫することにより、光パルスが発生する最初の段階から安定な一定出力の光パルス列が得られるとしている（例えば、特許文献2、及び3を参照。）。このような構成では、Qスイッチや増幅器など高価で複雑な光学構成が必要となり、大型で高価な装置となる。

10

【0006】

また、同様のファイバとこれを挟む1組のFBGとで構成されるファイバレーザ光源装置において、連続光出力時に励起用のレーザ光源の入力パターンを最適化して矩形形状の光パルスの先頭にサージパルスを伴わないようにして安定な矩形形状の光パルスを生成する技術が知られている（例えば、特許文献4を参照。）。このような構成により、サージパルスがないディスプレイや各種の分析などの用途に最適な安定な矩形形状の光パルスを得ることができるとしている。さらに、励起用のレーザ光源を変調することで利得スイッチを利用したパルス発生できるため、複雑な光学構成が不要でシンプルな構成で安価な装置が実現できる。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2005-174993号公報

【特許文献2】特開2007-35696号公報

【特許文献3】特開2008-181943号公報

【特許文献4】特開2007-142380号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、従来の構成では、パルス発光開始から安定したパルス光を出力することができなかったことであった。パルス光とは、短時間の間に急峻な変化をする光であって、連続光出力よりも高いパワーの光を出力する。そのため、この高い光出力を得るためには、ファイバレーザ光源のレーザ共振器にエネルギーを急激に溜め込んで、このエネルギーが過飽和状態から、発振（励起）状態に遷移するときに、レーザ共振器に励起光を急激に注入しても、パルス発光開始から安定したパルス光を出力できなかった。

40

【0009】

本発明は、前記従来の課題を解決するもので、本発明はパルス発光開始から安定したパルス光を出力することができるファイバレーザ光源装置を提供することが目的である。

【課題を解決するための手段】

【0010】

前記従来の課題を解決するために、本発明のファイバレーザ光源装置およびそれを用いた波長変換レーザ光源装置は、レーザ活性物質を含むファイバとその両端にファイバグレーティングを設けたレーザ共振器と、このレーザ共振器の一端に励起光を入射する励起用レーザ光源と、この励起用レーザ光源から励起光が出力するための電流を供給するレーザ

50

駆動部と、このレーザ駆動部から出力する電流を制御するレーザ制御部と、を備え、前記レーザ制御部は、前記レーザ共振器からパルス光を出力する直前に、前記レーザ共振器がレーザ光を出力するための閾値電流より大きい第1の電流を与え、前記第1の電流を停止した後に休止期間を設けた後、パルス光を出力するための前記第1の電流より大きい第2の電流を前記励起用レーザ光源に与えるレーザ制御部と、から成ることを特徴としたものである。

【発明の効果】

【0011】

本発明のファイバレーザ光源装置およびそれを用いた波長変換レーザ光源装置によれば、パルス発光開始から安定したパルス光を出力することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】利得スイッチを用いたパルス光発生の原理図

【図2】ファイバレーザ光源における励起光とパルス光発生の関係を示す図

【図3】ファイバレーザ光源におけるパルス光発生を説明するモデル図

【図4】本発明の実施例における光源装置の構成図

【図5】(a)本発明の実施例における光源装置に入力する電流波形を示す図 (b)本発明の実施例における光源装置から出力する光出力波形を示す図

【図6】本発明の実施例における予備励起出力とパルス出力のばらつきとの関係を示す図

【図7】(a)発光停止時間とパルス光出力の関係を示す図 (b)発光停止時間と光遅延時間の関係を示す図

20

【図8】電流立ち上がり時間に対するパルス光出力特性の関係を示す図

【図9】本発明の実施の形態における励起光とパルス光発生の関係を示す図

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

(利得スイッチをファイバレーザ光源に用いる際に生じる問題)

まず、レーザにおける利得スイッチによるパルス光発生の原理について説明する。図1(a)に示すのはレーザ共振器の概略図であり、レーザ媒質202を2つのミラー204、205で挟みレーザ共振器を構成している。このレーザ共振器に、外部から励起光201を入射して、レーザ発振した出力光203を得る。ファイバレーザ光源では、レーザ媒質202がドープファイバに相当し、ミラー204、205がファイバグレーティングに相当する。

30

【0014】

このレーザ共振器に、図1(b)に示すようなステップ状に強度変調された励起光201をレーザ媒質202に入力すると、レーザ媒質内は、図1(c)に示すように時間とともに内部エネルギーが増加する。レーザ媒質がレーザ発振していなければ、内部エネルギーはレーザ共振器のレーザ発振閾値を超えて過飽和状態となる。この過飽和状態でレーザ発振が始まると蓄積されたエネルギーが一度に放出されるため、図1(d)に示すように出力光強度P1のパルス光出力が発生する。これが利得スイッチによるパルス光発生の原理である。

40

【0015】

利得スイッチにおいては、励起の開始時間からパルス光発生するまでにエネルギー蓄積の時間 t_1 を必要とする。以下、この時間 t_1 を光遅延時間と呼ぶ。このような利得スイッチを利用したファイバレーザ光源を用いることで、簡単な構成でレーザパルス光を発生できる。

【0016】

ところが、利得スイッチをファイバレーザ光源に用いてパルス発光を行うと、従来知られていなかった2つの問題が明らかになった。第1の問題は、パルス発光開始時の初期パルスが発生しない、もしくはその出力が極端に低下するという現象(ファーストパルス問題)である。この初期パルスの出力変動は、固体レーザ光源においても見られるが、こ

50

の場合は、ファイバレーザ光源と反対に初期パルス出力が増大する。従って、ファイバレーザ光源の初期パルス出力変動の発生メカニズムが異なる。

【0017】

第2の問題は、レーザ共振器に入射するエネルギーにより、励起光とパルス光出力との光遅延時間 t_1 が変化する現象である。この光遅延時間が変化すると、パルス光出力のタイミングが変化する。これは、固体レーザ光源では見られない現象である。

【0018】

ファイバレーザ光源が固体レーザ光源と異なる点は、共振器長が非常に長い点である。固体レーザ光源の共振器長は最大でも1m程度であり、一般には数10cm程度のものが使用されている。これに対して、ファイバレーザ光源の共振器長は10m以上なので、固体レーザ光源に比べて共振器内部に蓄積されたエネルギーがレーザの発生に与える影響が異なる。

まず、第1の問題であるファーストパルスについて説明する。

【0019】

ファイバレーザ光源のレーザ共振器（以下、ファイバ共振器という）に一定の励起光出力を繰り返し入射したときに発生するパルス光出力の関係を図2に示す。このファイバ共振器に入力する励起光出力を20W、パルス間隔50 μ s、デューティ10%で制御したときを例に説明する。

【0020】

図2において、縦軸に、図2(a)は、ファイバ共振器に入射する励起光出力を示し、図2(b)は、入射した励起光に対してファイバ共振器から発生するパルス光出力を示し、横軸は、時間を示している。励起光は、一定の励起光を一定時間発生したあと、一定時間停止する。この一連の動作をする励起光が、パルス間隔Tで、ファイバ共振器に入射される。この励起光を繰り返しファイバ共振器に入射することによって、ファイバレーザ光源からパルス光が発生する。なお、励起光とパルス光出力は、n番目に入射した励起光 E_n とそのときに発生したパルス光出力 P_n がそれぞれ対応している。

