

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5797822号  
(P5797822)

(45) 発行日 平成27年10月21日 (2015.10.21)

(24) 登録日 平成27年8月28日 (2015.8.28)

(51) Int.Cl.		F I	
HO 1 S	3/23	(2006.01)	HO 1 S 3/23
HO 1 S	3/10	(2006.01)	HO 1 S 3/10 D

請求項の数 20 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2014-155861 (P2014-155861)	(73) 特許権者	508316069
(22) 出願日	平成26年7月31日 (2014.7.31)		ロフィンージナル ユーケー リミテッ ド
(65) 公開番号	特開2015-35602 (P2015-35602A)		R o f i n - S i n a r U K L t d
(43) 公開日	平成27年2月19日 (2015.2.19)		イギリス国 H U 1 O 6 H D キングス トン アポン ハル ウィラバイ ヨーク ウェイ
審査請求日	平成27年1月28日 (2015.1.28)	(74) 代理人	100105957
(31) 優先権主張番号	1314098.3		弁理士 恩田 誠
(32) 優先日	平成25年8月7日 (2013.8.7)	(74) 代理人	100068755
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		弁理士 恩田 博宣
早期審査対象出願		(74) 代理人	100142907
			弁理士 本田 淳
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光増幅器の配置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光増幅装置であって、

長辺と短辺とを有する矩形の断面を有するとともに、前記断面と直交する方向において互いに反対側に位置する入側及び出側を有し、発振器から放出されるビームが前記入側に入射する増幅媒質と、

2つ以上の高反射ミラーと、を備え、前記増幅媒質は前記2つ以上の高反射ミラーの間に配置されており、

前記断面の前記短辺はx軸に沿っており、前記長辺はy軸に沿っており、z軸は前記断面に垂直であり、x軸、y軸、及びz軸は直交座標系を構成し、

前記発振器から放出される前記ビームが、前記増幅媒質を通過する複数の横断を含むジグザグ状の経路を形成するように前記2つ以上の高反射ミラーの各々において1回以上反射され、前記ジグザグ状の経路は、前置増幅段における第1経路と、出力増幅段における第2経路とを含み、前記ビームは、前記前置増幅段における第1経路を2回通過し、前記出力増幅段における第2経路を1回通過し、前記第1経路と前記第2経路とは互いに別個の経路であり、前記増幅媒質において重なっている、光増幅装置。

【請求項 2】

前記第1経路及び前記第2経路は、前記ビームが前記増幅媒質を3回以上横断するように形成される、請求項1に記載の光増幅装置。

【請求項 3】

10

20

前記第 2 経路は、前記第 1 経路よりも横断が 1 回以上多い、請求項 1 又は 2 に記載の光増幅装置。

【請求項 4】

前記増幅媒質の前記出側に位置決めされるイメージングミラーをさらに備え、前記ビームは前記第 1 経路の 1 回目の通過の後に前記イメージングミラーに入射し、前記イメージングミラーは、前記前置増幅段における前記 2 回の通過を生じさせるべく、前記第 1 経路に沿って前記ビームを戻すように配置されている、請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 5】

光増幅器は、前記増幅媒質の前記入側に位置決めされる第 1 レンズ及び第 2 レンズを備え、前記第 1 及び第 2 レンズは、倍率 1 の望遠鏡を形成するように配置され、前記ビームは、前記前置増幅段を出ると、前記望遠鏡を通じて前記出力増幅段への入力ビームを形成する、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 6】

光増幅器は、第 1 偏光素子と第 2 偏光素子とを備える、請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 7】

前記第 1 偏光素子は、前記増幅媒質の前記出側において前記イメージングミラーに近接して位置決めされる、請求項 4 を引用する請求項 6 に記載の光増幅装置。

【請求項 8】

前記第 1 偏光素子は、 $1/4$  波長板である、請求項 7 に記載の光増幅装置。

【請求項 9】

前記第 2 偏光素子は、前記増幅媒質の前記入側に位置決めされる、請求項 6 乃至 8 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 10】

前記第 2 偏光素子は偏光キューブである、請求項 9 に記載の光増幅装置。

【請求項 11】

前記増幅媒質の前記入側に配置される偏光素子をさらに備え、前記偏光素子と前記第 1 レンズとは、前記発振器によって放出される入力ビームを前記前置増幅段のために前記増幅媒質中に結合させるように配置される、請求項 5 に記載の光増幅装置。

【請求項 12】

前記偏光素子は、偏光キューブであり、該偏光キューブは、前記第 1 レンズと前記第 2 レンズとの間に配置される、請求項 11 に記載の光増幅装置。

【請求項 13】

前記出力増幅段のために前記ビームを前記増幅媒質中に戻すように、前記偏光キューブと前記第 2 レンズとの間にリターンミラーが位置決めされる、請求項 12 に記載の光増幅装置。

【請求項 14】

光増幅装置の前記入側に配置されるパルスピッカを備える、請求項 1 乃至 13 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 15】

前記高反射ミラーは平面ミラーである、請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 16】

前記高反射ミラーは、球面ミラー、円筒ミラー、及び 2 つの直交軸に沿った曲率が異なるミラーからなる群から選択される、請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

