

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5124092号
(P5124092)

(45) 発行日 平成25年1月23日 (2013. 1. 23)

(24) 登録日 平成24年11月2日 (2012. 11. 2)

(51) Int. Cl.

H 0 1 S 3/07 (2006. 01)

F I

H 0 1 S 3/07

請求項の数 10 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2005-369817 (P2005-369817)
 (22) 出願日 平成17年12月22日 (2005. 12. 22)
 (65) 公開番号 特開2006-179932 (P2006-179932A)
 (43) 公開日 平成18年7月6日 (2006. 7. 6)
 審査請求日 平成20年9月5日 (2008. 9. 5)
 (31) 優先権主張番号 04030553. 4
 (32) 優先日 平成16年12月23日 (2004. 12. 23)
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(73) 特許権者 504035571
 トルンプフ レーザー ゲゼルシャフト
 ミット ベシュレンクテル ハフツング
 ウント コンパニー コマンディートゲゼ
 ルシャフト
 TRUMPF Laser GmbH +
 Co. KG
 ドイツ連邦共和国 シュラムベルク アイ
 ヒハルダー シュトラーセ 39
 Aichhalder Strasse
 39, D-78713 Schramb
 erg, Germany
 (74) 代理人 100061815
 弁理士 矢野 敏雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 複数のレーザ活性媒質を有するレーザ増幅器およびレーザ共振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

固体レーザ増幅器または固体レーザ共振器 (1 ; 1' ; 1'' ; 1''' ; 1'''' ; 1''''' ; 1''''') であって、

少なくとも2つのレーザ活性媒質を共通のレーザビーム領域 (4) 内に有しており、
 当該レーザ活性媒質は前記レーザビーム領域 (4) に対してソフトアパーチャを形成し、
 レーザ結晶のポンピング内部領域内ではレーザビームの増幅が行われ、ポンピングされない外部領域ではレーザビームが吸収されることで当該アパーチャの機能が発揮されるものにおいて、

前記レーザビーム領域 (4) 内に少なくとも1つの焦点合わせ光学素子 (17 , 18) が、隣り合う2つのレーザ活性媒質の間に配置されており、

当該焦点合わせ光学素子の焦点距離および、前記隣り合う2つのレーザ活性媒質の表面 (9 , 10 ; 9b , 10a) ないし主平面 (H₂ , H₁') からの距離はそれぞれ、前記レーザ活性媒質の表面 (9 , 10 ; 9b , 10a) ないし主平面 (H₂ , H₁') が近似的に光学的に相互に共役であるように選択されている、
 ことを特徴とする固体レーザ増幅器または固体レーザ共振器。

【請求項 2】

前記レーザ活性媒質の表面ないし主平面が近視野 - 遠視野 - 変換によって相互に移行可能であり、

当該近視野 - 遠視野 - 変換は前記レーザ活性媒質のソフトアパーチャと組み合わせられて

10

20

、前記レーザビーム領域の熱的に誘起された回折成分のフィルタリング除去を引き起こす、請求項 1 記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 3】

前記少なくとも 1 つの焦点合わせ光学素子はポジティブな焦点距離 (f_1) を有するレンズ (18) であって、

当該レンズはおおよそ、前記隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面 (9, 10) ないし主平面から焦点距離間隔でレーザビーム領域 (4) 内に配置されている、請求項 1 または 2 記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 4】

前記少なくとも 1 つの焦点合わせ光学素子は球面凹面鏡 (17) であって、

当該球面凹面鏡はおおよそ、前記隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面 (9, 10; 9b, 10a) ないし主平面から半分の曲率半径 (R_1) の間隔でレーザビーム領域 (4) 内に配置されている、請求項 1 から 3 までのいずれか 1 項記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 5】

少なくとも 1 つの付加的な焦点合わせ光学素子がレーザビーム領域 (4) 内に配置されており、

当該焦点合わせ光学素子の焦点距離および、隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面 (9a, 9b, 10a; 10b) ないし主平面への距離は、当該表面ないし主平面が近似的に重なり合って結像されるように選択されている、請求項 1 から 4 までのいずれか 1 項記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 6】

前記少なくとも 1 つの付加的な焦点合わせ光学素子は結像素子であり、

当該結像素子は、前記隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面 (9, 10; 9a, 9b, 10a, 10b) ないし主平面を縮尺 1 対 1 で重なり合って結像する、請求項 5 記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 7】

前記少なくとも 1 つの付加的な焦点合わせ光学素子はポジティブな焦点距離を有するレンズであって、

当該レンズはおおよそ、前記隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面ないし主平面から 2 倍の焦点距離間隔で配置されている、請求項 5 または 6 記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 8】

前記少なくとも 1 つの付加的な焦点合わせ光学素子は球面凹面鏡 (21; 21a, 21b) であって、

当該球面凹面鏡はおおよそ、2 つのレーザ活性媒質 (2, 3; 2a, 2b; 3a, 3b) の隣り合う表面 (9, 10; 9a, 9b, 10a, 10b) から自身の半径 (R_2) の間隔で配置されている、請求項 5 から 7 までのいずれか 1 項記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 9】

前記少なくとも 1 つの付加的な焦点合わせ光学素子は、2 つの有利には同一の凹面鏡 (23a, 23b) またはレンズから成るテレスコープ装置によって構成されている、請求項 5 から 8 までのいずれか 1 項記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【請求項 10】

ディスクレーザ結晶 (2a, 2b, 3a, 3b) の少なくとも 2 つの対 (19, 20) がレーザビーム領域 (4) 内に配置されており、

当該各対 (19, 20) のディスクレーザ結晶 (2a, 2b, 3a, 3b) の表面 (9a, 9b, 10a, 10b) はそれぞれ第 1 の焦点合わせ光学素子 (21a, 21b) によって重なり合って結像され、

