

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7254260号
(P7254260)

(45)発行日 令和5年4月7日(2023.4.7)

(24)登録日 令和5年3月30日(2023.3.30)

(51)国際特許分類 F I
H 0 1 S 3/30 (2006.01) H 0 1 S 3/30 Z

請求項の数 10 (全17頁)

(21)出願番号	特願2022-574324(P2022-574324)	(73)特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86)(22)出願日	令和4年9月12日(2022.9.12)	(74)代理人	100118762 弁理士 高村 順
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/034084	(72)発明者	藤井 俊輔 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
審査請求日	令和4年12月1日(2022.12.1)	(72)発明者	平山 望 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
早期審査対象出願		審査官	村井 友和

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 固体レーザー装置および固体レーザー加工装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1波長のパルス光を出力する種光源と、
前記パルス光を増幅した前記第1波長のパルス増幅光を出力する固体活性媒質を有する固体増幅器と、
前記固体増幅器の後段に配置され前記パルス増幅光を誘導ラマン散乱によって1%以上の波長変換効率で第2波長へと波長変換し、前記第1波長の第1パルス光と前記第2波長の第2パルス光とを出力する誘導ラマン散乱発生素子と、
波長の違いを利用して、前記誘導ラマン散乱発生素子から出力された前記第1パルス光の光路から前記第2パルス光を分離する波長フィルタと、
を備えることを特徴とする固体レーザー装置。

【請求項2】

前記誘導ラマン散乱発生素子は、前記パルス増幅光が前記誘導ラマン散乱発生素子の入射面に対してプリースター角で入射し、かつ前記第1パルス光が前記誘導ラマン散乱発生素子の出射面に対してプリースター角で出射するように配置されることを特徴とする請求項1に記載の固体レーザー装置。

【請求項3】

前記誘導ラマン散乱発生素子の温度を制御する温度制御機構をさらに備えることを特徴とする請求項1に記載の固体レーザー装置。

【請求項4】

前記誘導ラマン散乱発生素子は、

前記固体活性媒質の母材と同一の母材に対して前記固体活性媒質にドープされたレーザ活性イオンと同一のレーザ活性イオンを前記固体活性媒質の前記レーザ活性イオンの濃度以下の濃度でドープした低ドープ材料、または前記レーザ活性イオンを含有しない前記母材であるノドープ材料であり、

前記固体活性媒質の後段に前記固体活性媒質と離間して、あるいは前記固体活性媒質の前記パルス増幅光が出射される面に接合して配置されることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 つに記載の固体レーザ装置。

【請求項 5】

前記第 1 パルス光を反射し、前記第 2 パルス光を透過する折り返しミラーをさらに備え、

10

前記折り返しミラーは、前記折り返しミラーで反射された前記第 1 パルス光を前記誘導ラマン散乱発生素子に入射させるように、前記誘導ラマン散乱発生素子と前記波長フィルタとの間の光の進行する光路上に配置されることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 つに記載の固体レーザ装置。

【請求項 6】

前記誘導ラマン散乱発生素子を移動させる移動機構をさらに備え、

前記移動機構は、前記折り返しミラーで反射された前記第 1 パルス光が前記誘導ラマン散乱発生素子に入射するビーム径、前記第 1 パルス光が前記誘導ラマン散乱発生素子を通過する回数、および前記第 1 パルス光が前記誘導ラマン散乱発生素子を通過する通過距離のうち少なくとも 1 つを変化させることを特徴とする請求項 5 に記載の固体レーザ装置。

20

【請求項 7】

前記誘導ラマン散乱発生素子の後段に配置され、互いに平行な入射面および出射面を有する平行平面基板と、

前記平行平面基板を回転させて、前記入射面と前記第 1 パルス光の光軸との間の角度を変化させる回転機構と、

をさらに備えることを特徴とする請求項 5 に記載の固体レーザ装置。

【請求項 8】

前記誘導ラマン散乱発生素子の後段に配置され、前記第 1 パルス光および前記第 2 パルス光のうち、発散角が定められた値よりも大きい成分を除去し、前記発散角が前記定められた値よりも小さい成分を透過させるアパーチャをさらに備えることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 つに記載の固体レーザ装置。

30

【請求項 9】

前記誘導ラマン散乱発生素子の材質および光軸方向における長さ、並びに前記誘導ラマン散乱発生素子に入射する前記パルス増幅光のビーム径が定められた状態において、前記誘導ラマン散乱発生素子から出射される前記第 1 パルス光のピーク出力が最大となるように、前記パルス増幅光のピーク出力が定められることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 つに記載の固体レーザ装置。

【請求項 10】

第 1 波長のパルス光を出力する種光源と、

前記パルス光を増幅した前記第 1 波長のパルス増幅光を出力する固体活性媒質を有する固体増幅器と、

40

前記固体増幅器の後段に配置され前記パルス増幅光を誘導ラマン散乱によって 1 % 以上の波長変換効率で第 2 波長へと波長変換し、前記第 1 波長の第 1 パルス光と前記第 2 波長の第 2 パルス光とを出力する誘導ラマン散乱発生素子と、