【請求項 17】

前記増幅媒質は、矩形の形状及び断面のスラブである、請求項 1 乃至 16 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

10

20

30

40

50

## 【請求項 18】

前記増幅媒質は、光励起される単結晶のスラブである、請求項 17 に記載の光増幅装置。

## 【請求項 19】

前記スラブは、2つのドーブされていない能動媒質の間にドーブされた能動媒質が配置されている結晶サンドイッチ構造により形成される、請求項 18 に記載の光増幅装置。

## 【請求項 20】

前記増幅媒質は、長辺と短辺とを有する矩形の断面を有する、スラブ放電を提供するように矩形電極間において励起させられる気体である、請求項 1 乃至 17 のいずれか一項に記載の光増幅装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、パワーが低く、周波数が低減された、超短パルスのシードを増幅する際の使用のための光増幅装置に関し、詳細には、限定的ではないが、単結晶のスラブの活性領域において一体化された前置増幅器及び出力増幅器を有する光増幅装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

10 ps 未満のパルス幅を有するレーザによって、マイクロマシニングの工業用途において新たな処理能力が提供される。しかしながら、大量な製造を可能にする処理スピードには、100 kHz から 10 MHz の間のパルス繰り返し周波数（100 W を超える平均パワーとともに最適な周波数に調節可能な）が必要とされる。典型的には、そのような組み合わせは、最大パルスエネルギーが非線形効果とレーザ結晶への損傷とによって制限されているので、ほとんどのレーザ設計では達成できない。薄型ディスクレーザ発振器（thin disk laser oscillator）によって、150 W に近接するパワー（必要とされるパワー範囲の下端にある）が達成されてきた。しかし、その薄型ディスクレーザ発振器は、3.50 MHz から 60 MHz の間の固定されたパルス繰り返し周波数（必要な範囲より大きい）で達成されてきたのであり、そのパルス繰り返し周波数は、平均パワーを維持しつつ特定の処理のために最適周波数に容易に調節されることはできない。

## 【0003】

現在、MOPA（master oscillator power amplifier）は、必要な高い平均パワーを得るのに使用される。そのような装置では、低いパワーのレーザのマスタ発振器は、出力増幅器中に結合される必要な幅のパルスを生成する。入力パルスは増幅器中において放出を誘導し、その放出は、入力パルスに加えられ、より高い出力エネルギーのパルスが作り出される。同様の出力を有する発振器内において達成され得るよりも強度及びフルエンスの両方が非常に低いので、その装置は、損傷が生じる前に、より高い出力パワー及びエネルギーを達成できる。MOPA は、今、多くの代替レーザ設計において実装されつつある。

## 【0004】

応用振興のためのフラウンホーファー研究機構（Fraunhofer - Gesellschaft zur Förderung der Angewandten）による特許文献 1 には、例えばドイツのエッジウェーブ・ゲーエムベーハー（Edge Wave GmbH）から商業的に入手可能なイノスラブ（INNO SLAB）増幅器において見出される光増幅装置が説明されている。図 1 に示されるように、この装置は、矩形の結晶スラブの増幅器の媒質 A を有する。発振器によって放出されるビーム B は、ミラー D、E 間の経路 C を進行し、その経路 C において、ビーム B は、増幅器の媒質 A を複数回横断する。媒質 A の各横断に伴い、ビーム B の断面は x 方向に増大する。厚さ方向（thin direction）である y 方向においては、ビームサイズは維持される。x 軸に沿った広がり、ビームが増幅されるときにビーム強度がほぼ一定に保持されることを確実に

10

20

30

40

50

するように選択される。横断の数は、ビーム B と、増幅器の媒質 A との間の重なりを最大にするように選択される。このようにして、増幅器の 1 回の通過を利用すると、損傷及び非線形効果についての閾値を避けつつ、蓄えられたエネルギーは効率的に取り出されることが可能である。そのような装置を使用して、76 MHz の周波数で 680 fs のパルス幅を有する 400 W の平均パワーレベルが達成されてきた。

#### 【0005】

この配置の欠点は、増幅器の最初のいくつかの通過において有効な飽和が生じることを確実にするべく、十分な入力パワーが必要とされることである。

そのような発振器 - 増幅器による装置を次いで第 2 の矩形スラブの増幅器（ここで、ビームは、1 回の通過において 1 つの横断からなる経路をなす）とカスケードする増幅システムでは、20 MHz の周波数で 615 fs のパルス幅を有する 1.1 kW に及ぶパワーレベルを達成可能である。このシステムの増幅手法でも、やはり、有効な取り出しを確実にすることは、十分な入力のシードのパワーに依存する。さらに、カスケードされる配置には、相当な空間が必要とされる。