レーザビーム領域 (4) 内に、前記対 (19, 20) の間に、第 2 の焦点合わせ光学素

10

20

30

40

50

子(17)が配置されており、

当該焦点合わせ光学素子は1つの対(19)のディスクレーザ結晶(2b)の表面(9)および別の対(20)のディスクレーザ結晶(3a)の表面(10a)を光学的に相互に共役にする、請求項1から9までのいずれか1項記載のレーザ増幅器またはレーザ共振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、共通のレーザビーム領域内に少なくとも2つのレーザ活性媒質を有する固体レーザ増幅器ないし固体レーザ共振器に関する。ここでレーザ活性媒質は、レーザビーム領域に対してハードな開口(harte Apertur)を構成しない。

【背景技術】

【0002】

DE19835108A1号には、冒頭に記載した形式のレーザ共振器が記載されている。ここでは複数のディスクレーザ結晶が1つの共通の共振器内に配置されている。レーザビーム領域はこれらのレーザ結晶を通る。この共振器は、レーザビーム領域を構成するために、2つの終端ミラーと、ディスクレーザ結晶間に付加的に配置された偏向ミラー(平面鏡)を有している。

【0003】

高出力固体レーザ用の共振器の設計時には、変化する動作パラメータのもとで、目標、すなわち共振器の高い安定性と一定の放射特性が達成されるべきである。従来の高出力ロッドレーザに対して、高出力ディスクレーザでは、その上に固定されたレーザ活性媒質を安定させるために十分に剛性の高いヒートシンクまたは透明な防御体を使用する場合に、レーザ活性媒質を共振器ビームが通過する時の、共振器ビーム領域の熱的に誘起された球面波面変形(熱レンズ)は、共振器の安定性に対する支配的な要因ではない。従って高出力ディスクレーザは次のように設計されるべきである。すなわち、共振器が全体的なポンピング出力領域において、安定性ダイヤグラム(g-ダイヤグラム)によって記載されているような、動的な安定領域の臨界的な点ないしは境界から離れているように設計されるべきである。これは、レーザ活性媒質(ディスクレーザ結晶)が共振器内に複数個ある場合にもあてはまる。

【0004】

ディスクレーザ共振器ないしはディスクレーザ増幅器の場合、2つの異なる作用が、レーザビーム領域の特性へ格段に大きい影響を有する。すなわち、一方ではレーザ活性媒質をレーザビーム領域が通過する時に生じる静的な波面変形であり、他方では熱的に誘起された屈折損失である。

【0005】

レーザビーム領域の静的波面変形は、レーザ活性媒質がその理想形から偏差することによって生じる。これは殊に製造許容誤差が原因で生じる。静的波面変形は、球面成分および不均衡(非球面)成分から成る。球面成分は、所望の半径からレーザ活性媒質が偏差することから結果として生じる。球面成分は、レーザ活性媒質の目標屈折度と実際屈折度との差から生じ、これは(静的な)屈折度エラー(Brechkraftfehler)とも称される。静的な屈折度エラーは、-高出力ディスクレーザの場合にも存在する-、動的な熱レンズに加わり、むしろこれを上回る。ディスクレーザ共振器ないし増幅器内の複数の結晶の屈折度エラーは、共振器または増幅器の設計時に考慮されなければならない。典型的な設計では、-屈折度が同じであると仮定して-、異なる結晶上にレーザビーム領域の同じ直径が設定される。しかし結晶の異なる屈折度によって、多かれ少なかれ、結晶上の異なるビーム直径が生じてしまう。これによって以下に記載する問題が生じる：拡大されたビーム直径を伴う結晶上で、レーザビーム領域の外部領域が増幅されるのではなく、部分的に吸収されてしまう。これに対して、縮小されたビーム直径を有する結晶では、ポンピングスポットの外部領域内で使用可能なパワーがもはや呼び出されない。後者は不利な場合には、局

10

20

30

40

50

部的な結晶の過度加熱および結晶の破壊につながってしまう。それぞれの場合において、効率の低下が生じる。

【 0 0 0 6 】

熱的に誘起された、ディスクレーザ共振器ないし増幅器内の回折損失は、レーザビーム領域の不均衡な波面変形によって、熱的に負荷されたレーザ活性媒質の通過時に呼び起こされる。ディスクレーザの場合には、波面変形がポンピングスポットの縁部領域内で支配的である。すなわち、高温の、ポンピング結晶領域から、低温の非ポンピング外部領域への移行部において波面変形が支配的である。付加的に、変動する、熱的に異なって負荷された領域が原因で生じるポンピング光分布における不均一性並びにレーザビーム領域のひずみがレーザ活性媒質内で作用する。波面のひずみによって、共振器内で共振器モード間のエネルギーが再分配される。これによって、共振器内で十分には増幅されないモード（リークモード）におけるエネルギー伝送も生じる。ディスクレーザは、自身の増幅が僅かであるので、この種の損失に特に敏感に反応する。損失は、共振器の設計およびここでは殊にレーザ出力ビームの必要とされるビーム品質に依存する。ディスクレーザ増幅器内では熱的に誘起された回折力が、増幅段間のフィルタリングが不十分な場合に、放射経過特性において連続的に増大するビーム品質の悪化を生じさせる。その後、ビーム品質がハードな絞り（harte Blenden）によって再び形成される場合には、これは場合によっては甚大な出力損失ないし効率損失を意味する。

