

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6341596号
(P6341596)

(45) 発行日 平成30年6月13日(2018.6.13)

(24) 登録日 平成30年5月25日(2018.5.25)

(51) Int.Cl. F I
GO2F 1/39 (2006.01) GO2F 1/39
HO1S 3/10 (2006.01) HO1S 3/10 D

請求項の数 4 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2013-269085 (P2013-269085)	(73) 特許権者	301032942
(22) 出願日	平成25年12月26日(2013.12.26)		国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
(65) 公開番号	特開2015-125250 (P2015-125250A)		千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(43) 公開日	平成27年7月6日(2015.7.6)	(74) 代理人	110000338
審査請求日	平成28年11月29日(2016.11.29)		特許業務法人HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK
		(74) 代理人	100097113
			弁理士 堀 城之
		(74) 代理人	100162363
			弁理士 前島 幸彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザー装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザー光源から発したパルスレーザー光を増幅して出力するレーザー装置であって、
 チャープされた前記パルスレーザー光をシグナル光とし、該シグナル光と共にポンプ光が入射され、増幅された前記シグナル光と、前記シグナル光と逆方向にチャープされたアイドラー光とを出力する光パラメトリック増幅器と、

屈折率に分散特性をもつ光学材料で構成され、前記光パラメトリック増幅器に入射する前の前記パルスレーザー光、及び前記アイドラー光をチャープさせるパルス伸張・圧縮器と、

を具備し、

前記パルス伸張・圧縮器は、

矩形体形状における矩形を構成する異なる長さの長辺と短辺のうちの一つの辺の両端に位置する各頂点がそれぞれ前記長辺又は前記短辺と45°の角度で面取り加工されること
 によって形成された第1、第2の入出射面を具備し、

前記第1の入出射面から垂直入射した前記パルスレーザー光を前記パルス伸張・圧縮器の内面で45°の入射角で全反射させ、チャープされた前記パルスレーザー光を前記第2の入出射面から垂直出射させ、

前記第2の入出射面から垂直入射した前記アイドラー光を前記パルス伸張・圧縮器の内面で45°の入射角で全反射させ、チャープされた前記アイドラー光を前記第1の入出射面から垂直出射させ

、前記長辺の長さを a 、前記短辺の長さを b 、前記パルスレーザー光の強度が中心での値の $1/e^2$ となる大きさで定義されるビームサイズの半径を r として、

【数 1】

$$b \leq a - 2\sqrt{2} \cdot r$$

が満たされたことを特徴とするレーザー装置。

【請求項 2】

前記パルス伸張・圧縮器において、前記矩形の長辺の長さの短辺の長さに対する比率は $3/2$ 以下の範囲であることを特徴とする請求項 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3】

前記パルス伸張・圧縮器は、屈折率 1.6 以上のガラス材料で構成されたことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のレーザー装置。

【請求項 4】

前記光パラメトリック増幅器は、前記第 2 の入射面と対向して前記パルス伸張・圧縮器に固定されて設置されたことを特徴とする請求項 1 から請求項 3 までのいずれか 1 項に記載のレーザー装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザー光源から発した超短パルスレーザーを増幅し、高強度の超短パルスレーザーを出力するレーザー装置の構成に関する。

【背景技術】

【0002】

レーザー光は、計測や加工等、様々な分野で広く用いられているが、その中でも、短い時間で高強度のレーザー光をパルス状に発振するパルスレーザーは、様々な分野で使用されている。特にこうしたパルスレーザーの中でも、数十フェムト秒 ($fs: 1fs = 10^{-15}s$) 程度以下と極端に短いパルス幅 (発振時間) 内でそのパワーを集中的に発する超短パルスレーザー光が近年得られるようになった。例えばレーザー加工においては、こうした超短パルスレーザー光を用いることにより、極端に短い時間内においてのみ局所的に試料に強い熱的効果を与えるため、試料全体における温度の上昇を起こさずに精密な加工ができる。従って、超短パルスレーザー光は、極めて有効である。

【0003】

高強度のパルスレーザー光を得るためには、レーザー光源が発振した超短パルスレーザー光を、増幅媒質で構成されたレーザー増幅器中で増幅し、高強度とすることが必要になる。しかしながら、広く用いられている安価な CO_2 レーザーや YAG レーザー等とは異なり、こうした超短パルスレーザーにおいては、上記のパルス幅内におけるレーザー光のピーク強度を極めて高くする必要がある。こうした場合、ピーク強度が高すぎて、レーザー増幅器にこのパルスレーザー光を入射させても正常な増幅が行われない、あるいは増幅媒質が損傷するという問題が発生する。このため、超短パルス幅で高いピーク強度をもつパルスレーザー光を得るためには特別な工夫が必要となり、例えば特許文献 1 に記載される CPA (Chirped Pulse Amplification) 法という手法が用いられている。CPA 法においては、入射したパルスレーザー光のパルスをチャープする (光学材料の分散特性を利用してパルス幅を制御する) 技術が用いられ、これによってレーザー増幅器で適切な増幅が行えるようなピーク強度とされた後に増幅が行われる。