#### 【0006】

十分な入力のシードのパワーを必要とする欠点を克服するべく、再生増幅器又は前置増幅段を使用して比較的低いシードのパワーを増幅することが提案されている。ギガフォトン株式会社（Gigaphoton Inc.）による特許文献 2 には、代替のレーザ設計における再生増幅器の使用が詳述されている。図 2 に示す一実施形態では、1 つの増幅媒質のスラブ F は、図 1 のように配置された増幅器 G（能動媒質 F の複数の横断からなる通過を 1 回伴う）と、再生増幅器 H（能動媒質 F の 1 つの横断からなる通過を複数回伴う）との複数の機能を果たすべく使用される。低いパワーのシードレーザ J は、2 つのミラー M, N から形成される共振器中に入射される。この入射信号は、光音響素子 K の切り替えによって導入される。次いで、ビーム B は、蓄えられたエネルギーの大部分が取り出されるまで、ミラー M, N 間の 1 つの横断において複数回通過する。所望のタイミングにおいて、ポッケルスセル L は切り替えられ、ビーム B は、ポラライザ P を使用して再生増幅器 H から増幅器 G 中に出力される。その配置は、増幅器 G と再生増幅器 H とが同じ能動媒質 F を共有するという点で小型であるが、増幅器 G と再生増幅器 H とは、媒質 F において互いに分離しており、概して独立の装置として動作する。

#### 【0007】

この配置の欠点は、能動構成要素を必要とすることにある。そのようなポッケルスセル及び光音響素子は、コストを増加させ、配置に対して複雑さを増加させる。

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0008】

【特許文献 1】米国特許第 6654163 号明細書

【特許文献 2】米国特許第 7903715 号明細書

【特許文献 3】欧州特許出願公開第 0821453 号明細書

【特許文献 4】欧州特許出願公開第 2475054 号明細書

【特許文献 5】国際公開第 88/09578 号

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0009】

本発明の目的は、パワーが低く、周波数が低減された、超短シードパルスのための増幅を提供する光増幅器を提供することである。

本発明の少なくとも 1 つの実施形態のさらなる目的は、前置増幅器と出力増幅器との部分的な結合とともに能動媒質において前置増幅器と出力増幅器とを一体化する光増幅器を提供することである。

#### 【0010】

本発明の少なくとも 1 つの実施形態の一層さらなる目的は、完全に受動的構成要素を使

10

20

30

40

50

用する光増幅器を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の第1の態様によると、光増幅装置であって、長辺と短辺とを有する略矩形の断面を有する増幅媒質と、2つ以上の高反射ミラーと、を備え、増幅媒質は2つ以上の高反射ミラーの間に配置されており、断面の短辺はx軸に沿っており、長辺はy軸に沿っており、z軸は光軸であり、x軸、y軸、及びz軸は直交座標系を構成し、ミラーは、増幅されるビームがミラーの各々において1回以上反射され、増幅媒質のxz平面を通じる複数の横断を含む経路を形成するように設計及び配置されており、ビームは、発振器から放出され、前置増幅段における第1経路を2回通過し、出力増幅段における第2経路を1回通過し、第1経路と第2経路とは独立しており、増幅媒質において重なっている、光増幅装置が提供される。

10

【0012】

ビームは、第1前置増幅経路に沿って増幅媒質を通過し、同じ第1経路に沿って戻り、次いで第2パワー増幅経路（幾分かの部分結合が生じるように前置増幅経路と特定箇所において重なる（locally overlap））に沿って再び増幅媒質を通過する配置を提供することによって、そのシステムにより増幅器を通じる全ての横断の有効な飽和が確実にされることが可能である。さらに、第1前置増幅経路上においてビームを2回通過させることによって、効率的なパワーの取り出しが達成される。第2経路は第1経路と異なるので、それらの経路と増幅媒質との最大化された重なりが達成でき、これによって、パワーが低い超短パルスの最適なパワーレベルへの増幅が可能になる。

20

【0013】

好適には、ビームは、各経路上において増幅媒質の3つ以上の横断をなす。これによって、増幅媒質を小型にすることが可能になり、したがって小さな装置が提供される。好適には、第2経路は、第1経路よりも横断が1つ以上多い。随意に、第2経路は、第1経路の少なくとも2倍多く横断する。このようにして、増幅媒質との重なりが最大化される。

【0014】

好適には、光増幅器は増幅媒質の出側に位置決めされるイメージングミラーを備え、ビームは第1経路の1回目の通過の後にイメージングミラーに入射し、イメージングミラーは、前置増幅段における2回の通過を生じさせるべく、第1経路に沿ってビームを戻すように配置されている。このようにして、戻されたビームは、増幅器への入力部におけるビームの像であり、戻されたビームは、増幅器を通じるビームの第1経路に正確に重なり、これによって、同じ経路の2回通過が確実にされる。その経路に沿った利得が十分高ければ、第2経路によって、飽和と効率的な取り出しとが確実にされる。

30

【0015】

好適には、光増幅器は、増幅媒質の入側に位置決めされる第1レンズ及び第2レンズを備え、第1及び第2レンズは、倍率1の望遠鏡を形成するように配置される。このようにして、ビームは、前置増幅段を出ると、望遠鏡を通じて出力増幅段への入力ビームを形成できる。

【0016】

好適には、光増幅器は、複数の偏光素子を備える。好適には、第1偏光素子は、増幅媒質の出側においてイメージングミラーに近接して位置決めされる。より好適には、第1偏光素子は、1/4波長板である。このようにして、増幅媒質を出る直線偏光ビームは、円偏光へと変換されることができ、イメージングミラーにおいて反射することができ、再び1/4波長板を通過する時、円偏光は、第1経路の1回目の通過におけるビームの偏光に垂直な方向の直線偏光へと変換される。