波長の違いを利用して、前記誘導ラマン散乱発生素子から出力された前記第 1 パルス光の光路から前記第 2 パルス光を分離する波長フィルタと、

前記波長フィルタから出力されたパルス光を偏向する偏向器と、

前記偏向器で偏向されたパルス光を加工対象物の任意の位置に集光して照射する集光レンズと、

を備えることを特徴とする固体レーザ加工装置。

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、レーザ加工で用いられるレーザ光を出射する固体レーザ装置および固体レーザ加工装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、微細加工用のレーザ光源として、短パルス光を出力する固体レーザ装置が広く利用されている。このような固体レーザ装置では、種光源から出力される微弱な短パルス光を固体活性媒質を含む固体増幅器によって増幅して出力するMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式が採られることが多い。MOPA方式の利点として、繰り返し周波数を制御しやすい点、固体増幅器の段数を増やすことで高出力を得やすい点などが挙げられる。

10

【0003】

MOPA方式の固体レーザ装置で加工を行う際に、パルス光の出力を一時的に停止させたい場合、あるいは加工中にパルス光の繰り返し周波数を変化させたい場合がある。このような場合に、固体増幅器の固体活性媒質が励起用光源によって励起された状態で、固体活性媒質に入力されるパルス光のパルス間隔が時間的に大きくなると、励起用光源によって固体活性媒質に蓄積されるエネルギーが過剰になる。この結果、次に固体活性媒質に入力されるパルス光は過剰に増幅されて極めて大きなピーク出力のパルス光が出力される。以下では、このようにして出力されるパルス光は、「ジャイアントパルス」とも称される。このジャイアントパルスによって後段に配置した光学素子の損傷および加工品質の低下が引き起こされてしまう。

20

【0004】

特許文献1には、装置から一時的にパルス光の出力を停止させる場合に、固体増幅器の過剰励起に起因する破損を回避するとともに、出力再開直後のビーム伝播特性の劣化を回避することができるレーザ光源装置が開示されている。特許文献1に記載のレーザ光源装置は、ゲインスイッチング法を用いて種光源から出力されるパルス光を増幅するファイバ増幅器および固体増幅器と、固体増幅器から出力されるパルス光を波長変換する非線形光学素子と、ファイバ増幅器から固体増幅器へのパルス光の伝播を許容または阻止する光スイッチ素子と、種光源および光スイッチ素子を制御する制御部と、を備える。

30

【0005】

特許文献1に記載のレーザ光源装置では、種光源からのパルス光の出力期間にファイバ増幅器から固体増幅器へのパルス光の伝播が阻止されるように、制御部によって光スイッチ素子が制御される。これによって、種光源を停止させなくても非線形光学素子からパルス光の出力を停止させる出力停止状態が実現される。また、出力停止状態で、種光源からのパルス光の出力期間と異なる期間に光の伝播が許容されるように、制御部によって光スイッチ素子が制御されるので、前段のファイバ増幅器で生じた自然放出光ノイズが後段の固体増幅器に伝播して、励起用の光源によって励起状態にある固体増幅器の活性領域のエネルギーが放出されるようになる。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】国際公開第2015/122375号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、特許文献1に記載の技術では、種光源と固体増幅器との間に配置されたファイバ増幅器から出力される自然放出光を利用して励起状態にある固体増幅器の活性領域のエネルギーを放出するようにしている。このため、特許文献1に記載の技術を、種光源

50

と固体増幅器との間にファイバ増幅器を用いない一般的な固体レーザ装置に適用することができない。つまり、ファイバ増幅器を有さない一般的な固体レーザ装置において、ジャイアントパルスの発生を予防することは困難であった。また、特許文献1には、ジャイアントパルスの発生を予防する技術が開示されているが、ジャイアントパルスが発生した場合に、ファイバ増幅器および固体増幅器の後段に配置された光学素子の損傷または加工品質の低下を抑制することは困難であった。このように、特許文献1に記載の技術によれば、固体レーザ装置において意図しないジャイアントパルスが発生することによる光学素子などの損傷を回避できないという問題があった。

【0008】

本開示は、上記に鑑みてなされたものであって、ジャイアントパルスが発生することによる固体活性媒質の後段に配置される光学素子の損傷を抑制することができる固体レーザ装置を得ることを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0009】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本開示に係る固体レーザ装置は、種光源と、固体増幅器と、誘導ラマン散乱発生素子と、波長フィルタと、を備える。種光源は、第1波長のパルス光を出力する。固体増幅器は、パルス光を増幅した第1波長のパルス増幅光を出力する固体活性媒質を有する。誘導ラマン散乱発生素子は、固体増幅器の後段に配置されパルス増幅光を誘導ラマン散乱によって1%以上の波長変換効率で第2波長へと波長変換し、第1波長の第1パルス光と第2波長の第2パルス光とを出力する。波長フィルタは、波長の違いを利用して、誘導ラマン散乱発生素子から出力された第1パルス光の光路から第2パルス光を分離する。