【0004】

図 8 は、CPA 法を用いてパルスレーザー光を増幅するレーザー装置の構成及び原理を示す図である。ここで、図 8 上は、このレーザー装置の構成を示し、図 8 下の表は、図 8 上に示された各構成要素を通過後 (図中 (11) ~ (14) で表示) のパルスレーザー光のパルス波形 (横軸: 時間) を単純化して示す。ここで発振されるパルスレーザー光の波長は、広がりをもつ。図 8 下の表の上段においては、このパルスレーザー光の出力エネルギー

10

20

30

40

50

ギーを縦軸とし、下段においては、3種類の波長()毎に見たこの出力を縦軸として示している。従って、この表の上段における出力は、下段における波長毎の出力を波長について積分したものとなる。なお、この波長については、下側で短く、上側で長い3種類について模式的に示しているが、実際にはパルスレーザー光は連続的なスペクトルをもつ。

【0005】

このレーザー装置においては、まず、レーザー発振器91が、図8に示される形状の増幅前のパルスレーザー光(11)を発振する。このパルスレーザー光を波長 毎に見ても、その発振波形は図8中の(11)に示されるように、その上段の波形と下段の3種類の波形はいずれも相似形である。すなわち、パルスの立ち上がり、立ち下がりタイミングは同一である。

10

【0006】

このパルスレーザー光がパルス伸張器92に入射する。パルス伸張器92は、例えば屈折率に正の分散特性を有する光学材料で構成され、短波長側では長波長側よりも大きな屈折率を有する。従って、短波長側では光の伝搬速度が低下するため、パルス伸張器92を通過後の出力(12)においては、短波長側でのパルスの到着は長波長側よりも遅れ、いわゆる正にチャープされた状態となる(図8中の表(12)下段)。従って、これを通過後のパルスレーザー光の出力(図8中の表(12)上段)のパルス幅は、通過前と比べて広くなる。また、パルス伸張器92中における吸収が無視できれば、単一のパルスで放射される全エネルギーは変わらない。このため、このパルスレーザー光のピーク強度はこれに応じて低くなる。すなわち、このパルス伸張器92を通過後には、パルスレーザー光の

20

【0007】

このパルスレーザー光は、増幅媒質で構成されたレーザー増幅器93に入射し、ここで増幅される。ここで入射するパルスレーザー光においては、レーザー発振器91から発振直後と比べてピーク強度が低下しているため、増幅媒質の損傷を発生させずに、適正に増幅を行うことができる。従って、図8中の表(13)に示されるように、レーザー増幅器93に入射前の波形を忠実に保ち、ピーク強度が増大したパルスレーザー光が得られる。この増幅は波長によらずに一樣に行われるため、増幅されたパルス形状は、波長に関する積分値(上段)においても、波長毎の出力(下段)についても同様である。

【0008】

30

次に、増幅されたパルスレーザー光は、パルス圧縮器94に入射する。パルス圧縮器94も屈折率に分散特性を有する光学材料で構成されるが、その特性はパルス伸張器92と逆、すなわち、長波長側で短波長側よりも大きな屈折率(負の分散特性)を有する。従って、これを通過後には、長波長側でのパルスの到着は、短波長側よりも遅れ、入射光を、前記と逆のいわゆる負にチャープされた状態とすることができる。従って、このパルス圧縮器94に正にチャープされたパルスレーザー光を通過させれば、パルス伸張器92で発生したパルス遅延を補償することができ、図8中の表(14)下段に示されるように、各波長毎のパルス発振タイミングを再び統一させることができる。この積分結果が図8中の表(14)上段に示す波形である。すなわち、パルス幅は再び短くなり、増幅前のパルスレーザー光(11)と等しくなっている。この際、各波長毎に増幅された出力(図8中の

40

【0009】

従って、CPA法を用いて、高強度の超短パルスレーザーを得ることができる。

【0010】

更に、特許文献2には、光パラメトリック増幅(OPCPA: Optical Parametric Chirped Pulse Amplification)法をパルスレーザー光の増幅に用い、更に、この際に、図8におけるパルス伸張器92とパルス圧縮器94として、同一の光学素子を用いることによって、装置の構成を大幅に単純化し、小

50

型化が可能であることが記載されている。図9は、このレーザー装置の構成を示す図である。ここで、前記のパルス伸張器92とパルス圧縮器94とを共通としたパルス伸張・圧縮器95が用いられる。また、レーザー増幅器として、特に光パラメトリック増幅を行う光パラメトリック増幅器(OPA: Optical Parametric Amplifier)96が用いられる。