【0021】

図2に示すように、ファイバ共振器に励起光を入射すると、パルス発光開始の励起光 E_1 、 E_2 では、パルス光 P_1 、 P_2 が発生せず、励起光 E_3 、 E_4 から微小なパルス光 P_3 、 P_4 が発生し、その後、励起光 E_5 、 E_6 から安定した出力のパルス光 P_5 、 P_6 が発生することがわかった。

【0022】

このメカニズムを、図2と図3を用いて説明する。図3は、ファイバ共振器内部における蓄積されたエネルギーの分布を示したものである。横軸は距離で、ファイバ共振器の入射部から出射部までの位置を示す。縦軸はファイバ共振器内に蓄積される反転分布のエネルギーである。励起光の矢印は入射部側からファイバ共振器内に一定の励起光が入力している状態を示し、パルス光の矢印はパルスレーザが発生している状態を示している。

【0023】

さて、図2(a)に示すように、一定の励起光がパルス間隔Tでファイバ共振器に入射されるときに発生するパルス光出力は次のように発生する。励起光 E_1 が入射されると、図3(a)に示すように、ファイバ共振器内部でエネルギーが蓄積される。その後、励起光 E_1 が停止すると、ファイバ共振器の励起光吸収係数が高いので、ファイバ内部で励起光が減衰し、蓄積エネルギーも入射側から出射側に向かって減少する(図3(b))。すなわち、励起光 E_1 は、ファイバ内部で減衰してしまいレーザ発振状態に至らず、結果としてパルス光 P_1 は、発生しない。

【0024】

次に励起光 E_2 がファイバ共振器に入射されると(E_1 入射から50 μ s後)、励起光 E_1 で残留した直前のエネルギーを加えて、ファイバにエネルギーが蓄積される。励起光 E_2 停止とともに、このエネルギーは減衰しレーザ発振状態に至らず、パルス光 P_2 は発生しない。このときの残留エネルギーは、励起光 E_1 停止時より、大きいエネルギーがフ

10

20

30

40

50

ファイバ共振器内に残る。次に励起光 E 3 がファイバ共振器に入射されると (E 1 入射から 1 0 0 μ s 後)、励起光 E 2 で残留した直前のエネルギーを加えて蓄積エネルギーがファイバ共振器の閾値を超えるため、微小なパルス光 P 3 が発生する (図 3 (c))。このパルス光 P 3 は、ファイバ共振器がレーザ発振状態になったために生じる。このとき、励起光や出力するパルス光がファイバ共振器内部を伝搬するため、エネルギー分布がファイバ共振器全体に広がる。すなわち、レーザ発振によってファイバ共振器内部に蓄積されたエネルギー分布が変化し、その後、励起光停止とともに、減衰する (図 3 (d))。

【 0 0 2 5 】

さらに、励起光 E 4 が入射されると (E 1 入射から 1 5 0 μ s 後)、直前の E 3 の残留エネルギーを加えてレーザ発振状態になるため、パルス光 P 4 の出力は、直前のパルス光 P 3 よりも大きいパルス光が出力される。このとき励起光 E 4 停止の残留エネルギーは、励起光 E 3 停止時より、大きいエネルギーがファイバ共振器内に残る。このように励起光を繰り返し入射すると、E 1 入射から 2 0 0 μ s 後の励起光 E 5 は、P 4 より大きなパルス光 P 5 を発生する。このときの共振器内部の状態は図 3 (e) となる。

【 0 0 2 6 】

そして、励起光 E 5 を停止し、次の励起光 E 6 を入射する直前のファイバ共振器内部の残留エネルギーと、励起光 E 5 を入射する直前の残留エネルギーとがほぼ同じ状態になり (図 3 (f))、パルス光 P 5 と同等なパルス光 P 6 が発生する。その後、繰り返し励起光を入射すれば、励起光を入射する直前の残留エネルギーは飽和し、その飽和したエネルギーを加えてレーザ発振するため、安定したパルス光が繰り返し発生する (E n、P n)

【 0 0 2 7 】

すなわち、パルス発光開始すると、励起光がファイバ共振器に入射されるが、ファイバ共振器の損失が大きくレーザは発振状態に至らない。そのため、パルス発光開始の初期パルスからパルス光は発生しない。その後、励起光が繰り返し入射され、直前の残留エネルギーを加えてレーザ発振状態となり、利得スイッチによるパルス光が発生する。さらに励起光が繰り返し入射されることにより、直前のエネルギー分布が飽和することで、この飽和したエネルギーを加えてレーザ発振するため、安定した出力のパルス光を繰り返し発生させることができる。

【 0 0 2 8 】

次に、第 2 の問題である、ファイバ共振器に入射するエネルギーによりパルス光出力タイミングが変化するメカニズムを説明する。パルス光出力タイミングの変化も、第 1 の問題と同様にファイバ共振器内部のエネルギーに起因する。ファイバ共振器の励起光吸収係数が高いので、ファイバ内部で励起光が減衰するため、ファイバ共振器内部に蓄積された内部エネルギーは低下する。内部エネルギーが低下すると、レーザ発振状態に至るまでの時間がかかり、パルス発生、すなわち光遅延時間は長くなる。この光遅延時間は、励起光強度やファイバ共振器内部のエネルギー分布に依存して変化する。

【 0 0 2 9 】

以上が、利得スイッチをファイバレーザ光源に用いてパルス発光を行う際に生じる問題の発生メカニズムである。

以下、本発明の実施の形態にかかる光源装置について、図面を参照しながら説明する。なお、図面で同じ符号が付いたものは、説明を省略する場合もある。

【 0 0 3 0 】

(実施の形態 1)

図 4 は、本発明の実施の形態 1 における光源装置の構成図を示す。図 4 に示すように、ファイバレーザ光源 1 0 1 は、励起用レーザ光源 1 0 2 と Y b 添加ダブルクラッドファイバを用いたファイバ 1 0 3 と、このファイバの両端に F B G 1 0 4、1 0 5 を融着接続することでファイバ共振器とした構成にしている。ファイバ 1 0 3 のコア径は 6 μ m、長さ 1 6 m 程度とした。励起用レーザ光源 1 0 2 は、波長 9 1 5 n m の半導体レーザを用い、ファイバ共振器の片方の F B G 1 0 4 に励起光が入力できるように配置した。励起光を入

力することにより、ファイバ共振器内で共振して波長1000nm～1100nmのレーザ出力光がFBG105から発生する。共振波長はFBGの反射波長で選択すれば良い。

【0031】

本実施の形態では、波長1064nmのレーザ出力光を発生できるFBGの反射波長を選んだ。このレーザ出力光をSHGモジュール106に導けば、波長変換された短波長光がSHGモジュール106より出力される。ファイバ共振器から発生するレーザ出力光は、レーザ駆動部107から出力される電流を励起用レーザ光源102に入力することにより発生する。このレーザ駆動部は、出力する電流をレーザ制御部108により、制御される。

【0032】

本発明の特徴は、励起用レーザ光源102を駆動する電流の与え方にある。すなわち、レーザ制御部108がレーザ駆動部107を制御する方法である。図5は、励起用レーザ光源102に入力される電流波形(図5(a))と、このときファイバレーザ光源101から出力される光出力波形(図5(b))の模式図を示している。

図5において、まず、レーザ制御部108は、レーザ駆動部107を介して励起用レーザ光源102に、第1の電流である予備発光電流を与えて、ファイバレーザ光源101から連続光の予備出力を発光させ(予備発光工程)、次にこの第1の電流を停止した後に休止期間を設けて(発光停止工程)、引き続き、第2の電流であるパルス発光電流を与えて利得スイッチによるパルス光を出力させる(パルス発光工程)という特徴がある。