40

【0017】

好適には、第2偏光素子は、増幅媒質の入側に位置決めされる。より好適には、第2偏光素子は偏光キューブである。好適には、偏光キューブは、発振器によって放出される入力ビームがキューブを通過するように配置される。このようにして、入力ビームは、その

50

直線偏光を所望の向きに定められることができる一方、前置増幅段からの戻されたビームは、キューブにおいて反射される。戻されたビームのこの反射によって、出力増幅段のために第1経路とは異なる経路上へビームが増幅媒質中に配向されることが可能になる。

【0018】

有利には、第2偏光素子と第1レンズとは、発振器によって放出される入力ビームを前置増幅段のために増幅媒質中に結合させるように配置される。より好適には、偏光キューブは、第1レンズと第2レンズとの間に配置される。これによって、小型な配置が提供される。さらに好適には、リターンミラーは、第2偏光素子と第2レンズとの間に位置決めされる。リターンミラーは、出力増幅段のためにビームを増幅媒質中に戻す。第1レンズと第2レンズとの間のリターンミラーの使用によって、望遠鏡は効果的に折り曲げられ、これによって、配置がより小型になる。

10

【0019】

一実施形態では、光増幅器は、該光増幅器への入力部に配置されるパルスピッカを備える。このようにして、パルスは、発振器の入力ビームから捨てられることができ、周波数が低下させられ、これによって、平均入力パワーが低下させられる。したがって、周波数の最適化が、特定の平均パワーに関して達成されることが可能である。

【0020】

好適には、高反射ミラーは平面ミラーである。このようにして、ビームは、経路の各横断上においてy方向にミラーを横切るように調整されることが可能である。したがって、ミラー間においてジグザグ経路が形成される。あるいは、高反射ミラーは、球面ミラー、円筒ミラー、及び2つの直交軸に沿った曲率が異なるミラーからなる群から選択されてもよい。好適には、高反射ミラーは、非平行に配置される。

20

【0021】

好適には、増幅媒質は、矩形の形状及び断面のスラブである。好適には、増幅媒質は、光励起される単結晶のスラブである。スラブは、2つのドーブされていない能動媒質の間にドーブされた能動媒質が配置されている結晶サンドイッチ構造により形成されてもよい。

【0022】

あるいは、増幅媒質は、長辺と短辺とを有する矩形の断面を有する、スラブ放電を提供するように矩形電極間において励起させられる気体であってもよい。

30

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】光増幅器の先行技術の配置を示す概略図。

【図2】別の光増幅器の先行技術の配置を示す概略図。

【図3】本発明の実施形態による光増幅器を示す概略図。

【図4】図3の光増幅器の前置増幅段を示す概略図。

【図5】図3の光増幅器の出力増幅段を示す概略図。

【図6】本発明のさらなる実施形態による光増幅器を示す概略図。

【図7】本発明の一実施形態による光増幅器において、前置増幅段と、一体化された前置増幅段及び出力増幅段とからの出力パワーに関する入力のシードのパワーのプロットを示す図。

40

【発明を実施するための形態】

【0024】

本発明の実施形態は、例としてのみ、ここで説明される。

最初に図面の図3を参照する。図3には、一般に参照符号10によって示される光増幅器を示す。ここで、本発明の一実施形態では、パワーが低く、連続波(CW)又はパルスの発振器(図示せず)から放出されるビーム12は、第1経路16(増幅媒質14を2回通過する)により増幅媒質14を通過することによって増幅され、第2経路18(増幅媒質14を1回通過する)により増幅媒質14を通過することによって増幅される。各経路上において、ビーム12は、ミラー20, 22(各々、増幅媒質14のエントリ側24及

50

び対向する出側 2 6 に対して配置される ) における反射によって増幅媒質 1 4 を複数回横断する。

【 0 0 2 5 】

増幅媒質 1 4 は、単結晶のスラブ ( 断面において矩形であり短辺及び長辺を有する ) である。断面の短辺は x 軸に沿っており、長辺は y 軸に沿っており、z 軸は光軸であり、x 軸、y 軸、及び z 軸は、直交座標系を構成する。図 1 において、長辺が示されている。一実施形態では、増幅媒質は、2 つのドーブされていない矩形断面に挟まれたドーブした能動媒質を有する結晶の構造物である。本技術分野において既知であるが、増幅媒質 1 4 は、光学的にポンピングされ、能動利得領域を与える。このポンピングは、レーザダイオードのアレイによる場合がある。代替の実施形態では、増幅媒質は、スラブのガス放電によって作り出される。これは、典型的には、2 つの矩形平面であり平行に配置された電極間において励起させられる  $\text{CO}_2$  等のガスである。