【0011】

ここでは、前記と同様に、レーザー発振器91が増幅前のパルスレーザー光(1)を発する。このパルスレーザー光(1)は、パルス伸張・圧縮器95によって正にチャープされ、OPA96に入射するシグナル光(2)となる。OPA96においては、ポンプ光が入力され、これによって増幅されたシグナル光(3)と、光パラメトリック増幅の際に副次的に生成されるアイドラー光(4)とが発せられる。ここでは、増幅されたシグナル光(3)は使用されず、アイドラー光(4)が取り出され、アイドラー光(4)がパルス伸張・圧縮器95を通過して出力光(5)として取り出される。

10

【0012】

ここで、OPA96における増幅媒質としては、例えばBBO($\text{-BaB}_2\text{O}_4$)結晶を用いることができる。OPCPAにおいては、入射光(2)と共にポンプ光を入射させることによってポンプ光のエネルギーをシグナル光に移行させ、増幅されたシグナル光と、一般的にはこれと異なる波長のアイドラー光とが発せられる。従って、ポンプ光がオンとされている間だけこの増幅が行われる。

【0013】

前記の通り、パルス伸張器92を正の分散特性とした場合には、パルス圧縮器94としては負の分散特性が必要となる。ここで、OPCPAにおけるシグナル光とアイドラー光の位相は逆転するために、ある媒質でシグナル光(1)が正にチャープされる場合には、アイドラー光(4)は逆に負にチャープされる。このため、特許文献2に記載の技術においては、パルス伸張器とパルス圧縮器として同一の光学素子(パルス伸張・圧縮器95)を用い、レーザー光(1)をパルス伸張・圧縮器で正にチャープした後に、OPA96によって増幅し、この際に発せられたアイドラー光(4)を再びこのパルス伸張・圧縮器95に通している。これにより、アイドラー光(4)は負にチャープされるため圧縮され、超短パルスレーザー光である出力光(5)となる。このため、パルス伸張器とパルス圧縮器を個別に設ける必要がなく、装置全体を小型化することができる。また、OPCPAにおいては、他の増幅法を用いる場合と比べて、使用する増幅媒質(OPA96)を小型化することができる。この観点からも、このレーザー装置全体を小型化することができる。更に、この構成では、レーザー装置の構成要素を減らすことができるために構成要素のアライメントが容易となり、アライメント精度を維持することも容易となるため、高性能を安定して維持することも容易となる。

20

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0014】

【特許文献1】特開平8-46276号公報

【特許文献2】特開2010-281891号公報

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

しかしながら、パルス伸張・圧縮器中において十分なパルス伸張・圧縮を行うためには、パルス伸張・圧縮器中における光路長を十分に大きくとる必要がある。この点については、パルス伸張器、パルス圧縮器を個別に設ける場合と同様である。このため、パルス伸張・圧縮器としては、例えば大きさが数10cm程度のガラスブロックが必要であった。このため、OPAを小型化した場合でも、移動させることが容易となる程度の小型のレーザー装置をこのパルス伸張・圧縮器を用いて実現することは困難であり、更なる装置全体の小型化が望まれた。

50

【 0 0 1 6 】

すなわち、チャープパルス増幅を用いて超短パルスレーザー光を発振するレーザー装置の小型化は困難であった。

【 0 0 1 7 】

本発明は、かかる問題点に鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明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】

【 0 0 1 8 】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明のレーザー装置は、レーザー光源から発したパルスレーザー光を増幅して出力するレーザー装置であって、チャープされた前記パルスレーザー光をシグナル光とし、該シグナル光と共にポンプ光が入射され、増幅された前記シグナル光と、前記シグナル光と逆方向にチャープされたアイドラー光とを出力する光パラメトリック増幅器と、屈折率に分散特性をもつ光学材料で構成され、前記光パラメトリック増幅器に入射する前の前記パルスレーザー光、及び前記アイドラー光をチャープさせるパルス伸張・圧縮器と、を具備し、前記パルス伸張・圧縮器は、矩形体形状における矩形を構成する異なる長さの長辺と短辺のうちの一つの辺の両端に位置する各頂点がそれぞれ前記長辺又は前記短辺と45°の角度で面取り加工されることによって形成された第1、第2の入出射面を具備し、前記第1の入出射面から垂直入射した前記パルスレーザー光を前記パルス伸張・圧縮器の内面で反射させ、チャープされた前記パルスレーザー光を前記第2の入出射面から垂直出射させ、前記第2の入出射面から入射した前記アイドラー光を前記パルス伸張・圧縮器の内面で45°の入射角で反射させ、チャープされた前記アイドラー光を前記第1の入出射面から出射させ、前記長辺の長さをa、前記短辺の長さをb、前記パルスレーザー光の強度が中心での値の $1/e^2$ となる大きさで定義されるビームサイズの半径をrとして、