【0033】

図5において、予備発光工程の第1の電流は、ファイバレーザ光源101から低出力で連続光を出力させるための電流であり、ファイバ共振器がレーザ発振するために必要な閾値電流以上の電流を励起用レーザ光源102に与える必要がある。発光停止工程は、利得スイッチを行なうために、ファイバ共振器のレーザ発振を止めて、ファイバ共振器内部にエネルギーを蓄積しておく工程である。この発光停止工程では、電流をゼロまたは励起用レーザ光源102が励起光出力する閾値電流未満にする。その後、パルス発光工程で第2の電流を励起用レーザ光源102に与えることで、ファイバ共振器は、直前の蓄積されたエネルギーを加えて利得スイッチによるパルス発光ができるため、パルス発光開始から安定した出力のパルス光が得られる。

【0034】

図2、3で説明したように、ファイバレーザ光源では共振器長が長く、さらにファイバの励起光吸収係数が高いので、ファイバ内部で励起光が減衰する。そのため初期パルスでは、ファイバ共振器がパルス発生するために必要なエネルギーがファイバ内部を伝搬しないため、出力されるパルス光は、光遅延時間が長く出力も低い。この問題を解決するのが、予備発光工程と発光停止工程である。これらの工程で、ファイバ共振器内部にエネルギーを蓄積することができるので、パルス発光工程の初期パルスのエネルギー減衰を抑制することができる。パルス発光開始から安定したパルス光出力を発生できる。

以下に、本発明のパルス光源における電流駆動方法を各工程に分けて詳細に説明する。

【0035】

<予備発光工程>

予備発光工程では、前述したように連続光を発生することでレーザ活性媒質へエネルギーを蓄積する工程である。図5において、予備発光電流を励起用レーザ光源102に入力し、ファイバレーザ光源101から連続光を出力させる。予備発光工程に必要なのは、安定した連続光の出力であり、ファイバ共振器をレーザ発振状態にさせる必要がある。このためのファイバ共振器に入力される励起光強度(この励起光強度は、図5の予備発光電流に相当する)がある値以上であれば、励起光強度によらずパルス発光工程でのパルス光出力は変化しない。しかし、この励起光強度が低いと、パルス発光工程でのパルス光出力に影響を与える。これを、図6を利用して説明する。

【0036】

図6は予備発光工程における励起用レーザ光源102の出力とパルス発光工程でのパルス

10

20

30

40

50

ス発光開始の初期パルス光出力バラツキの関係を示したものである。縦軸はパルス発光工程での相対的なパルス出力バラツキであり、数字0はパルス光が発光しない状態を示し、数字100は、目標のパルス光出力を示す。矢印の長さは、その間のいずれかのパルス光出力が発生することを表す。

【0037】

図6に示すように、ファイバ共振器がレーザ発振する閾値以下の励起光強度の予備発光電流を与えると、パルス発光工程でのパルス出力が大きくばらつく。予備発光強度がこの閾値を超えると徐々にパルス光出力のバラツキが減る。予備発光強度が約2Wを超えると、バラツキが見られず、その後は予備発光電流の値によらず、一定のパルス出力が得られた。これは閾値近傍ではレーザ発振が不安定な状態で、エネルギー蓄積が不十分になるためと考えられる。

10

【0038】

そのため、予備発光工程では、安定なレーザ発振が得られる予備発光電流と予備発光時間が必要となる。一方、励起光強度は2Wを超える値で可変しても、パルス光出力は変化しなかった。この結果よりレーザ発振により蓄えられるエネルギーは励起光強度2W程度で飽和すると考えられる。以上の結果、予備励起パワーは2W程度以上の励起光強度が望ましい。

【0039】

また予備発光工程において、連続光が発生するまでの時間は予備発光電流の値に依存した。電流値が小さいと連続光が出力するまでの時間が長くなった。安定なパルス光出力を得るには、予備発光工程における安定な連続光発生が必要となる。このため、予備発光工程の時間は、電流印加開始から安定な連続発光が始まる時間より長くすることが望ましい。具体的には、第1の電流である予備発光電流は、図5(a)において、励起用レーザ光源102が2W以上出力する値とし、予備発光時間は、ファイバ共振器がレーザ発振し連続光が安定して出力される時間(例えば、1ms以上)に設定することが望ましい。また、例えば、図4において、ファイバレーザ光源101から出力されるレーザ光をサンプリングミラーにより分離し、その分離した一部の光を光検出器によりモニターする構成とし、所望の連続光でレーザ制御する構成としてもよい(図示せず)。

20

【0040】

<発光停止工程>

発光停止工程は、初期パルスが発生させるために、直前の予備発光工程でのレーザ発振を停止し、ファイバ共振器内部にエネルギーを蓄積させる工程である。次のパルス発光工程の直前には、ファイバ共振器内部のレーザ発振や緩和振動の無い状態、すなわち内部エネルギー変動の無い状態が一定時間以上必要である。このため、発光停止工程が必要になる。ここでは初期パルスが発生するためのエネルギーを蓄えておく必要がある。このエネルギーは、ファイバ共振器で吸収されるため、図5において、発光停止時間が変化することで、そのエネルギーも変化し、パルス光出力に影響を及ぼす。

30

【0041】

<パルス発光工程>

パルス発光工程は、図5に示すように、パルス光を発光させる工程である。予備発光工程から発光停止工程を経てファイバ共振器内部に残留したエネルギーを加えて、第2の電流であるパルス発光電流を与え、ファイバ共振器を励起することで利得スイッチによるパルス光が発生する。この工程では図1で説明したように、内部エネルギーを過飽和状態にし、蓄積されたエネルギーを一気に放出することでパルス光が発生する。パルス発光電流の入力開始からパルス光発生までの光遅延時間は、図1(c)の光遅延時間 t_1 で示した時間であり、ファイバ共振器のエネルギーがパルス光発生の閾値に達するまでの時間である。そのため、励起用レーザ光源から励起光が発生させるための電流立ち上り時間は光遅延時間より速くする必要がある。また発生するパルス光出力やパルス幅、遅延時間はパルス発光電流に依存する。

40

【0042】

50

具体的な値として、本実施例での発光停止工程とパルス発光工程でのパルス光出力の関係を図7に示す。図7において、発光停止時間をパラメータとしたときに発生する初期パルス出力(図7(a))、とこのときの光遅延時間(図7(b))の関係を示したものである。用いたファイバはコア径6 μm のYbドープファイバ、共振器長は16m、励起光は波長915nmの半導体レーザである。ここで予備発光工程は、ファイバレーザ光源がレーザ発振する状態にしている。図7(a)において、発光停止時間が15 μs に満たないと、パルス光出力が低下する。これは、ファイバ共振器内部の緩和振動が十分収まらず、過飽和状態が阻害されるためである。本実施例での利得スイッチによるパルス光発生には、ファイバ共振器内でのレーザ発振が完全に収まった状態が必要であり、このための時間として15 μs 程度の時間が必要と考えられる。