10

【 0 0 2 6 】

ミラー 2 0 , 2 2 は、パワーの最大量が光増幅器 1 0 を通じて伝達されるように高反射である。ミラー 2 0 , 2 2 は、ビーム 1 2 を y 方向に面を横切らせる ( ' w a l k ' a c r o s s ) のに十分な直径を有する平面である。ミラーは、増幅媒質 1 4 の第 1 端部 2 8 及び第 2 端部 3 0 に面するように配置されており、ミラー 2 0 , 2 2 のいずれかについての端を切り取ることなくビームが各端部 2 8 , 3 0 を入ったり出たりできるようにずらされている。ミラー 2 0 , 2 2 は、端部 2 8 , 3 0 に対して平行に配置される場合がある一方、シードビームに関連しないミラー間のレーザ発振の可能性を低減するべく、傾斜角が導入されてもよい。この発振によって、シードビームのために利用可能な蓄えられたエネルギーが低減させられるであろうし、また、得ることのできる出力パワーが低減させられるであろう。代替の実施形態では、ミラー 2 0 , 2 2 は、球面状であったり、円筒状であったり、又は 2 つの直交軸 ( 典型的には x 及び y ) に沿った曲率が異なる。好適には、高反射ミラーは、非平行に配置される。

20

【 0 0 2 7 】

ミラー 2 0 , 2 2 は、エントリ側において増幅媒質 1 4 に入るビーム 1 2 がミラーの各々において少なくとも 1 回反射して、x y 平面において増幅媒質 1 4 を通じる複数の横断 3 2 からなる経路を形成するように配置される。各横断は異なる位置に存在し、これによって、ビーム 1 2 が増幅媒質 1 4 を通じて進行するときに各反射について異なる位置において各ミラー 2 0 , 2 2 に入射する。複数の横断 3 2 からなる経路は、媒質 1 4 を通じるジグザグ型として現れる。ビームサイズと増幅器 1 0 の幾何学的配置とは、ビーム 1 2 の経路が媒質 1 4 の大部分と重なるように選択されることが可能であることが認められる。

30

【 0 0 2 8 】

イメージングミラー 3 4 は、増幅媒質 1 4 の出側 2 6 において位置決めされており、ビーム 1 2 は、第 1 経路 1 6 の 1 回目の通過の後、イメージングミラー 3 4 に入射する。イメージングミラーは、ビーム 1 2 を正確にそれ自身の上に戻すように選択された曲率半径を有する球面ミラーである。このようにして、ビーム 1 2 は、2 回目の通過として増幅媒質 1 4 を通じて戻される。その戻されたビームは、増幅器 1 0 に対する入力部 2 4 におけるビームの像であり、増幅器 1 0 を通じてビームの第 1 経路 1 6 と正確に重なり、同じ経路 1 6 の 2 回の通過を確実にする。

40

【 0 0 2 9 】

イメージングミラー 3 4 に近接して位置決めされるのは、1 / 4 波長板 4 0 である。1 / 4 波長板 4 0 は、直線偏光の光を円偏光の光に変換したり、円偏光の光を直線偏光の光に変換したりする標準的な偏光素子である。増幅媒質 1 4 を出る直線偏光ビーム 1 2 は、円偏光へと変換され、イメージングミラー 3 4 において反射し、再び 1 / 4 波長板 4 0 を通過する時に変換されて直線偏光へと戻される。しかし、その直線偏光は、ビーム 1 2 が増幅媒質 1 4 を出た時のビーム 1 2 の偏光に垂直の方向である。

【 0 0 3 0 】

増幅媒質 1 4 のエントリ側 2 4 において、発振器又は他のレーザシードから放出された

50

偏光したビーム 1 2 は、増幅器 1 0 へと入力される。エントリ側に配置されているのは、偏光キューブ 4 2 及びリターンミラー 4 4 とともに第 1 レンズ 3 6 及び第 2 レンズ 3 8 である。偏光キューブ 4 2 は、入力ビーム 1 2 が偏光キューブ 4 2 を通過するときに入力ビーム 1 2 の偏光に影響を与えず、経路 1 6 に配置されているレンズ 3 6 は、ビーム 1 2 を増幅媒質 1 4 中に結合させるのに使用されることが可能である。偏光キューブ 4 2 は、増幅媒質 1 4 の 2 回通過を完了した戻されたビーム 1 2 が完全に反射されるように配置される。反射したビームはリターンミラー 4 4 に向かって配向され、そのリターンミラー 4 4 は、第 1 経路 1 6 とは異なっており独立した第 2 経路 1 8 上へと増幅媒質 1 4 中にビーム 1 2 を送り返すように配置されている。リターンミラー 4 4 と増幅媒質 1 4 との間には、第 2 レンズ 3 8 が配置されている。第 1 レンズ 3 6 及び第 2 レンズ 3 8 は、倍率 1 の望遠鏡を形成するように配置される。このようにして、ビームは、増幅媒質 1 4 中に戻される。

10

#### 【 0 0 3 1 】

使用の際、直線偏光のシードの入力ビーム 1 2 が提供される。これは、パワーが低く、連続波又はパルスの発振器（図示せず）等のソースによって提供され、その発振器は、増幅媒質 1 4 中への光結合のための適した光学系（図示せず）を使用するような状態にされていてもよい。増幅器 1 0 へ入ると、ビーム 1 2 は、前置増幅段 4 6 を進行する。これは、前置増幅段 4 6 に関連する図 3 の部分である図 4 において最もよく示されている。類似の部分は、明確さの役に立つように同じ参照符号が与えられている。