【数3】

$$b \leq a - 2\sqrt{2} \cdot r$$

が満たされたことを特徴とする。

本発明のレーザー装置は、前記パルス伸張・圧縮器において、前記矩形の長辺の長さの短辺の長さに対する比率は3/2以下の範囲であることを特徴とする。

本発明のレーザー装置において、前記パルス伸張・圧縮器は、屈折率1.6以上のガラス材料で構成されたことを特徴とする。

本発明のレーザー装置において、前記光パラメトリック増幅器は、前記第2の入出射面と対向して前記パルス伸張・圧縮器に固定されて設置されたことを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 9 】

本発明は以上のように構成されているので、チャープパルス増幅を用いて超短パルスレーザー光を発振するレーザー装置を小型化することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

【図1】本発明の実施の形態に係るレーザー装置の構成を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態に係るレーザー装置におけるOPA近傍の構成を拡大して示す図である。

【図3】本発明の実施の形態に係るレーザー装置におけるパルス伸張・圧縮器の形状を示す図である。

【図4】本発明の実施の形態に係るレーザー装置におけるパルス伸張・圧縮器の変形例の形状を示す図である。

【図5】実施例の構成を示す図である。

【図6】実施例におけるOPAから出力されたシグナル光とアイドラー光のスペクトルを測定した結果である。

10

20

30

40

50

【図7】実施例における出力光の自己相関である。

【図8】CPAを用いたレーザー装置（第1の従来例）の構成を説明した図である。

【図9】CPAとパルス伸張・圧縮器を用いたレーザー装置（第2の従来例）の構成を説明した図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、本発明の実施の形態に係るレーザー装置について説明する。図1は、このレーザー装置10の構成を示す図である。このレーザー装置10においては、レーザー発振器11が発振した超短パルスレーザー光(1)を増幅して、高強度の超短パルスレーザー(出力光)(5)を出力する。この際、以下に説明するレーザー増幅方法を用い、超短パルス幅で高いピーク強度をもつパルスレーザー光を出力する。

10

【0022】

図1では、主にパルス伸張・圧縮器を中心とした構成について示されており、他の構成要素は簡略化して示されている。この図は、図9(特許文献2の図1)に対応している。このレーザー装置10においても、レーザー光源11から発せられたパルスレーザー光(1)は、パルス伸張・圧縮器12を通過することによって正にチャープされて伸張されて出力された(2)後に、光パラメトリック増幅器(OPA)13で増幅される。OPA13からは、増幅されたシグナル光(3)(図示せず)とアイドラー光(4)とが出力されるが、ここではアイドラー光(4)のみが取り出され、このアイドラー光(4)が、再びパルス伸張・圧縮器12を通過することによって圧縮されて出力光(5)となる。

20

【0023】

このレーザー装置10においても、特許文献2に記載の技術と同様に、パルス伸張器とパルス圧縮器を個々に具備する代わりに、単一のパルス伸張・圧縮器12を具備する。また、増幅器として、OPA13が用いられており、その出力における、増幅されたシグナル光(3)の代わりに、アイドラー光(4)が用いられる点についても同様である。ただし、パルス伸張・圧縮器12の構成及びその使用の態様が特許文献2に記載の構成とは異なる。

【0024】

このパルス伸張・圧縮器12は略矩形体形状であり、屈折率が1.6以上の正の分散特性をもつ透明なガラスで構成される。図1においては、その上面図が示されており、図示されるように、矩形における長辺(図1における右辺)の両側の2つの頂部が、この長辺に対して45°の角度かつ紙面と垂直方向に面取り加工されている。この面取り加工された箇所が光の入射、出射のために用いられる。すなわち、このパルス伸張・圧縮器12においては、図1におけるこの面取り加工された上下の2箇所において、図1の紙面と垂直に、第1の入出射面121、第2の入出射面122が、それぞれ形成されている。

30

【0025】

パルスレーザー光(1)は、第1の入出射面121から、これと垂直に入射する。この光は、図1におけるパルス伸張・圧縮器12の左側面、下面、右側面、上面(図1におけるそれぞれ左辺、下辺、右辺、上辺)で入射角45°で全反射を繰り返し、図示される光路で合計21回の反射を経て、第2の入出射面122から出射する。この間の光路長は、矩形の辺の長さの10倍以上とすることができる。この光路長内において、ガラスのもつ正の分散特性によって、パルスレーザー光(1)を正にチャープし、そのパルス幅を実質的に広げると共に、ピーク強度を低下させることができる。ガラスの屈折率を1.6以上とすることによって、パルス伸張・圧縮器12の周囲を大気又は真空とした場合には、この界面における屈折率差を大きくすることができるため、全ての反射点において入射角45°で全反射(反射率=100%)を起こすことができる。このため、反射に際してのパルスレーザー光の強度の損失は発生せず、ガラス中における吸収が無視できれば、単一のパルスで放射される全エネルギーは変化しない。このため、パルスレーザー光は正にチャープされた状態となり、パルスの時間幅が伸張され、単一のパルスで放射される全エネルギーが保存された状態で、そのピーク強度は低下する。すなわち、十分な長さの光路長を