10

【0043】

一方、発光停止時間が60 μs を超えるとパルス光出力が再び低下する。さらに230 μs を超えるとパルス光出力は急激に低下する。これは、予備発光工程により蓄積されたエネルギーの保持時間の上限が230 μs 程度(図中のB)であることを示している。この上限を超えると蓄積エネルギーの損失が大きくなりパルス光出力が低下する。一方、パルス光出力が変動しない非常に安定な状態が15~60 μs の間に存在することも分かった。従って、本実施例でのファイバ共振器であれば、発光停止時間は図7(a)のAの範囲である15 μs 以上、60 μs 以下に設定するのがさらに好ましい。この範囲であれば発光停止時間によってパルス光出力はほとんど変化せず、パルス発光開始の初期パルスから安定した高出力なパルス光出力特性が得られる。

20

【0044】

発光停止状態は、蓄積されたエネルギーの損失がパルス光発生に影響しない程度であり、かつパルス光発生が可能な静止状態を創り出すための長さが要求される。230 μs を超えると蓄積エネルギー損失が大きくなり、15 μs より短くなるとファイバ共振器の過飽和状態が阻害される。

【0045】

図7(b)において、発光停止時間が長くなるとともに、光遅延時間は増加している。これは、発光停止時間が長くなれば、ファイバ内部に蓄積されたエネルギーはファイバに吸収されるため、そのエネルギーは時間とともに減衰する。そのため、残留エネルギーが減少することによって、パルス光発生の閾値に達するまでに時間がかかり、そのため光遅延時間は長くなる。発光停止時間が15 μs に満たないと、光遅延時間は急激に低下するが、これは、ファイバ共振器の緩和振動が十分収まらず、過飽和状態が阻害されるためである。すなわち予備発光工程の連続光が完全に出力停止していない状態である。本実施例での利得スイッチによるパルス光発生には、ファイバ共振器内でのレーザ発振が完全に収まった状態が必要であり、このための時間として15 μs 程度の時間が必要と考えられる。

30

【0046】

さらに、図5における第2の電流の電流立ち上り時間をパラメータとしたときに発生するパルス出力特性を図8に示す。図8において、縦軸の左側に光遅延時間、右側にパルス光出力を示している。このときのレーザ制御部108のレーザ駆動条件は、それぞれ、予備発光電流2A、予備発光時間1ms、発光停止時間20 μs 、パルス発光電流10Aとしている。図8より、電流立ち上り時間が短くなると、光遅延時間は短くなり、パルス光出力が増加する。光遅延時間は、電流立ち上り時間に依存して変化しているが、パルス光出力には、変動しない安定な状態が、電流立ち上り時間1.3 μs 以下にあることがわかった。これは本実施例のファイバ共振器の過飽和状態によって発生するパルス光出力が電流立ち上り時間に対して飽和したと考えられる。

40

【0047】

また、電流立ち上り時間が、光遅延時間より長くなると、パルス光出力が、大幅に低下するため、電流立ち上り時間は、光遅延時間より短くすることが望ましい。

【0048】

50

励起用レーザ光源 102 に電流をステップ印加すると、図 1 に示すように、励起光強度がステップ状にファイバ共振器に入力され、ファイバ共振器は過飽和状態となりパルス光を発生する。しかしながら、電流立ち上り時間が長くなると、励起光強度の立ち上り時間も長くなるため、発生するパルス光出力に影響を及ぼす。すなわち電流立ち上り時間が長くなると、ファイバ共振器が過飽和状態となる時間がかかり、ファイバ共振器から発生するパルス光は、光遅延時間増加や出力低下する。そのため、安定した高出力のパルス光出力を得るためには、電流立ち上り時間は、少なくとも光遅延時間より短くする必要がある。

【0049】

図 9 は、従来の図 2 の入出力光特性に、本発明である予備発光工程と発光停止工程を追加したものである。予備発光工程で、ファイバレーザ光源に励起光 E0 を入力し、連続光 P0 を出力させる。ファイバ共振器が発振状態となった後、発光停止工程で所定の発光停止時間 (Ts) でレーザ発振を停止する。パルス発光工程で、励起光 E1 を入力することで、初期パルス P1 から高出力のパルス光が発生する。ここで、前述したように、発生するパルス光の光遅延時間は、発光停止時間 Ts によって変化する。

10

【0050】

この光遅延時間の変化は、ファイバ共振器内部の残留エネルギーに依存する。パルス発光工程においても、パルス間隔 T を変えると、残留エネルギーも変化するため、パルス光の出力や光遅延時間が変化し、初期パルス光と 2 発目以降のパルス光の出力にばらつきが生じる。そのため、発光停止時間 Ts は、パルス発光工程でパルス光停止後から次の励起光を入力するまでの時間 (励起停止時間) Tp と同じに設定することが望ましい。Ts と Tp を同じ時間として連続パルス発振させると、パルス発光する前の直前の残留エネルギーが等価となり、そのエネルギーを加えてパルス発振するため、初期パルスと 2 発目以降のパルス光の出力ばらつきを改善することができた。

20

【0051】

この発光停止時間は、Yb 添加ダブルクラッドファイバの構造にも依存する。本実施例では、コア径 6 μm、長さ 16 m のファイバである。また、励起光の波長は 915 nm 近傍、出力光の波長が 1064 nm 近傍のものを用いた。ファイバレーザのコア径を 10 μm 程度まで大きくし、FBG の反射率など共振器の設計を調整すると、発光停止時間の最小値は 5 μ秒程度まで短くすることができる。共振器構造を最適化することでパルス光出力が変化しない安定な発光停止時間を 5 μ秒 ~ 80 μ秒にすることも可能である。発光停止時間を短くすることでパルスの繰り返し周波数の最大値を高くすることが可能になる。

30

【0052】

以上のように、予備発光工程と発光停止工程とを設けて、発光停止工程の発光停止時間とパルス発光工程の励起停止時間とを同じ時間にすることによって、パルス発光工程の初期パルスと 2 発目以降のパルス光の出力特性は、同じ特性となり、パルス発光開始から、安定したパルス光の出力を得ることができる。

【0053】

なお、本実施例では、ファイバ 103 を Yb ドープファイバで説明したが、これ以外のレーザ活性物質を含むファイバであれば良い。すなわち、レーザ活性物質としてドープされた、Er、Pr、Nd、Tm、Ho などの希土類や、これらを混合したファイバでも良い。ドープする希土類を変えることで発振波長を選択できる。また、ファイバを進行方向に複数の部分に分割し、それぞれに異なるドープ材料またはドープ濃度のファイバを接続する構成にすると、高速なパルス変調が可能となる。

40

【0054】

また、励起用レーザ光源を複数個用意し、パルス発光工程の励起用レーザ光源と予備発光工程の励起用レーザ光源とに別々に振り分ける構成も可能である。例えば、励起用レーザ光源を 4 つの半導体レーザ (LD) で構成し、低出力しか必要としない予備発光工程にはそのうち 1 つの LD を使って励起し、パルス発光には 4 つの LD で励起する構成も可能である。低出力動作が必要な予備励起では LD の数が少ない方が低出力を安定に動作でき

50

るという利点がある。

【0055】

本実施例の構成では、出力したパルス光が励起用レーザ光源に戻る可能性がある。この戻り光が励起用レーザ光源の出力端面に戻ると、LDの端面破壊が発生する。これを防止するため、励起用レーザ光源には戻り光防止用の波長選択フィルターを備えるのが好ましい。励起用レーザ光源の出力近傍に波長選択フィルターを儲けることで、ファイバレーザ光源からの戻り光を抑圧できる。