#### 【 0 0 3 2 】

増幅材料 1 4 の薄い結晶スラブは、薄い利得シートを作り出すべく、レーザダイオードを用いてポンピングされている。結晶増幅材料 1 4 内では、ビーム 1 2 は、熱により生成されたレンズによって x 方向（厚さ軸としても知られる）に閉じ込められている一方、ビーム 1 2 は、y 方向において自由に発散する（幅の軸としても知られる）。ビーム 1 2 は、ビーム 1 2 が複数回の跳ね返りをするミラー 2 2 に入射するまで、一般に、z 方向に進行し続ける。ミラー 2 2 の傾斜角によって、ビーム 1 2 は第 2 の方向に沿って配向され、ビーム 1 2 がミラー 2 0 に入射するまで結晶 1 4 を通じて横断する。次に、ミラー 2 0 によって、ビーム 1 2 はさらなる方向に沿って結晶 1 4 を通じて再配向され、ミラー 2 2 の上方における結晶 1 4 の端部 3 0 を通過することによってビーム 1 2 が増幅媒質 1 4 を出るまで、再び結晶 1 4 を横断する。ビーム 1 2 は、増幅媒質 1 4 の 3 つの横断 3 2 をなす 1 回の通過により、増幅媒質 1 4 を通じる第 1 経路 1 6 を進行する。

20

30

#### 【 0 0 3 3 】

次に、ビーム 1 2 は、両軸に沿って自由に発散した後、ビームの最初の直線偏光を円偏光へと変換する 1 / 4 波長板 4 0 を通過する。次に、ビーム 1 2 はイメージングミラー 3 4 に衝突した後、再び 1 / 4 波長板 4 0 を通過し、その 1 / 4 波長板 4 0 は、ビーム 1 2 が増幅器 1 0 に入力された時の偏光に対して垂直な方向に沿って向けられた直線偏光へとビームの円偏光を変換する。イメージングミラー 3 4 は、増幅器 1 0 への入力部におけるビーム 1 2 の像としてビーム 1 2 が反射されることを確実にするように選択される。このようにして、反射されたビーム 1 2 は、増幅材料 1 4 を通じて反対に第 1 経路 1 6 に正確に続くことが可能であり、経路 1 6 の 2 回通過を確実にする。1 回目の通過に沿った利得は、十分に高く、これによって、2 回目の通過により、飽和と効率的な取り出しとが確実になる。次にビーム 1 2 は、ビーム 1 2 が入力された時と同じ位置において、端部 2 4 を通じて増幅材料 1 4 を出る。増幅システム 1 0 の経路 1 6 に沿った最初の 2 回通過は、前置増幅段 4 6 を構成する。

40

#### 【 0 0 3 4 】

図 3 に戻って、ビーム 1 2 は、増幅材料 1 4 から出て進行し続け、第 1 レンズ 3 6 を通過した後、偏光キューブ 4 2 に衝突する。1 / 4 波長板 4 0 においてビームに生じた偏光の回転によって、ビーム 1 2 は偏光キューブ 4 2 において内部で反射される。偏光キューブ 4 2 によって、ビーム 1 2 はリターンミラー 4 4 へと再配向され、リターンミラー 4 4 は、ビーム 1 2 を別の方向に反射し、ビーム 1 2 を第 2 レンズ 3 8 に通過させる。第 1 レ

50

ンズと第2レンズとは倍率1の望遠鏡を形成し、それによって前置増幅段46からの出力の像を、増幅材料14中に、また出力増幅段48中に戻す。

【0035】

出力増幅段48では(この段48に関連する図3の部分である図5において示されている)、第1に、ビーム12は、z方向に沿って増幅材料14において伝搬し、この場合、増幅材料14の側部50に平行である。x方向、すなわち厚さ方向では、ビーム12は、また、熱により生成されたレンズによって封じ込められている一方、幅方向(wide direction)、すなわちy方向では、ビーム12は自由に発散する。端部30において1つ目の横断32の後に増幅媒質14を出ると、ビーム12は、ミラー22に衝突し、増幅材料14を通じて再配向された後、ミラー20に衝突しさらなる再配向される。複数の跳ね返り(この場合、6回の跳ね返り)は、ミラー20とミラー22との間で生じ、ビーム12は、増幅材料14を通じた7つの横断ができ、第2経路18をたどる。増幅媒質14を通じたこの1回通過は、ビーム12が増幅媒質14の遠端52において結合を外れるときに終了する(ミラー22の端54の上方を通過する)。典型的には、増幅材料14の7つ(示されているように)及び9つのいずれかの横断によって、ビーム12が進み続けてミラー54の頂端54を切り取ることなく、ビーム12の増幅材料14との重なりを最大にするように選択された横断32の数を有する経路18が作り出される。増幅システム10を通じる第2経路18は、出力増幅段48と称され、前置増幅段46において含まれてない区域からのエネルギーの取り出しが最大化されることを確実にするように設計される。