40

50

もって正にチャープされたパルスレーザー光(2)が第2の入出射面122から、第2入出射面122と垂直に発せられる。

【0026】

チャープされたパルスレーザー光(2)は、図9の構成と同様に、OPA13に入射し、ここで増幅されたシグナル光(3)とアイドラー光(4)とが出力される。なお、ここでは、チャープされたパルスレーザー光(2)と共にポンプ光もOPA13に入射するが、その記載は省略されている。アイドラー光(4)は、第2の入出射面122に垂直に入射し、前記のパルスレーザー光(1)と同じ光路を逆向きに通じ、同じ光路長を経て第1の入出射面121から垂直に発せられ、出力光(5)となる。この際、特許文献2に記載の技術と同様に、アイドラー光(4)は、パルス伸張・圧縮器12によって負にチャープされるため、パルスの時間幅が圧縮され、単一のパルスで放射される全エネルギーが保存された状態で、パルス幅が短く、ピーク強度が高くなる。

10

【0027】

すなわち、このパルス伸張・圧縮器12においては、パルスレーザー光(1)、アイドラー光(4)は、第1の入出射面121と第2の入出射面122の間においてパルス伸張・圧縮器12の内面で多重反射されることによって、チャープ(パルス伸張・圧縮)される。

【0028】

なお、図1においては、単純化のために、パルス伸張・圧縮器12に入射したパルスレーザー光(1)の光路と、パルス伸張・圧縮器12に入射したアイドラー光(4)の光路を重複させて記載しているが、実際には、これらの光路を、図1における紙面と垂直方向における異なる位置に形成することができる。これによって、第2の入出射面122側における正にチャープされたパルスレーザー光(2)とアイドラー光(4)が辿る光路長は同一とするがその光路は重複させず、第1の入出射面121側におけるパルスレーザー光(1)と出力光(5)をそれぞれ分離することも容易である。

20

【0029】

ここでは、パルス伸張・圧縮器12の内面での多重反射を利用することにより、小さなパルス伸張・圧縮器12中における長い光路長を確保することができ、例えば図1における縦辺50mm、横辺45.8mmとした場合に、各辺の10倍以上の77.2cmの光路長を実現することができる。特許文献2に記載の技術においては、光路長と等しい大きさのパルス伸張・圧縮器が必要であるため、上記の構成によって、小型のガラス片で構成されたパルス伸張・圧縮器12を用いることができ、レーザー装置10全体を小型化することができる。

30

【0030】

この際、特許文献2に記載されるように、OPA13としては、例えば厚さ7mm程度のBBO結晶を用いることができる。その大きさは、光のビーム径等に応じて定まるが、一般的には、パルス伸張・圧縮器12よりも小型とされる。このため、図2にその模式図を示すように、パルス伸張・圧縮器12の第2の入出射面122側に対向、近接させて設けることが可能である。また、OPA13の背面(パルス伸張・圧縮器12の反対側)からポンプ光を入射させる構成とすれば、OPA13を第2の入出射面122に特に近接させて固定して設置することができる。実際には、OPA13で増幅を行うために、増幅すべきシグナル光(正にチャープされたパルスレーザー光(2))と、ポンプ光の方向は略同一とする必要がある。このため、図2の構成を実現するに際しては、例えば、OPA13のポンプ光入射側にシグナル光の反射面を設ける、あるいはOPA13のパルス伸張・圧縮器12側に反射コーティングを施しポンプ光を反射させる、等の構造を設ければよい。この構成によれば、パルス伸張・圧縮器12とOPA13とを組み合わせた全体を略矩形体形状として一体化することができる。これによって、レーザー装置10を小型化することが特に容易となる。また、レーザー装置10全体を堅牢とすることができるため、これを移動させて使用することが特に容易となる。

40

【0031】

50

次に、パルス伸張・圧縮器 1 2 の具体的構成について説明する。このパルス伸張・圧縮器 1 2 においては、略矩形体における矩形の一つの長辺の両側の頂部が面取り加工され、前記の第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 とされる。ここで、この頂部側から上記のように光を入射させる場合には、略矩形体の各辺が同じ長さとする、入射した光はこの頂部と対向する他の頂部に達するため、図 1 に示されるような多重反射を発生させることは不可能である。このため、ここでは、この矩形における長辺と短辺の長さは異なるものとされ、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 を形成しない場合の矩形における各辺は長辺（長さ a）と短辺（長さ b、 $b < a$ ）に区分される。また、光路を対称としパルスレーザー光（2）とアイドラー光（4）の光路長を同一とするためには、図 1 における光路中に形成されるマス目の各々は、同一サイズの正方形となる。これより、図 3 に示されるように、各辺における反射点の間隔は、図 3 に示される通りとなる。このため、 $b = a - b + 5 \times (2(a - b)) = 11(a - b)$ が成立し、これにより、 $b = 11a / 12$ となった場合に、図 3 の構成が実現される。この場合、上辺（短辺）、下辺（短辺）で 5 回、左辺（長辺）で 6 回、右辺（長辺）で 5 回（合計 21 回）の反射をさせることによって、長い光路長を確保することができる。