【0056】

次に、本実施の形態では、ファイバレーザ光源からの出力を波長変換素子により波長変換して短波長光を発生する波長変換レーザ光源を説明する。図5において、ファイバレーザ光源101から出力されたパルス光をSHGモジュール106に導けば、波長変換された短波長のパルス光がSHGモジュールから出力される。本実施の形態では、FBGの反射波長を選択してファイバからは波長1064nmのレーザ光が発生させた。この波長1064nmの光をSHGモジュール106により波長532nmの緑色光に波長変換できる。

10

【0057】

ここで、SHGモジュール106は非線形特性を持つ波長変換素子を備え、ファイバレーザ光源101から出力される基本波の波長に依存して変換効率が変化し、高調波出力は基本波の2乗に比例して増大する。この特性を利用すると、波長変換素子出力側での予備発光工程により生じる連続光の出力強度を大幅に抑圧できる。例えば、ファイバレーザ光源の出力側でパルス発光工程によるパルス出力が100W、予備発光工程による連続光の予備出力を1Wとすると、波長変換素子出力側では、それぞれ50W、0.005Wとなる。すなわち、ファイバレーザ光源の出力側では、連続光の予備出力はパルス光の出力に対して1/100の割合であるが、波長変換素子出力側では、この割合が1/10000と大幅に低下する。すなわち、波長変換素子を通すことで、予備発光工程の出力を大幅に抑制することができる。これによって予備出力の影響のない通常のパルス光源と同様なレーザ加工が可能となる。また、例えば、図4において、SHGモジュール106から出力される高調波出力光をサンプリングミラーにより分離し、その分離した一部の光を光検出器によりモニターする構成とし、予備発光工程を所望の連続光でレーザ制御する構成としてもよい(図示せず)。

20

30

【0058】

なおSHGモジュールには、例えばMgO:LiNbO₃、およびこの材料に分極反転構造を形成したものを使用することができ、他のリン酸チタニルカリウム(KTiOPO₄:KTP)やMg:LiTaO₃など、およびこれらの材料に分極反転構造を形成したものを使用してもよい。また、分極反転構造を有する非線形光学結晶、例えばMg:LiNbO₃(コングレント組成・ストイキオメトリ組成)、Mg:LiTaO₃(コングレント組成・ストイキオメトリ組成)、KTPで特に効果を発揮することができる。

【0059】

なお、本発明の実施形態では、波長変換の一例として、赤外光(1064nm)から可視光(532nm)への変換を例にしたが、第2高調波発生以外にも、和周波発生、差周波発生、パラメトリック発振にも分極反転構造の周期を利用して、光の位相を整合させる構造を利用しているものであれば使用ができる。

40

【0060】

このようにして本発明はファイバレーザ光源から出力されたパルス光を波長変換素子により高調波に変換した波長変換レーザ光源としても応用できる。波長変換として第2高調波に変換すると短波長光の発生が可能となり、加工対象物の範囲が広がる。波長変換は非線形現象を利用するため、パルスの強度分布を変調できる。波長変換することでパルス幅を約1/2程度に圧縮できるという利点を有する。

【0061】

50

さらに波長変換素子として周期状の分極反転構造を有する非線形光学結晶を用いると、パルス波形整形に有効である。周期状の分極反転構造を有する波長変換素子はウォークオフがないため長い作用長を利用できる。作用長が長くなると波長変換を行う波長許容度が狭くなる。パルス波形は立ち下がり時にテールを引くため立ち下がり時間が遅くなるが、このテール部分の波長とパルスピークの波長がわずかに異なる。このため周期状の分極反転構造を有する波長変換素子により波長変換を行うと、テール部分の変換効率が低下してパルス波形が整形される利点がある。このため、非線形光学効果によるパルス幅の圧縮に加えて、パルス波形整形が可能であるという点で有効である。

【産業上の利用可能性】

【0062】

本発明にかかるファイバレーザ光源とそれを用いた波長変換レーザ装置短波長光源によれば、パルス発光開始の初期パルスから常に安定なパルス光出力が得られる。このような高出力パルスファイバレーザ光源によって、レーザ加工、レーザアニールなどの産業用途に適した短波長光源を実現することができる。

【符号の説明】

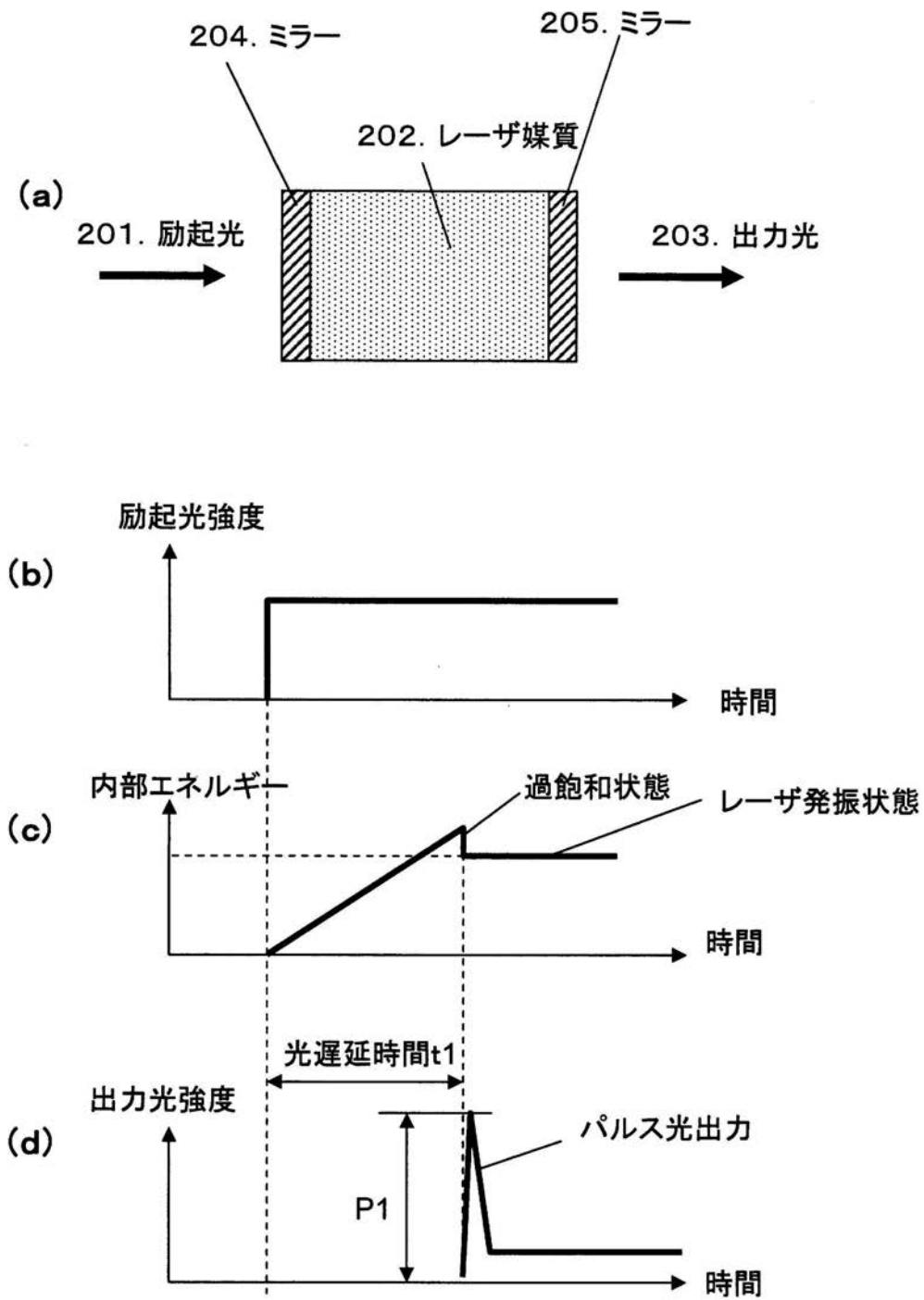
【0063】

- 101 ファイバレーザ光源
- 102 励起用レーザ光源
- 103 ファイバ
- 104 FBG (ファーマブラッググレーティング)
- 105 FBG (ファーマブラッググレーティング)
- 106 SHGモジュール
- 107 レーザ駆動部
- 108 レーザ制御部