【0036】

第2経路18は、第1経路16と同じ増幅媒質の空間体積を横断することが注意される。経路16, 18は、増幅媒質14において重なると考えられ得るが、増幅媒質14に入る異なる角度によって、互いに独立しており別個である。図3に示されるように、ビーム12の増幅媒質14中への光結合は、前置増幅段46及び出力増幅段48の両方において同じ入る地点で媒質14に入るビームを用いて達成できる。

【0037】

ここで図面の図6を参照すると、パルスのシードレーザ(図示せず)と偏光キューブ42との間の入力部においてパルスピッカ56を含む増幅器10が示されている。超短パルスにおいて高いパルスエネルギーを得るためには、パルス繰返し率を低減させることが頻繁に必要であることが知られている。これは、シードレーザと増幅器10との間にパルスピッカ56を置くことによって、達成可能である。次に、増幅器10は、求められるパルスにのみ作用する。シードレーザの平均パワーは、増幅器10の平均出力パワーと比較して小さいので、遮られたパルスは、必ずしも激しい損失を構成せず、また、残部の平均パワーは、増幅器10を飽和させるのに十分である。この実施形態では、唯一の能動構成要素はパルスピッカであり、他の構成要素の全ては完全に受動である。

【0038】

一体化された前置増幅器46と出力増幅器48とを有する光増幅器10の例では、入力のシードのパワーは、0から35mWの間から変化しており、ビームは、各々が90Wを放出する4つのダイオードバー(図示せず)を用いてポンピングされた薄いスラブの出力増幅器14中に結合していた。幾何学的配置は、3つの横断32からなる第1経路16(ビーム12は、前置増幅段46において2回通過する)と、出力増幅段48についての1回通過における7つの横断32からなる第2経路とを提供するように配置されていた。連続波のファイバ結合型レーザを用いた以前の1回通過の測定によって、同様の条件下で約 $1.5\text{ cm}^{-1}$ の小信号利得係数が実証されていた一方、発信器における結晶増幅媒質14の使用によって、145Wが生成されていた。

【0039】

図7を参照すると、0から5Wの範囲の前置増幅器の出力パワー62と、0から50Wの範囲の出力増幅器の出力パワー64とに関して、0から35mWの範囲の入力のシードのパワー60についてのプロットが示されている。前置増幅器からの出力パワーは、出力

増幅器の開始の前のものである。出力増幅器の出力パワーは、7つの横断の出力増幅器に関する増幅器からのものである。全ての点は、出力増幅器からの出力パワーにおいて前置増幅器を超える増大を示している一方、入力の子ードが33mWから5mWに低減させられた場合、出力増幅器の出力における低減（～30%）と比べて、前置増幅器の出力における非常に大きな低減（～65%）が存在する。このことによって、その設計における前置増幅器の重要性が実証されている。前置増幅器によって子ードに加えられる追加のパワーは、出力増幅器を有効に飽和させるのに十分であり、これによって、子ードに関して影響の受けにくさ（degree of insensitivity）がもたらされる。例えば、子ードのパワーにおける50%の低減は、増幅器の出力においては10%の低減にしかない。

10

#### 【0040】

さらなる実証では、50Wのパワー出力は、7つの横断の出力増幅器を使用して30mWの連続波の子ードのパワーを用いて達成された。これは、前置増幅を有さないシステムにおいて30mWの子ードのパワーを用いて達成される17Wの出力よりも約3倍高い。出力ビームは、 $M^2 < 1.3$ の値を有し、ガウシアン様と観測された。増幅器が9つの横断の出力増幅器を用いて動作させられた場合、パワー出力は70Wであった一方、ガウシアン様の出力ビーム及び $M^2 < 1.3$ のビームの品質はなおも維持された。

#### 【0041】

以上の例から見るができるが、前置増幅段46を増幅媒質14内に含めることは、有効な飽和に必要なパワーを非常に下回る子ードの入力は前置増幅段46を使用して増幅されることを意味する。前置増幅段46からの出力パワーは、15mWの低さまでの子ードのパワーについて、出力増幅器48の有効な飽和を確実にするのに十分高い。次に、出力増幅器48からの出力パワーは、子ードパワーにおける増大によってほとんど影響を受けない。

20

#### 【0042】

この動作の性能の効果（ramification）は、超短パルスを使用して行われる処理のためのパルスパラメータを最適化する場合、特に重要である。子ードが固定された周波数であり5Wまでの大きくない平均パワーの従来のシステムでは、パルスピッカは、必要とされる値に周波数を低減するべく、多くの近接するパルスを捨てるのに使用され、したがって、従来のシステムでは、平均出力パワーも非常に低減させられ得る。同様の入力基準が図6に示されている増幅器に対して適用された場合、典型的には、パルスピッカの後の増幅器10からの出力パワーは、子ードから放出される出力パワーの0.1%から10%の領域における量に低減させられ得る。したがって、本発明の増幅器によって、必要とされるスピードで工業上の処理を可能にする十分に高い平均パワーへの増幅を確実にできる。

30

#### 【0043】

本発明の本質的な利点は、効率的な大量製造過程のために必要なレベルの出力パワーを生成する、パワーが低く、周波数が低減された、超短子ードパルスを増幅するための光増幅器が本発明によって提供されることである。