【0032】

ここで、 $a - b$ （長辺と短辺の長さの差）を小さくすれば、図 3 における短辺、長辺における反射点の間隔をより短くし反射点の数をより多くすることができ、光路長を更長くすることができる。しかしながら、この場合においては、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 が設けられた側の頂点近くの反射点を確保することが必要となるために、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 を小さくせざるを得ない。すなわち、反射点の数を多くして光路長を長くする場合には、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 は小さくする必要がある。

【0033】

一方、実際には、このパルス伸張・圧縮器 1 2 を通過するパルスレーザー光は、光軸と垂直方向に広がりをもつ。実際には、ビーム強度は中心から徐々に減少するため、中心からビーム強度が $1/e^2$ となる点までの距離 r を、この広がり（ビームサイズ）の半径とすることができる。第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 としては、このビームサイズの光を透過させる程度の大きさは必要である。

【0034】

反射点の数が多くなった場合には、図 3 に示されるように、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 が形成されなかった場合の頂点とこれに最も近接する反射点との中点に、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 を形成することができる。この場合には、図 3 に示されるように、第 1 の入出射面 1 2 1、第 2 の入出射面 1 2 2 の光軸に垂直な長さ D （入出射開口）は（1）式で表される。

【0035】

【数 1】

$$D = \sqrt{2} \times (a-b) \quad \dots (1)$$

【0036】

前記の通り、 D はこれを通過する光のビームサイズよりも充分に大きいことが必要である。このための一つの指針となるサイズを、前記のビーム半径 r の 4 倍（直径の 2 倍） $4r$ とすることができる。前記の D とこの大きさが等しいとすると、 a と b の関係は、（2）式となる。

【0037】

【数 2】

$$b = a - 2\sqrt{2} \cdot r \quad \dots (2)$$

【0038】

すなわち、 r （ビームサイズ）が大きいほど、 b と a の差は大きくすることが必要とな

10

20

30

40

50

る。通常用いられる超短パルス光においては、例えば $r = 1.47 \text{ mm}$ 程度となる。(2)式による b と前記の $11a/12$ を等しいとし、 $a = 50 \text{ mm}$ とした場合には、 $b = 45.83 \text{ mm}$ となる。すなわち、図3の構成を実現するための a 、 b はこの値となり、 $D = 5.88 \text{ mm}$ となる。

【0039】

このように、 a は僅かに b よりも大きく設定される。例えば、 r が上記の値に近い場合において、特に好ましい a/b の値としては、 $25/23$ 程度以上となる。

【0040】

上記の例においては、第1の入出射面121、第2の入出射面122は、一つの長辺の両側に設けられた。しかしながら、これらを短辺の両側に設けることもできる。図4(a)は $a/b = 11/10$ の場合、図4(b)は $a/b = 3/2$ の場合において、短辺側にこれらを設けた例をそれぞれ示す。図4(a)においては、図3と同様に、パルスレーザー光(2)とアイドラー光(4)を多重反射させることができる。また、図4(b)の場合には、反射回数(3回)は少なく光路長も比較的短いものの、長辺の長さ a よりも長い光路長を得ることができる。

【0041】

このように、上記のパルス伸張・圧縮器12の形状としては、矩形体形状における一つの矩形の長辺と短辺の長さが等しくない場合($a \neq b$)には、この長辺又は短辺の両側に第1の入出射面121、第2の入出射面122を設けたものを用いることができる。また、 a/b が大きい場合には、反射回数が少なくなり光路長を長くする効果は小さくなるものの、図4(b)のように $a/b = 3/2$ の場合においても、 a よりも充分光路長を長くすることができる。あるいは、光路長が a よりも長くなることについては、反射回数が1回であっても同様である。第1の入出射面121、第2の入出射面122を長辺、短辺のどちらの両側に形成するかは、レーザー装置10全体の構成に応じて適宜設定することができる。例えば、レーザー発振器11等を含めたレーザー装置10全体が縦長であれば短辺側に第1の入出射面121、第2の入出射面122を設け、これが横長であれば長辺側にこれらを設けることによって、全体をよりコンパクトな形状にすることができる。また、図2に示されるように、OPA13を組み合わせた形状を考慮してこの設定をすることができる。

【0042】

なお、上記の例において、第1の入出射面121、第2の入出射面122と長辺(短辺)との間の角度は 45° であり、これらの面に対して光が直入射する(これらの面と入射光が垂直である)ものとした。しかしながら、第1の入出射面121、第2の入出射面122と長辺(短辺)との間の角度が厳密に 45° である必要はない。この場合においては、これらの面に対する光を直入射とせず、図1、3に示された光路を実現することができる。