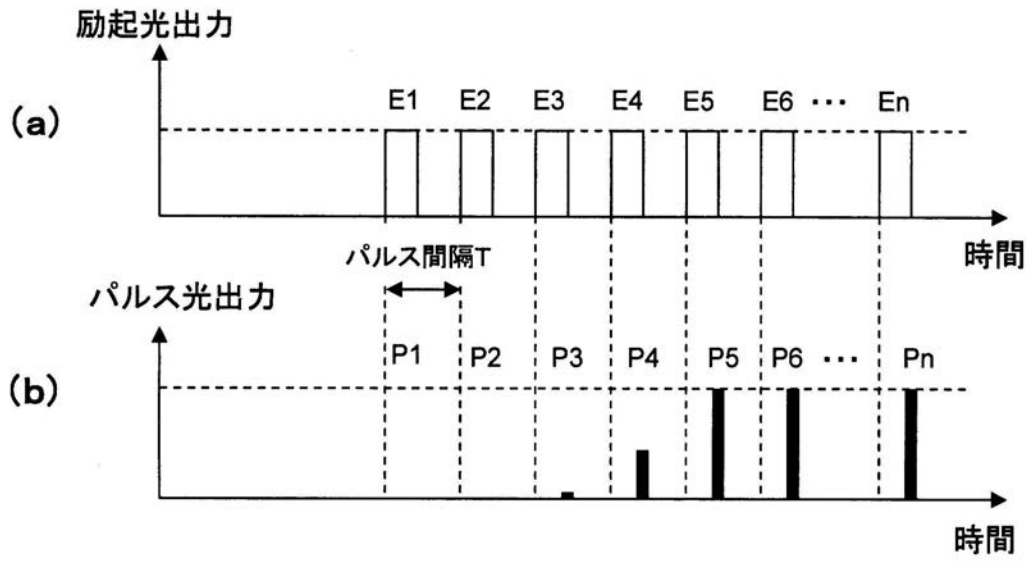
10

20

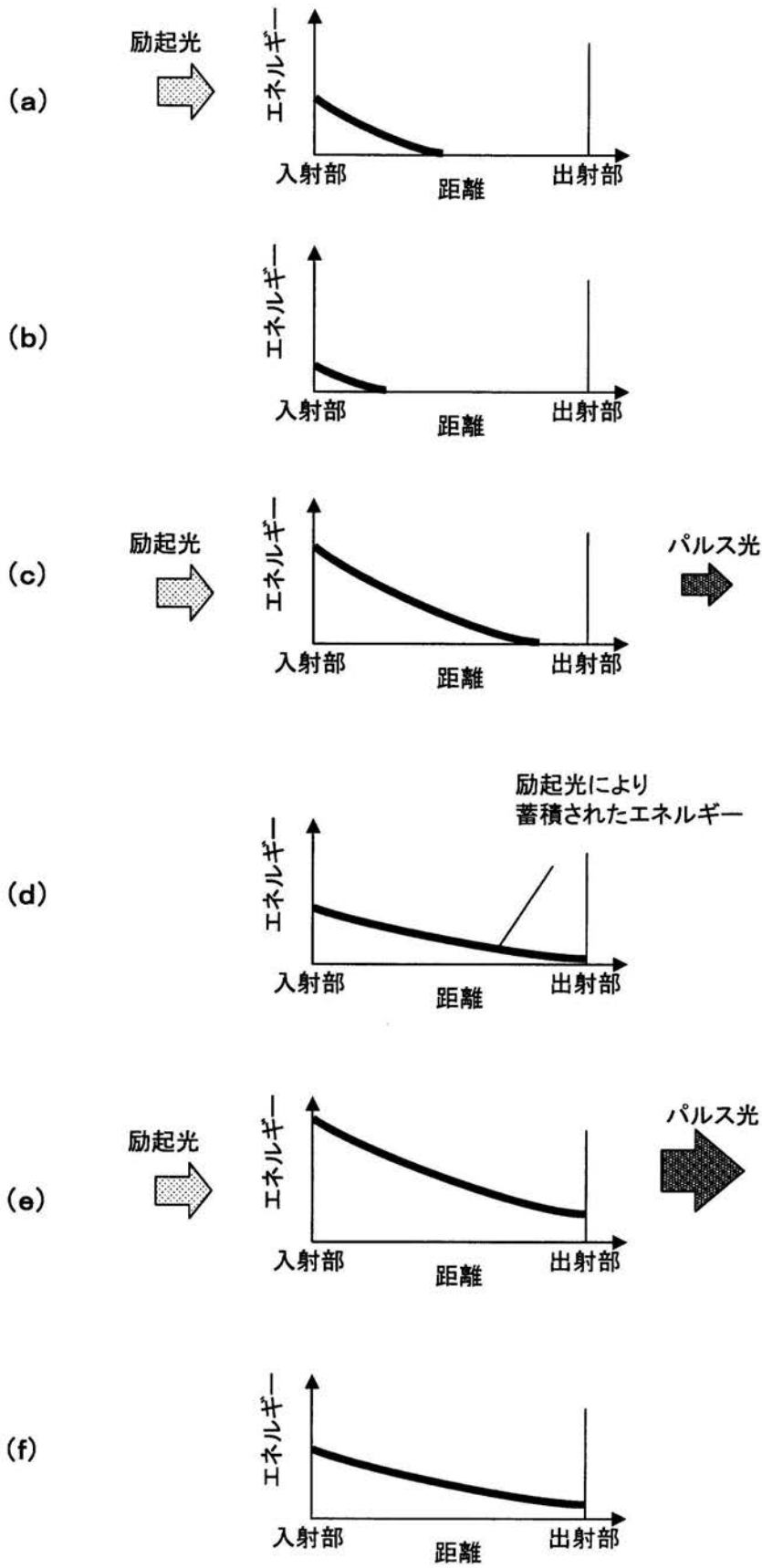
【 図 1 】



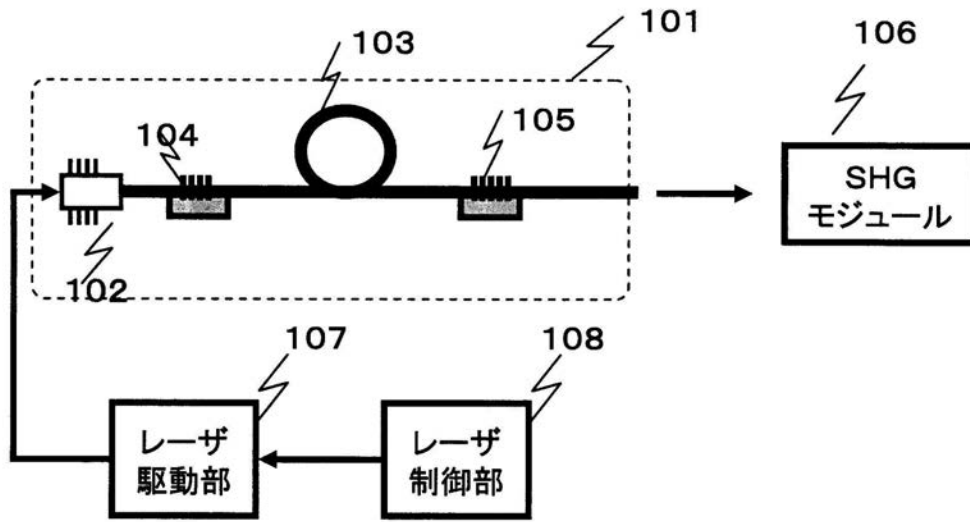
【 図 2 】



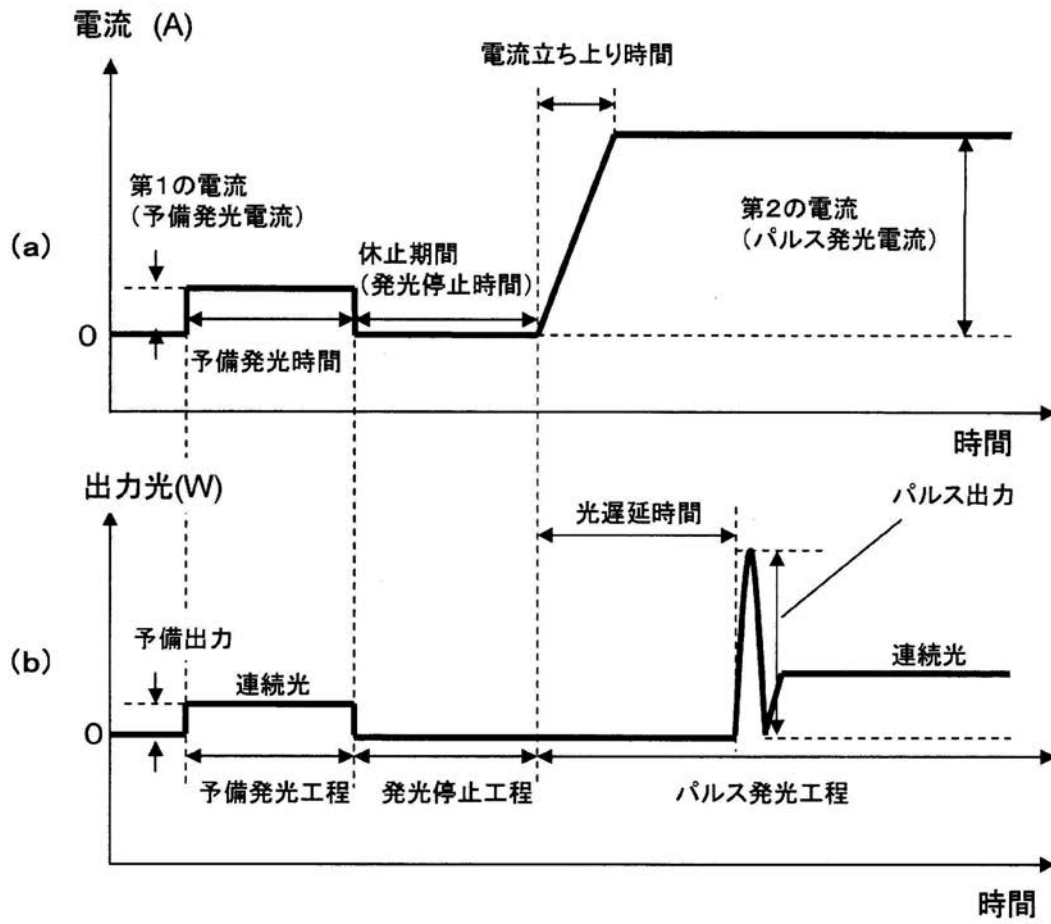