#### 【0044】

本発明のさらなる利点は、前置増幅器と出力増幅器とを部分的に結合させることにより能動媒質において前置増幅器と出力増幅器とを一体化させる光増幅器（比較的低いコストで小型の装置を提供する）が本発明によって提供されることである。

40

#### 【0045】

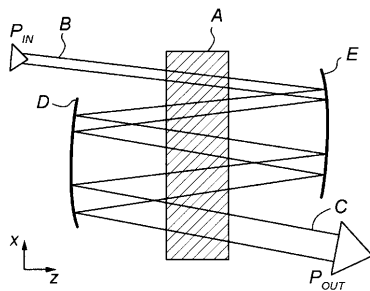
本発明の一実施形態のなおもさらなる利点は、完全に受動の構成要素を使用する光増幅器が本発明の一実施形態によって提供されることである。

本発明の範囲から逸脱することなく本明細書に記載の発明に対して様々な修正がなされ得ることが当業者によって認められる。例えば、安定又は不安定のビームは、適切な光学系を選択したり、増幅媒質内においてビームを操作したりすることによって作り出されることができる。ビームを操作するべく、薄い増幅媒質の使用によって、十分な加熱を用い

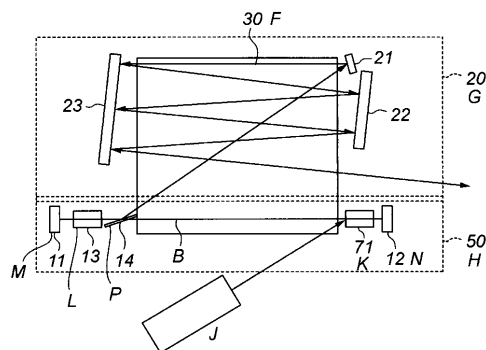
50

て、熱レンズが生成されることが可能である。ガイドが全内部反射によってなされ熱レンズが避けられるように、加熱の低減を可能にする屈折率導波構造 (index wave guide structure) が使用される場合がある。

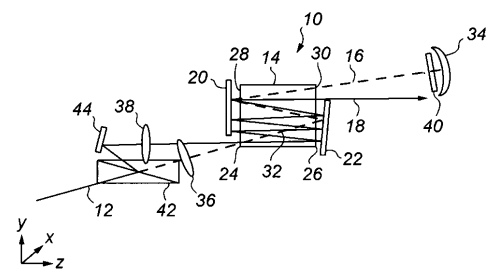
【図 1】



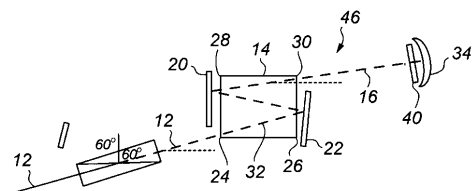
【図 2】



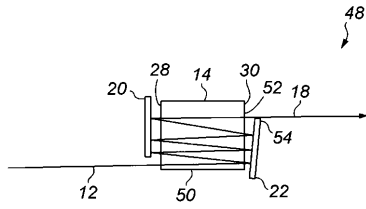
【図 3】



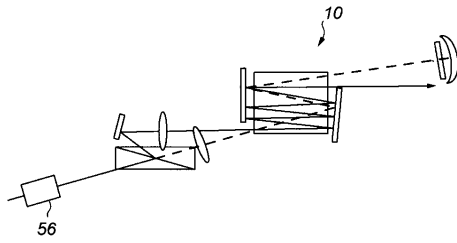
【図 4】



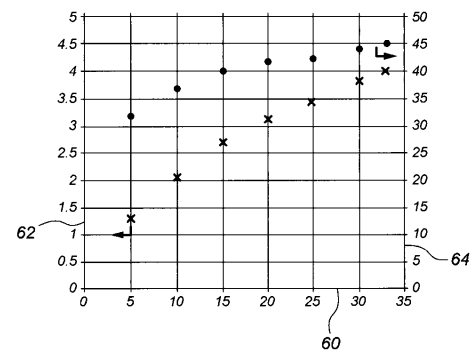
【図 5】



【図 6】



【図 7】



---

フロントページの続き

(72)発明者 ジェイソン ロバート リー  
イギリス国 HU 9 1 U G キングストン アボン ハル ピクトリア ドックブリッジ ク  
ローズ 3

(72)発明者 ベンジャミン スチュワート フルフォード  
イギリス国 HU 10 6 S G キングストン アボン ハル ウィラバイ アストン ロード  
6 4

審査官 百瀬 正之

(56)参考文献 欧州特許第 0 2 4 7 5 0 5 4 ( E P , B 1 )  
欧州特許第 0 0 8 2 1 4 5 3 ( E P , B 1 )  
国際公開第 8 8 / 0 0 9 5 7 8 ( W O , A 1 )  
特開 2 0 0 9 - 0 2 6 8 5 4 ( J P , A )  
特開 2 0 0 8 - 0 8 5 2 9 2 ( J P , A )  
国際公開第 2 0 0 6 / 0 8 6 0 3 6 ( W O , A 1 )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)  
H 0 1 S 3 / 0 0 - 3 / 3 0