【0043】

(実施例)

実際に、図1の構成を具体化した図5の構成のレーザー装置を試作し、出力されたパルスレーザー光の特性を調べた。ここでは、中心波長 1020 nm 、パルス幅 50 fs (FWHM) の超短パルスレーザー光(1)を発するレーザー光源11が用いられた。また、ここでは、このレーザー光(1)はビームスプリッタ21で分割され、ポンプ光生成器22の種光ともされた。ポンプ光生成器22においては低温冷却Yb:YLFレーザー光が用いられ、パルス幅 5.2 ps の出力光が取り出され、更にこの出力光の第二高調波(波長 510 nm) が 0.9 mm 程度の大きさ、 0.7 mJ の強度にコリメートされ、ポンプ光として取り出された。このポンプ光は、ミラー23で反射され、OPA13に入射した。OPA13としては、厚さ 7 mm のタイプI-BBO結晶が用いられた。なお、図5は実施例の構成を模式的に示しており、実際にはポンプ光はOPA13におけるパルス伸張・圧縮器12側から入射させた。

【0044】

10

20

30

40

50

パルス伸張・圧縮器 12 としては、長辺 50 mm、短辺 44 mm、厚さ（高さ）10 mm のガラスブロック（屈折率 1.76、商品名 S-TIH11（株式会社オハラ））が用いられた。図 1 等の構成とは異なり、ここでは内部反射回数は計 13 回とされ、対応する光路長は 491 mm となった。この光路長によって、チャープされたパルスレーザー光（2）のパルス幅は 2.3 ps と算出される。

【0045】

図 6 は、この構成において OPA 13 から出力された増幅後のシグナル光（3）とアイドラー光（4）のスペクトルである。ここで、増幅利得は 3×10^4 であり、増幅後のエネルギーは 60 μ J 程度であった。この結果より、増幅後のシグナル光（3）とアイドラー光（4）の中心波長はほぼ同一であり、同等の強度をもつ。自己相関計測より求めたアイドラー光（4）のパルス幅は、2 ps 程度であり、チャープの方向は増幅されたシグナル光（3）と逆であった。このアイドラー光（4）がパルス伸張・圧縮器 12 を通過した後の出力光（5）の自己相関を算出した結果が図 7 である。この結果より算出された出力光（5）のパルス幅は 86.5 fs であり、パルス圧縮がなされていることが確認できた。この値は、算出されたフーリエ変換限界パルス幅である 75.4 fs よりも僅かに長い。この差は、特許文献 2 の段落番号 0043 に記載されたような、パルス圧縮時に補償されない高次の分散の影響によるものと考えられる。

【0046】

また、パルス伸張・圧縮器 12 における光の透過率は 82.4% であった。前記の通り、パルス伸張・圧縮器 12 内においては全反射が繰り返されるために反射による損失は無視でき、実際にはこの損失は入出射窓（第 1 の入出射面 121、第 2 の入出射面 122）で主に発生する。この点については、第 1 の入出射面 121、第 2 の入出射面 122 に無反射コーティングを施すことによって改善することが可能である。

【0047】

上記の例では、超短パルスレーザーを出力する、あるいは超短パルスレーザー光を OPCPA 法を用いて増幅する場合について記載した。しかしながら、本発明は、これに限定されず、パルスレーザー光のパルス伸張・圧縮処理を行う全てのレーザー装置に対して適用できることは明らかである。

【0048】

また、上記の例では、チャープされたシグナル光と、チャープされていないポンプ光とを OPA に入射させた場合について記載したが、この構成についても、同様の効果を奏する限りにおいて任意である。例えば、シグナル光をチャープせず、ポンプ光をチャープさせて、逆方向にチャープされたアイドラー光を得ることもできる。この場合においても、ポンプ光のチャープ（パルス伸張）と、アイドラー光のパルス圧縮とを、単一の光学素子を用いて行うことが可能である。このように、シグナル光とアイドラー光の位相が逆転するという性質を利用することにより、パルス伸張及び圧縮処理を行うレーザー装置の装置構成を単純化することが可能である。

【符号の説明】

【0049】

- 10 レーザー装置
- 11、91 レーザー発振器
- 12、95 パルス伸張・圧縮器
- 13、96 光パラメトリック増幅器（OPA）
- 21 ピームスプリッタ
- 22 ポンプ光発生器
- 23 ミラー
- 92 パルス伸張器
- 93 レーザー増幅器
- 94 パルス圧縮器
- 121 第 1 の入出射面