【 0 0 0 7 】

ディスクレーザ共振器ないしディスクレーザ増幅器のビーム品質に対する要求が高くなればなるほど、回折作用はより強く効率に作用する。同じように、感度は動的および静的な屈折度エラーに対する特性を有する：ポンピングスポット直径が大きくなればなるほど、要求されるビーム品質が高くなればなるほど、動的な安定領域、すなわちレーザ活性媒質の屈折度の許容範囲が狭くなる。

【 0 0 0 8 】

静的な屈折度エラーの影響も、熱的に誘起された回折損失の影響も、共振器循環間のないしは増幅器ループ内での、レーザビーム領域のレーザ活性媒質通過数とともに増大する。どれくらい強く通過数が作用するかは、実質的に、共振器ないし増幅器の構成に依存する。

【 0 0 0 9 】

静的な屈折度エラーおよび熱誘起回折損失は、共振器または増幅器内に複数のロッドを有する高出力ロッドレーザの場合にも、効率および共振器安定性に影響を与える。この影響は殊に、ビーム品質への要求が高い場合、ビーム断面が大きい場合、レーザ結晶を通過する毎の増幅が低い場合およびハードな絞りが欠如する場合（例えばロッド套面）に顕著になる。強い熱レンズおよび高い増幅で動的に安定してロッドレーザシステムが設計されている場合（例えば 1064 nm で $\text{Nd}:\text{YAG}$ または $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ）、ビーム品質は熱レンズによって制限され、回折損失は典型的にハードな開口によって支配されるので、熱によって誘起される回折損失はバックグラウンド内に生じる。制限された動的な安定領域（すなわちほぼ一定なポンピングパワー）およびハードな開口の欠如を伴うロッドレーザシステムの場合、並びに有利には僅かな増幅を伴うレーザ活性媒質の場合（例えば $\text{Yb}:\text{YAG}$ ）、熱的に誘起される回折損失は効率に基本的な影響を及ぼす。

【 0 0 1 0 】

ディスクレーザの場合には、ハードな、直接的にアクティブ容積に接する絞りの欠如はレーザの特徴的な特性である。ディスクレーザの場合、放射パラメータ積を固定するためにハードな開口を使用する必要はなく、一般的に有意義でもない。なぜなら、絞りでの回折損失はディスクレーザ共振器の効率を著しく低減させ、絞りは非常に正確に中心に合わせられ、直径において注意深く共振器モードに整合され、（少なくともレーザ出力が高い場合には）冷却されなければならないからである。ポンピングされないレーザ結晶ディスクの外側領域は、三準位レーザシステムでは、ディスクレーザに対して通常のイッテルビウム・ドープ・レーザ材料（ $\text{Yb}:\text{YAG}$ 等）のように、レーザビームに対する吸収を有

10

20

30

40

50

しているので、これはポンピング部分領域と結合して、「ソフトな」増幅 - / 損失 - 絞り（英語ではgain aperture：ゲインアパーチャ）を形成する：レーザ結晶のポンピング内部領域内ではレーザビームの増幅が行われ、ポンピングされない外部領域ではレーザビームは吸収される。このような「ソフトな」絞りは、同時に回折損失が著しく低減される場合、ハードな絞りの機能を担う。欠点は、増幅 - / 損失 - 絞りのポジションが共振器内で、レーザ結晶の軸方向ポジションによって固定的に設定されてしまうことである。

【 0 0 1 1 】

ロッドレーザでは、ロッド套面が開口として作用しない場合、レーザビーム領域内のハードな絞りは回避される。これは例えば軸方向の場合は、中央の部分容積内でのみポンピングされるロッドの場合である。ハードな絞りを回避するための他の方法は、結合された

10

【特許文献 1】独国特許出願公開第 1 9 8 3 5 1 0 8 号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 2 】

本発明の課題は、レーザ活性媒質がハードな開口（すなわち、設計に従ったビーム断面を有効にトリミングするないし制限する、シャープな縁部を有している絞り）をレーザビーム領域に対して形成しない、冒頭に記載した形式のレーザ共振器または増幅器を次のように改善することである。すなわち、共振器ないしは増幅器の効率、ひいては結果として生じるビーム品質へ与えられる（静的な屈折度エラーの）静的な波面変形の影響、殊に熱的に誘起される回折損失の影響が、レーザビーム領域内にハードな絞りを設けることなく、最小化されるように改善することである。

20

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 3 】

上述の課題は、本発明では、固体レーザ増幅器または固体レーザ共振器であって、少なくとも 2 つのレーザ活性媒質を共通のレーザビーム領域内に有しており、当該レーザ活性媒質は前記レーザビーム領域に対してハードな開口を構成しない形式のものにおいて、前記レーザビーム領域内に少なくとも 1 つの焦点合わせ光学素子が、隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の間に配置されており、当該焦点合わせ光学素子の焦点距離と、前記隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面ないし主平面からの距離はそれぞれ、前記レーザ活性媒質の表面ないし主平面が近似的に光学的に相互に共役であるように選択されている、ことを特徴とする固体レーザ増幅器または固体レーザ共振器によって解決される。

30

【 0 0 1 4 】

前述の課題は、本発明と相応に次のことによって解決される。すなわち、レーザビーム領域内で、隣り合う 2 つのレーザ活性媒質間に、少なくとも 1 つの焦点合わせ光学素子を配置することによって解決される。この光学素子の焦点距離および、隣り合う 2 つのレーザ活性媒質の表面ないし主平面からのその距離は次のように選択される。すなわちレーザ活性媒質の表面ないし主平面が近似的に光学的に相互に共役であるように選択される。すなわち、近視野 - 遠視野 - 変換（Nahfeld-Fernfeld-Transformation）（フーリエ変換）によって相互に移行可能であるように選択される。