【 図 3 】



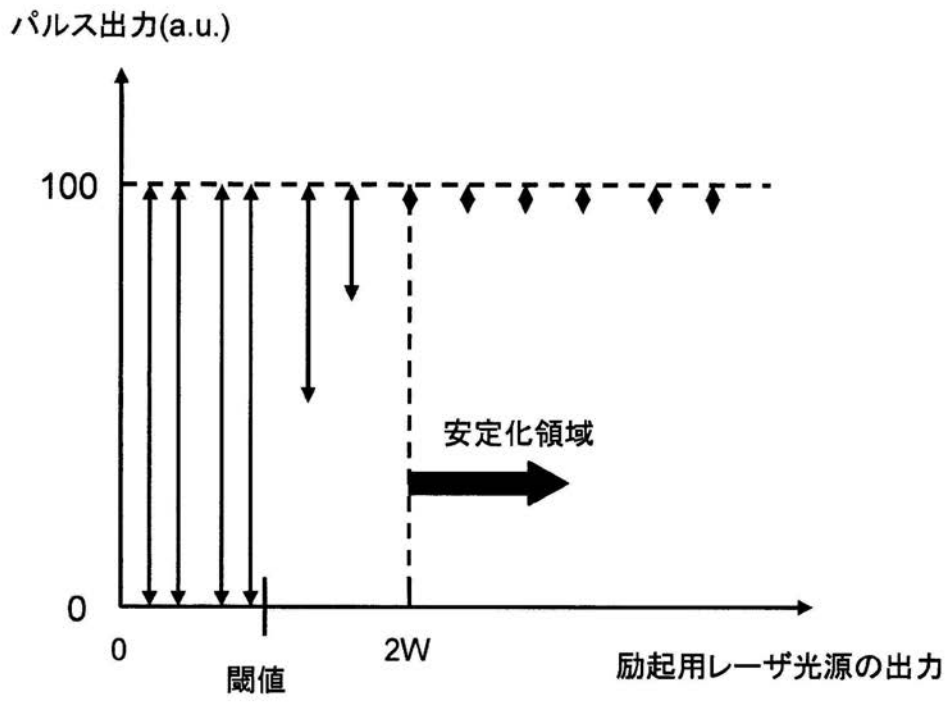
【 図 4 】



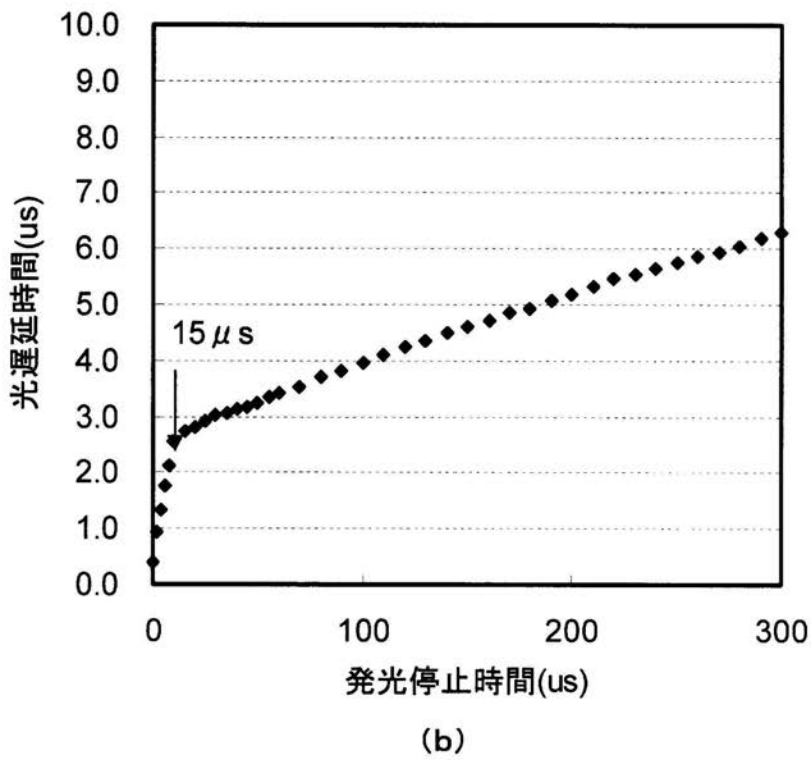
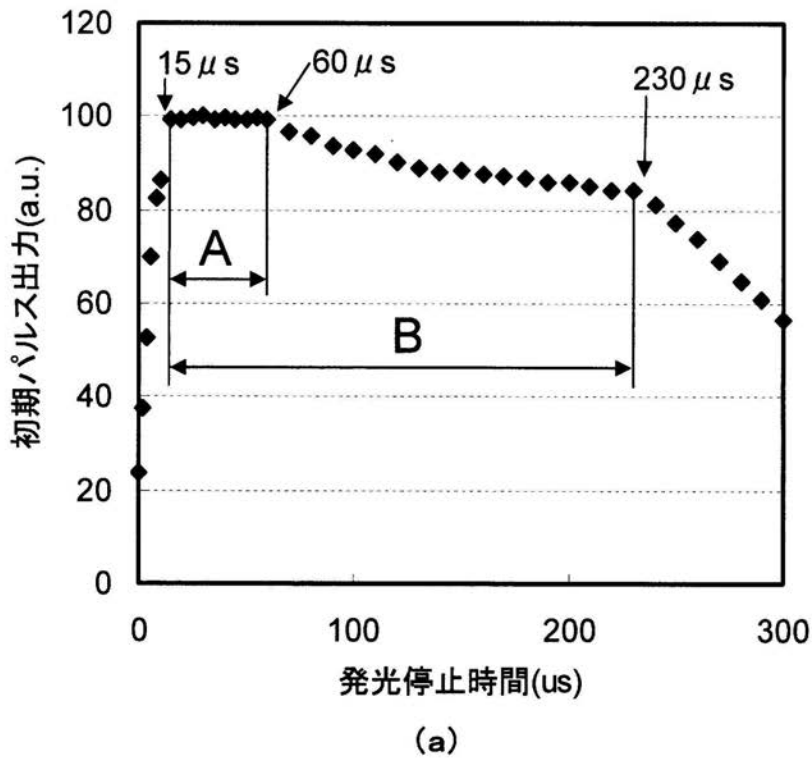
【 図 5 】



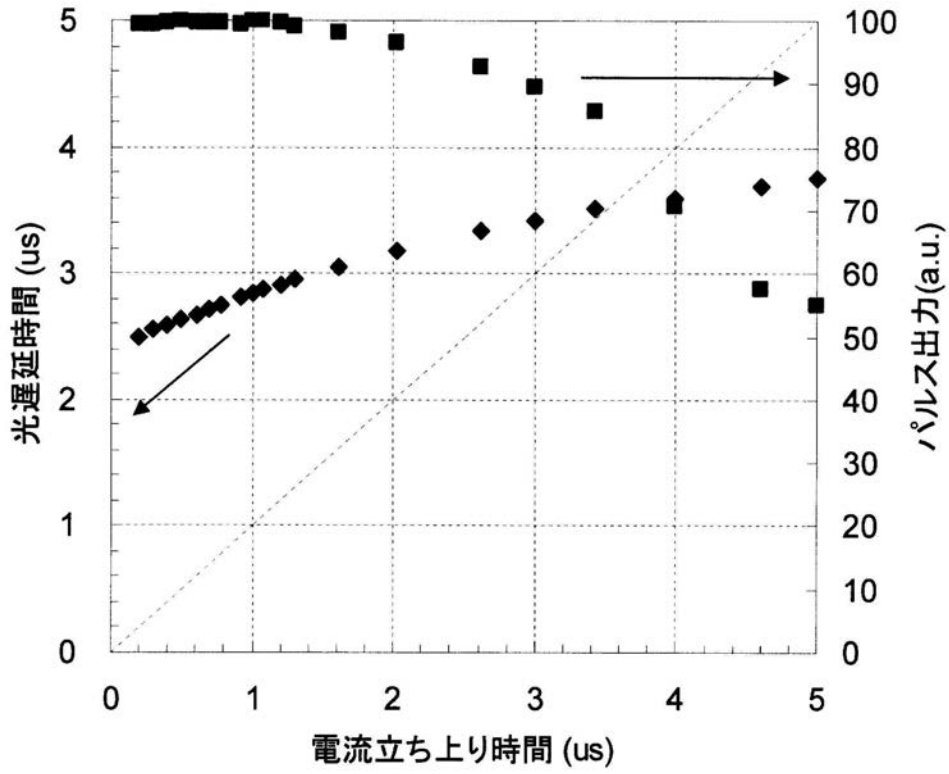