10

20

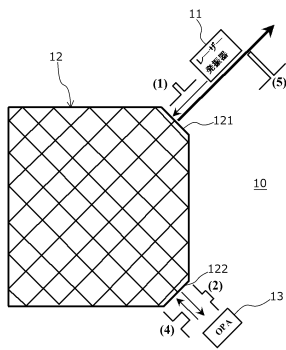
30

40

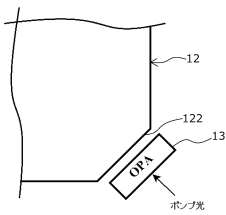
50

1 2 2 第 2 の入出射面

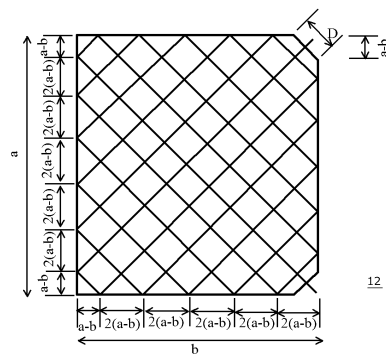
【図 1】



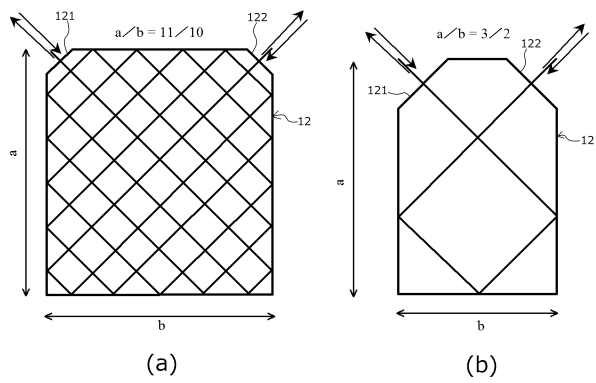
【図 2】



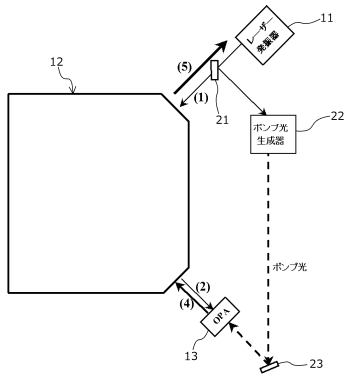
【図 3】



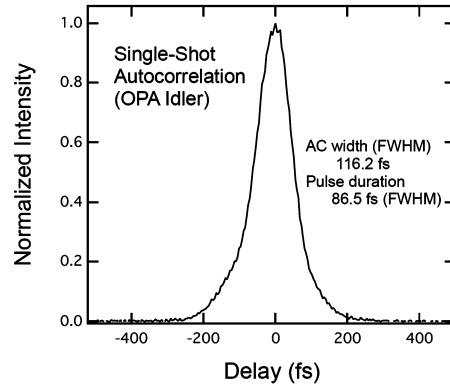
【図 4】



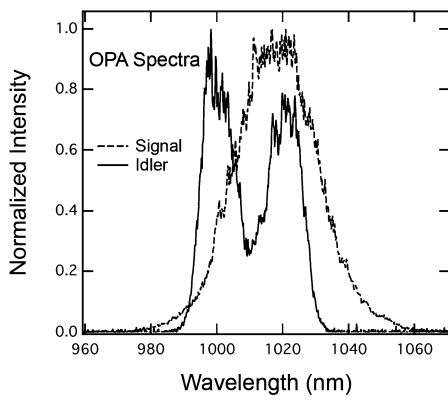
【図5】



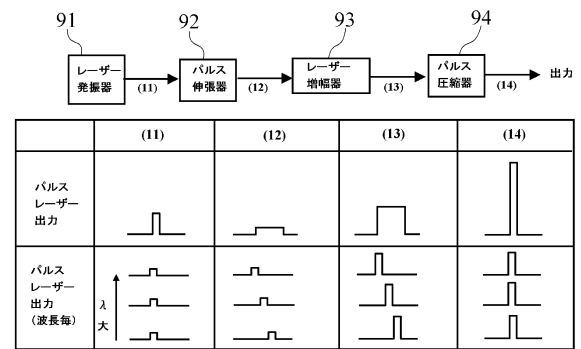
【図7】



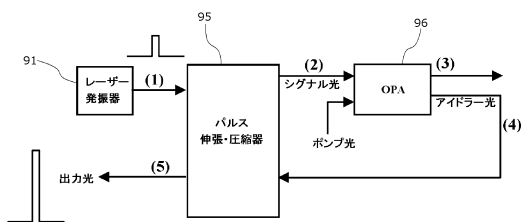
【図6】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 山川 考一
京都府木津川市梅美台八丁目1番地7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所
内

(72)発明者 赤羽 温
京都府木津川市梅美台八丁目1番地7 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所
内

審査官 林 祥恵

(56)参考文献 特開2010-281891(JP,A)
特開2008-021798(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0091359(US,A1)
特開平11-121843(JP,A)
特表2014-504802(JP,A)
米国特許出願公開第2013/0279529(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/29 - 1/39

H01S 3/00 - 3/30