40

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 1 5 】

結合されたレーザ活性媒質間の近視野 - 遠視野変換によって、レーザビーム領域の熱的に誘起された回折成分のフィルタリング除去が、ハードな絞りをなしに実現される。等しくない、ディスクレーザ結晶の表面ないしレーザロッドの主平面によって構成された、レーザ放射経過内の 2 つの面は、レーザ結晶のポンピング領域の増幅 - / 損失 - 絞りによってフィルタリングされる。2 つの面は、相互に（近似的に）共役である。すなわち、1 つの

50

面は、一方はそれぞれ他方の面の遠視野をあらわしている。増幅されるべきビームの光学路長はレーザロッド内で、ディスクレーザ結晶とは異なり、典型的には無視できるほど短くないので、レーザロッドの結合時には、近視野 - 遠視野 - 変換は、ロッド内の選択された点に対してのみ実施可能である。従って相互に属する近視野ないし遠視野はロッドの主平面内に位置する。

【 0 0 1 6 】

本発明のレーザ共振器またはレーザ増幅器の有利な実施形態では、近視野 - 遠視野 - 変換のための焦点合わせ光学素子は、ポジティブな焦点距離を有するレンズである。これは約、2つのディスクレーザ結晶の表面から、または2つのレーザロッドの隣接する主平面から焦点距離間隔で配置されている。レンズは、第1の結晶に由来する各回折成分に対する自身の焦点面において、各回折角度に対して比例する、放射軸からの間隔で回折像を形成する。焦点面には、第2の、結合されたディスクレーザ結晶ないしは第2の、結合されたレーザロッドの主平面が存在する。その「ソフトな」増幅 - ノ損失 - 絞りは、過度に大きい（すなわち要求された放射質と一致しない回折角）を伴うビーム成分がフィルタリング除去される。レーザ結晶の逆の順序では、レンズが同じように作用する。

【 0 0 1 7 】

別の有利な実施形態では、近視野 - 遠視野 - 変換のための焦点合わせ光学素子は、球面凹面鏡である。この凹面鏡は、ほぼ、2つのディスクレーザ結晶の表面ないしは2つのレーザロッドの隣り合う主平面から半分の曲率半径の距離で配置される。2つのレーザ結晶ないしはその隣り合う主平面はそれぞれ近似的に、ミラーの焦点面内に位置する。この配置は、焦点合わせ素子として1つのレンズを使用する場合とは異なって、次のような利点をもたらす。すなわち、凹面鏡がレーザビーム領域によって通過されないという利点をもたらす。従って焦点合わせ素子内での熱的ノイズが回避され、有利には誘電的に高反射性に構成された鏡層が適切に設計されている場合には、焦点合わせ光学系での最小損失が実現される。択一的な構成では、球面凹面鏡の代わりに、パラボラミラーまたは環状鏡が使用される。

【 0 0 1 8 】

本発明のレーザ共振器またはレーザ増幅器の発展形態では、屈折度エラーの影響が、共通の共振器または増幅器内で複数のレーザ結晶が駆動される場合、次のような配置構成によって低減される。この配置構成では、少なくとも1つの付加的な焦点合わせ光学素子が、（それぞれ）隣り合う2つの、共振器内に配置されたレーザ結晶間に挿入される。この付加的な焦点合わせ光学素子は、結晶ないし結晶主平面の結像、ひいてはポンピングされる部分領域（ポンピングスポット）並びに結晶上ないしは結晶主平面内のレーザビーム領域の重なり合った結像を生じさせる。この結像によって、2つの結晶ないし結晶主平面上でのレーザビーム領域の直径の割合が、その屈折度に依存しないで、結像縮尺のみによって定められる。

【 0 0 1 9 】

本発明のレーザ共振器またはレーザ増幅器の有利な実施形態では、結像のための付加的な焦点合わせ光学素子は次のように構成され、レーザビーム領域内に配置されている。すなわち、2つのディスクレーザ結晶の表面ないしは2つのレーザロッドの隣り合う主平面が1対1の縮尺で重なり合って（aufeinander）結像されるように構成および配置されている。1:1の結像の場合には、場合によって生じうる屈折度差には依存しないで、2つのディスクレーザ結晶上ないしはレーザロッドの隣り合う主平面内にレーザビーム領域の同じ直径が生じる。このような結像縮尺は、次のような場合には常に有意義である。すなわち、- 多くの場合において通常であり有利であるように - 、2つのレーザ結晶が、同じポンピングスポット直径を有する同一のポンピングビーム装置によってポンピングされる場合には常に有意義である。共振器の場合には、2つのレーザ結晶は、この結像によって近似的に、個々の屈折度の合計に相当する屈折度を伴う個別のレーザ結晶になる。

【 0 0 2 0 】

1つの実施形態では、結像のための付加的な焦点合わせ光学素子はポジティブな焦点距

10

20

30

40

50

離を有するレンズから成る。このレンズはほぼ、2つのディスクレーザ結晶の表面ないし2つのレーザロッドの隣り合う主平面から、2倍の焦点距離間隔で配置されている。従って、自動的にディスクレーザ結晶ないしは主平面の1:1結像が重なり合って生じる。

【0021】

別の有利な実施形態では、結像のための付加的な焦点合わせ光学素子は、球面凹面鏡である。この球面鏡はほぼ、2つのディスクレーザ結晶の表面ないしは2つのレーザロッドの隣り合う主平面から自身の半径の距離で配置されている。この様な配置構成は、焦点合わせ素子として1つのレンズを使用する場合とは異なって次のような利点をもたらす。すなわち、凹面鏡がレーザビーム領域によって通過されないという利点をもたらす。これによって光学素子内での熱的ノイズが回避され、適切な、高反射性ミラー層によって損失が最小化される。択一的な構成では球面凹面鏡の代わりに、パラボラミラーまたは環状鏡が使用される。