【 図 6 】



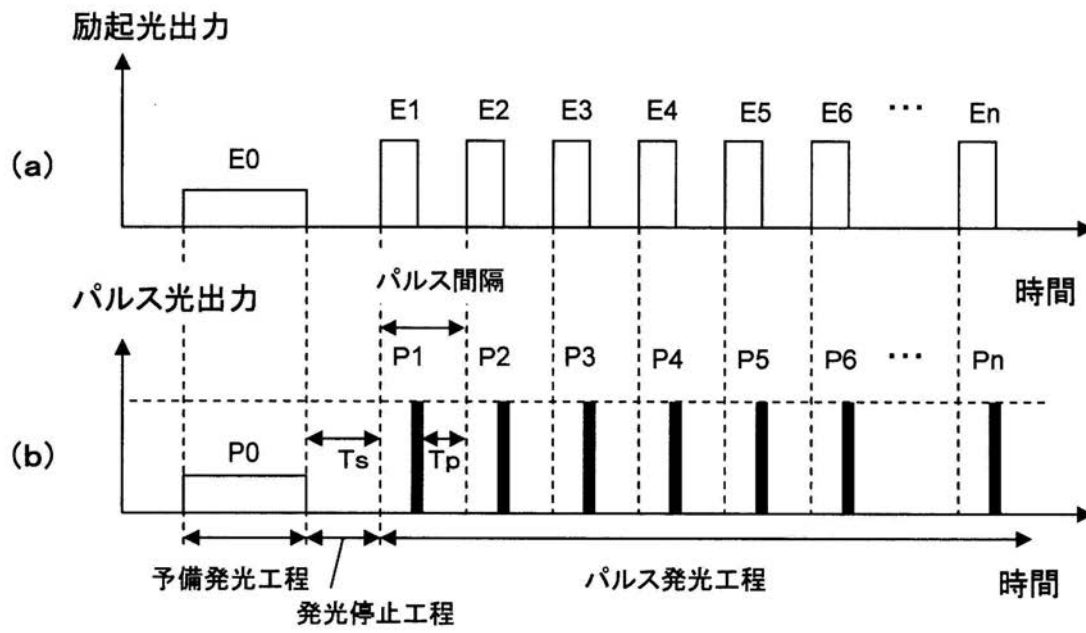
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5F172 AE13 AF06 AM04 AM08 EE13 EE19 NN15 NQ07 NQ44 NR22
ZA04