10

【0022】

別の、特に有利な実施形態では、結像のための付加的な焦点合わせ光学素子が、2つの有利には同一の凹面鏡またはレンズから成るテレスコープ装置によって構成される。個々のミラーまたは個々のレンズによる結像は、2つのレーザ結晶および結像素子から成るユニットの余剰屈折度につながる。その値は、レンズの焦点距離ないしはミラーの半径に対して逆比例である。別の共振器構成のために、この余剰屈折度を低く保つことが必要である場合には、レンズの焦点距離ないし鏡の半径は非常に大きく選択されなければならない。このような欠点はテレスコープの使用によって回避可能であり、このテレスコープは、同じ半径を有する2つの凹面鏡または同じ焦点距離を有する2つのレンズから成る。ここでミラーはそれぞれほぼ、半分の半径の距離で配置されており、レンズは同じように、2つのレーザ結晶のうちのそれぞれ1つから焦点距離の間隔で配置されている。余剰屈折度なしに結像が実現されるべき場合には2つの鏡の間隔は半径と同じであり、同じようにレンズ間隔は2倍の焦点距離と同じである。ミラーないしレンズ間隔を変えることによって所期のように、ポジティブな余剰屈折度もネガティブな余剰屈折度も生成される。これは例えば、重なり合って結像される2つのレーザ結晶の総屈折度における許容公差の補償を可能にする。

20

【0023】

2つより多いレーザ活性媒質が1つのレーザ共振器またはレーザ増幅器内に配置される場合、有利には、2つの結晶表面ないしは主平面の重なり合った結像も、近視野 - 遠視野変換もレーザビーム領域に影響を与えるために使用可能である。しかし通常はレーザ結晶の同じ対ではない。しかし次のことも可能である。すなわち、例えば偏向ミラーをビーム路内に取り付けることによって、増幅器または共振器内のビーム領域が幾重にも同じレーザ結晶を介して進むことも可能である。このような実施形態では同一のレーザ結晶対での結像と、近視野 - 遠視野 - 変換を組み合わせることも可能である。

30

【0024】

ディスクレーザ共振器の殊に有利な実施形態では、少なくとも2つのディスクレーザ結晶対が共振器のビーム領域内に配置され、ここで各対のディスクレーザ結晶の表面はそれぞれ第1の焦点合わせ光学素子によって重なり合って結像され、第2の焦点合わせ光学素子はレーザビーム領域内に、これらの対の間に配置され、一方の対のディスクレーザ結晶の表面と、他方の対のディスクレーザ結晶の表面が光学的に相互に共役である。このような配置構成によって個々のレーザ結晶の屈折度エラーが補償され、さらにレーザビーム領域の不所望な熱的に誘起される回折成分もフィルタリング除去される。このように構成されたレーザ共振器は、一定の放射特性を伴う大きい安定領域を有する。しかも付加的なハードな絞りがレーザビーム領域内に取り付けられることはない。

40

【0025】

本発明のさらなる利点を明細書および図面に記載する。同じように上述した特徴およびさらに記載される特徴を、それ自体で、または複数の、任意の組み合わせにおいて使用することが可能である。図示されたおよび記載された実施形態は、単なる列举として理解さ

50

れるべきではなく、むしろ本発明を記述するための例示的な特性を有している。

【実施例】

【0026】

図1に示されたレーザ共振器1は、第1のディスクレーザ結晶2と、第2のディスクレーザ結晶3を有している。これらは終端ミラー5と取り出しミラー6の間に、共通のレーザビーム領域4内のレーザ活性媒質として配置されている。2つのディスクレーザ結晶2, 3は以降に記載するポンピングおよび冷却のための装置と同じように、同一の形状を有している。

【0027】

ディスクレーザ結晶2, 3は、2つの平面を有するディスクとして構成されている。ディスクレーザ結晶2, 3はその下方平面でヒートシンク7, 8に取り付けられている。上方平面（以下ではディスクレーザ結晶2, 3の表面9, 10と称される）には、破線で示された2つのポンピングビーム領域11, 12が入射する。これらのポンピングビーム領域は、2つのポンピングモジュール13, 14によって生成される。これは、ポンピングビームを生成する図示されていないポンピング装置の一部である。ポンピングビーム領域11, 12は、パラボラミラー装置15, 16によって、ディスクレーザ結晶2, 3の表面9, 10上に、ポンピング光スポットとして焦点合わせされる。パラボラミラー装置15, 16はそれぞれ中央の開口部を有している。この開口部を通して、レーザビーム領域4はディスクレーザ結晶2, 3に達し、このディスクレーザ結晶内のレーザアクティブ固体容積内に侵入することができる。開口部はここでは充分な大きさに構成されるので、この開口部はレーザビーム領域4に対する絞り作用を有していない。ディスクレーザ結晶2, 3は自身の下方平面で、ポンピングビームのために、またレーザビームのために反射性に積層されている。

【0028】

球面の凹面鏡17はレーザビーム領域4内に、第1のディスクレーザ結晶2と第2のディスクレーザ結晶3の間で、第1のディスクレーザ結晶2からも、第2のディスクレーザ結晶3の表面10からも、約自身の半分の半径 R_1 の距離で離れて配置されている。球面凹面鏡17によって、ディスクレーザ結晶3の表面10およびディスクレーザ結晶2の表面9は光学的に相互に共役になる。すなわち、近視野 - 遠視野 - 変換（フーリエ変換）を介して相互に移行可能である。表面9および10上のポンピング光スポットの縁部領域は、レーザビーム領域4に対するソフトな絞りとして作用する。

【0029】

図2に示されたレーザ共振器1'は2つのディスクレーザ結晶2, 3を有している。これらのディスクレーザ結晶の表面9, 10は焦点距離 f_1 を有する集光レンズ18を介して結合されている。集光レンズ18は、第1の表面9からも第2の表面10からも距離 f_1 で離れて配置されている。これによってディスクレーザ結晶3の表面10およびディスクレーザ結晶2の表面9は光学的に相互に共役になる。すなわち、これらは近視野 - 遠視野 - 変換（フーリエ変換）を介して相互に移行可能である。従って、レーザ結晶2および3の表面9および10上のポンピング光スポットの縁部領域は、レーザビーム領域4に対するソフトな絞りとして作用する。レーザ共振器1'は、その他の点では自身の構成において、図1に記載されたレーザ共振器1に相応しているので、詳細には記載しない。

【0030】

近視野 - 遠視野 - 変換によって、共振器の残りの部分には依存しないで、レーザビームの最大の放射パラメータ積 $w \cdot \theta$ が定められる：焦点合わせ光学素子として凹面鏡17を有する装置の場合には、

$$w \cdot \theta = 2 (w_1 \cdot w_2) / R_1$$

が生じる（ w_1, w_2 ：2つのディスクレーザ結晶上のレーザビーム領域の直径； θ ：ビームの開き， R_1 ：凹面鏡17の半径）。

【0031】

なぜならこの条件を満たすレーザビーム領域の一部しか、ディスクレーザ結晶2, 3の

「ソフトな」増幅 - / 損失 - 絞りでフィルタリングされない。凹面鏡 17 が、焦点距離 f_1 を有するレンズ 18 によって置き換えられる同様の装置に対しては、最大の放射パラメータ積： $w \cdot \theta = (w_1 \cdot w_2) / f_1$ が生じる。

【0032】

レーザ共振器 1, 1' は有利には、少なくともこの放射パラメータ積を許容するように設計されている。レーザ共振器のエンドアームの設計によって定められたビーム品質が、近視野 - 遠視野 - 変換によって定められた上限にちょうど一致する場合、有利な特別のケースが存在する。第 1 のエンドアームの長さは、終端ミラー 5 からディスクレーザ結晶 2 の表面 9 の距離によってあらわされ、第 2 のエンドアームの長さは、取り出しミラー 6 からディスクレーザ結晶 3 の表面 10 の距離によってあらわされる。

【0033】

図 3 には、レーザ共振器 1''' が示されている。このレーザ共振器は 2 つのロッド型レーザ結晶 2', 3' をレーザビーム領域 4 内に有している。これらのレーザ結晶は近視野 - 遠視野 - 変換を介して結合されている。レーザ結晶 2', 3' は、それぞれ第 1 の主平面 H_1, H_1' と第 2 の主平面 H_2, H_2' を有している。レーザ結晶 2', 3' は軸方向で、中央の部分容積内でのみポンピングされる。これらのレーザ結晶は低い増幅度を有する材料から成る。これは例えば Yb:YAG である。図示された実施例では、レーザ活性媒質内でのハードな開口の出現は、ポンピングモジュール 13, 14 としての（ファイバー結合された）レーザダイオードによる中央の軸方向部分領域のポンピングによって実現される。ポンピング光ビーム 11, 12 は、終端ミラー 5 ないし取り出しミラー 6 としての 2 つのダイクロック共振器ミラー並びに別の、共振器外のダイクロック分割ミラー 22 を介して、軸方向でロッド型レーザ結晶 2', 3' 内に放射される。ここでこの分割ミラーは発生したレーザビームをポンピング光と分ける。近視野 - 遠視野 - 変換の最適な機能のために、熱レンズの動的な領域はレーザ共振器 1''' の動作条件が変化する場合、g - ダイアグラムの安定領域の境界まで延在するべきではない。有利には、ロッドレーザは（実質的に）一定のポンピング出力で作動される。これによって熱レンズの影響が僅かに保たれ、高いビーム品質が可能になる。場合によっては、付加的に、例えば中心に配置された 90° ローターによる熱的に誘起される複屈折の補償が必要である。ビーム断面が大きく、かつビーム品質が高い場合にのみ、ソフトな開口による近視野および遠視野におけるフィルタリングが有意義にレーザ作用角度に作用する。ロッド型レーザ結晶 2', 3' 間にはポジティブな焦点距離 f_1 を有するレンズ 18 が配置されている。2 つのレーザロッドの隣り合う主平面 H_2 および H_1' からのその距離は、それぞれほぼその焦点距離 f_1 に相当する。従って左側のロッドの主平面 H_2 に属する遠視野は、焦点距離 f_1 の距離で、レンズの右側に位置する；ここには、右側のロッドの主平面 H_1' が配置されている。近視野 - 遠視野 - 変換は近似的にレーザロッドの軸方向領域内で有効である。ここでは、フレネル数 $F = a^2 / (\lambda \cdot L)$ は 1 より格段に大きい ($F \gg 1$)。ここで a は回折構造体の横断方向伸張であり、 λ はレーザビームの波長であり、 L は精密な変換面からの軸方向間隔である。回折構造体が十分に大きく、レーザロッドが長すぎない場合には、近視野 - 遠視野 - 変換によって回折損失が著しく低減される。

【0034】

図 4 にはレーザ共振器 1'''' が示されている。このレーザ共振器はディスクレーザ結晶 2a, 2b の第 1 の対 19 とディスクレーザ結晶 3a, 3b の第 2 の対 20 を有している。第 1 の対 19 の 2 つのレーザ結晶 2a, 2b の表面 9a, 9b は重なり合って、結像光学素子として用いられる球面凹面鏡 21a によって縮尺 1:1 で結像される。この球面凹面鏡は、ディスクレーザ結晶 2a, 2b の表面 9a, 9b に対して自身の半径 R_2 の距離で配置されている。同じように、第 2 の対 20 の 2 つのディスクレーザ結晶 3a, 3b の表面 10a, 10b は重なり合って、球面凹面鏡 21b によって結像される。凹面鏡 17 は、第 1 の対 19 のディスクレーザ結晶 2b の表面 9b と、第 2 の対 20 のディスクレーザ結晶 3a の表面 10a との間に、自身の半径 R_1 の距離で配置されている。球面凹面鏡 17 は、2 つの対 19, 20 を次のように結合させる。すなわち、2 つの共通のレーザビ

10

20

30

40

50

ーム領域 4 が生じるように結合させる。これによって、第 1 の対 19 のディスクレーザ結晶 2 b の表面 9 b と、第 2 の対 20 のディスクレーザ結晶 3 a の表面 10 a は光学的に相互に共役になる。すなわち、近視野 - 遠視野 - 変換（フーリエ変換）を介して相互に移行可能である。表面 9 b および 10 a 上のポンピング光スポットの縁部領域は、レーザビーム領域 4 に対するソフトな絞りとして作用する。

【0035】

図 5 には、レーザ共振器またはレーザ増幅器 1' 的部分が示されている。ここでは 2 つのディスクレーザ結晶 2, 3 の間に、レーザ結晶の相互結像のための焦点合わせ光学素子としての 2 つの球面凹面鏡 23 a, 23 b から成る望遠鏡が配置されている。凹面鏡 23 a, 23 b は同一の曲率半径 R_2 を有しており、隣り合うレーザ結晶 2, 3 から、自身の半分の半径 R_2 で配置されている。結像が屈折度余剰分なしで得られるべき場合、2 つの凹面鏡 23 a, 23 b 間の間隔は、ミラー半径 R_2 と同じである。凹面鏡 23 a, 23 b の相互の間隔を、 R_2 から $R_2 + d$ へ変えることによって、所期のようにポジティブ ($d > 0$) な余剰屈折度もネガティブ ($d < 0$) な余剰屈折度も形成される。

【0036】

図 6 には、レーザビーム領域 4 内に 2 つのディスクレーザ結晶 2, 3 を有するレーザ共振器 1'' 部分を示されている。ここでは近視野 - 遠視野 - 変換も、ディスクレーザ結晶 2, 3 の重なり合った結像も、ディスクレーザ結晶 2, 3 の同じ対で使用される。レーザビーム領域 4 の経路は共振器内で、終端ミラー 5 からレーザ結晶 3 へ延在し、レーザ結晶 3 から、球面凹面鏡 17 を介してレーザ結晶 2 へ延在し、引き続き 2 つの平坦な偏向ミラー 24 a, 24 b を介してレーザ結晶 2 へ戻り、レーザ結晶 2 から別の球面凹面鏡 21 を介して再びレーザ結晶 3 まで延在し、最終的に取り出しミラーへ延在する。球面凹面鏡 17 によって、ディスクレーザ結晶 3 の表面 10 とディスクレーザ結晶 2 の表面 9 が光学的に相互に共役になる。すなわち、近視野 - 遠視野 - 変換（フーリエ変換）を介して相互に移行可能である。このために凹面鏡 17 はそれぞれ近似的に、自身の半分の半径 R_1 の距離で、ディスクレーザ結晶 2, 3 に対して配置されている。別の球面凹面鏡 21 によって、ディスクレーザ結晶 2 および 3 の表面 9 および 10 は重なり合って、有利には縮尺 1:1 で結像される。このために、別の凹面鏡 21 はそれぞれ近似して、自身の半径 R_2 の距離で、ディスクレーザ結晶 2, 3 に対して配置されている。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図 1】2 つのディスクレーザ結晶と、近視野 - 遠視野 - 変換用の焦点合わせ光学素子としての 1 つの球面凹面鏡とを有する本発明によるレーザ共振器の第 1 の実施形態を概略的に示した図。

【図 2】2 つのディスクレーザ結晶と、近視野 - 遠視野 - 変換用の焦点合わせ光学素子としての 1 つの集光レンズとを有する本発明によるレーザ共振器の第 2 の実施形態を概略的に示した図。

【図 3】2 つのレーザロッドと、近視野 - 遠視野 - 変換用の焦点合わせ光学素子としての 1 つの集光レンズとを有する本発明によるレーザ共振器の第 3 の実施形態を概略的に示した図。

【図 4】ディスクレーザの 2 つの結晶対と、近視野 - 遠視野 - 変換および結像用の焦点合わせ光学素子としての球面凹面鏡とを有する本発明によるレーザ共振器の第 4 の実施形態を概略的に示した図。

【図 5】2 つのディスクレーザ結晶と、レーザ結晶の重なり合った結像用の焦点合わせ光学素子としての 2 つの球面凹面鏡から成る望遠鏡を有する本発明によるレーザ共振器またはレーザ増幅器の第 5 の実施形態の細部を概略的に示した図。

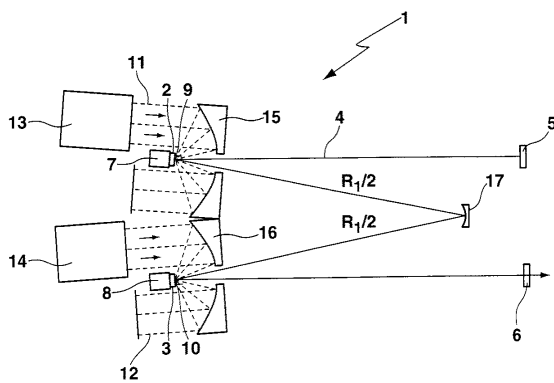
【図 6】2 つのディスクレーザ結晶と、近視野 - 遠視野 - 変換および結像用の焦点合わせ光学素子としての球面凹面鏡とを有する本発明によるレーザ共振器の第 6 の実施形態を概略的に示した図。

【符号の説明】

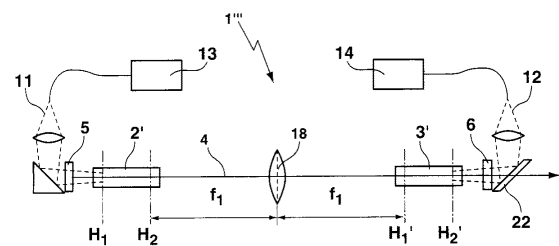
【 0 0 3 8 】

1 レーザ増幅器、 2, 3 ディスクレーザ結晶、 2', 3' ロッド型レーザ結晶、 4 レーザビーム領域、 5 終端ミラー、 6 取り出しミラー、 7, 8 ヒートシンク、 9, 10 ディスクレーザ結晶の表面、 11, 12 ポンピングビーム領域、 13, 14 ポンピングモジュール、 15, 16 パラボラミラー装置、 17, 21, 23 球面凹面鏡、 18 集光レンズ、 19, 20 ディスクレーザ結晶の対、 22 ダイクロック分割ミラー、 24 偏向ミラー

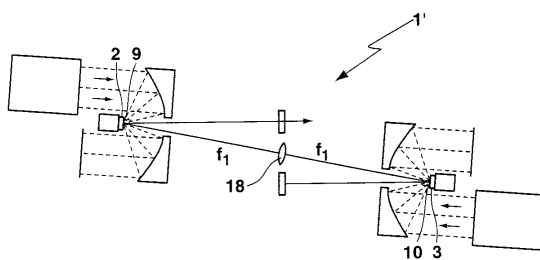
【 図 1 】



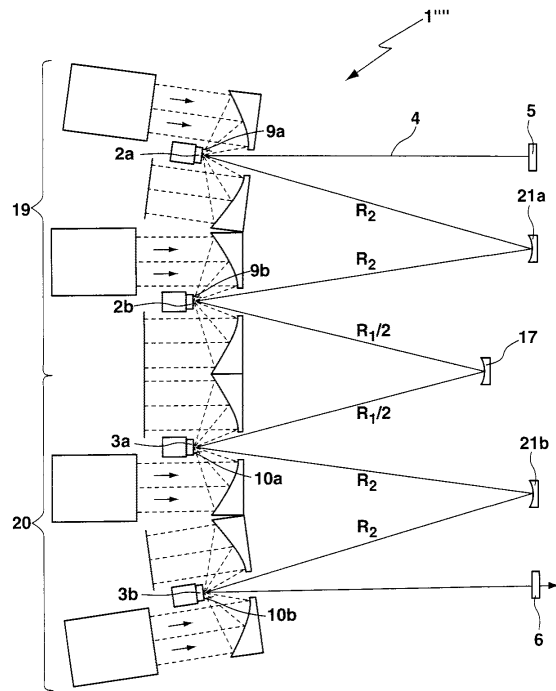
【 図 3 】



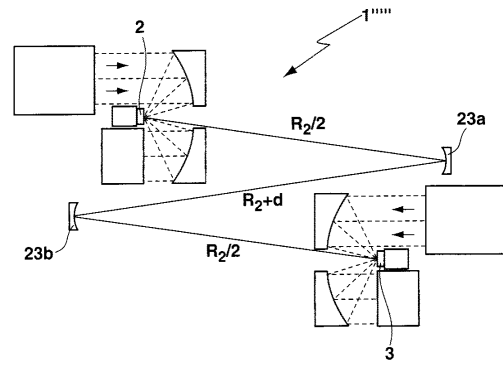
【 図 2 】



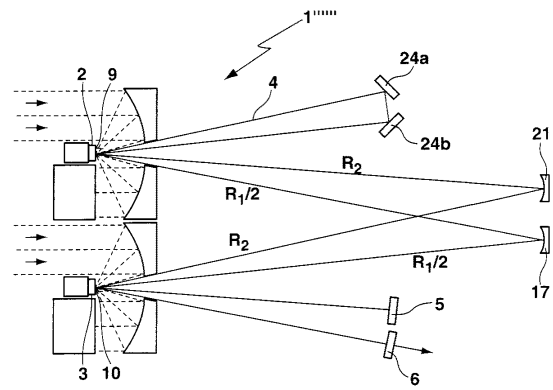
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

(74)代理人 100099483

弁理士 久野 琢也

(74)代理人 100114890

弁理士 アインゼル・フェリックス＝ラインハルト

(72)発明者 クリスティアン シュミッツ

ドイツ連邦共和国 ドゥニンゲン ロットヴァイラー シュトラーセ 63

(72)発明者 アンドレアス フォス

ドイツ連邦共和国 シュトゥットガルト ホプフアウアー シュトラーセ 15

審査官 金高 敏康

(56)参考文献 米国特許第05926494(US, A)

特表2003-502850(JP, A)

国際公開第00/025394(WO, A1)

特開2002-524838(JP, A)

特開2000-174369(JP, A)

特開2001-007421(JP, A)

特開平03-088379(JP, A)

特開2001-007427(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/03 - 3/30