20

【発明の効果】

【0010】

本開示に係る固体レーザ装置は、ジャイアントパルスが発生することによる固体活性媒質の後段に配置される光学素子の損傷を抑制することができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施の形態1による固体レーザ装置を備える固体レーザ加工装置の構成の一例を模式的に示す図

30

【図2】SRS発生素子の構成の他の例を模式的に示す図

【図3】SRS発生素子にNd:YVO₄を用い、SRS発生素子に1064nmのパルス光を入射した場合のSRSへの波長変換特性の一例を示す図

【図4】実施の形態2による固体レーザ装置の固体活性媒質およびSRS発生素子の構成例を示す図

【図5】実施の形態2による固体レーザ装置の固体活性媒質およびSRS発生素子の構成例を示す図

【図6】実施の形態2による固体レーザ装置の固体活性媒質およびSRS発生素子の構成例を示す図

【図7】実施の形態3による固体レーザ装置の構成の一例を模式的に示す図

40

【図8】実施の形態3による固体レーザ装置の構成の他の例を模式的に示す図

【図9】実施の形態4による固体レーザ装置の構成の一例を模式的に示す図

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下に、本開示の実施の形態に係る固体レーザ装置および固体レーザ加工装置を図面に基づいて詳細に説明する。

【0013】

実施の形態1

図1は、実施の形態1による固体レーザ装置を備える固体レーザ加工装置の構成の一例を模式的に示す図である。固体レーザ加工装置100は、固体レーザ装置1と、偏向器8

50

0と、集光レンズ90と、を備える。固体レーザ装置1は、誘導放出を起こす媒体が後述する固体活性媒質21を用いて、固体レーザ加工装置100におけるレーザ光を出射する装置である。固体レーザ加工装置100は、固体活性媒質21を用いた固体レーザ装置1から出射されるレーザ光を用いて加工対象物51の加工を行う装置である。つまり、固体レーザ加工装置100では、固体レーザ装置1から出射されたレーザ光は、偏向器80および集光レンズ90を介して加工対象物51に照射され、加工対象物51の加工に使用される。

【0014】

実施の形態1による固体レーザ装置1は、種光源10と、制御部11と、固体増幅器20と、励起用光源22と、ダイクロイックミラー23と、誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering: SRS)発生素子30と、温度制御機構31と、波長フィルタ40と、ダンパ41と、光学系50と、を備える。

10

【0015】

種光源10は、第1波長のパルス光LSを発生し、出力する。第1波長のパルス光LSは、固体活性媒質21で増幅されるレーザ光である。種光源10は、一例では半導体レーザ、ファイバレーザなどにより構成される。あるいは、種光源10は、種光源10と図示しない増幅器とで構成されるMOPA光源であってもよい。

【0016】

制御部11は、種光源10から出力されるパルス光LSの波長、パルス幅、繰り返し周波数、出力などの諸条件を制御する。

20

【0017】

固体増幅器20は、種光源10から出力されるパルス光LSを増幅し、増幅された第1波長のパルス光であるパルス増幅光L0を出力する固体活性媒質21を有する。種光源10から出力されるパルス光LSの波長である第1波長に応じて固体活性媒質21の種類が選択される。一例では、第1波長が1064nmである場合には、固体活性媒質21にはNd:YVO₄、Nd:YAG(Yttrium Aluminum Garnet)が好適に用いられる。なお、本開示では、YAG、YVO₄などの固体の母材に、Nd、Yb、Tmなどのレーザ活性イオンをドープし、定められた波長で励起することによってレーザ光を増幅する性質、すなわち利得を持つものを固体活性媒質21と称する。固体増幅器20は、増幅された第1波長のパルス増幅光L0を、SRS発生素子30へと出力する。

30

【0018】

励起用光源22は、固体活性媒質21を励起するレーザ光LEを出力する光源である。励起用光源22は、一例では半導体レーザで構成される。固体活性媒質21がNd:YVO₄である場合には、励起用光源22から出力されるレーザ光LEの波長は、波長808nmまたは波長878.6nm、888nmの連続光が好適である。以下では、励起用光源22から出力される波長808nmまたは波長878.6nm、888nmの連続光は、単に励起光LEとも称される。

【0019】

ダイクロイックミラー23は、固体活性媒質21に対して、種光源10からのパルス光LSと励起用光源22からの励起光LEとを同軸上に入射させるために設けられている。ここでは、ダイクロイックミラー23は、種光源10からのパルス光LSを反射し、励起用光源22からの励起光LEを透過させるように構成されている。

40

【0020】

SRS発生素子30は、固体増幅器20の後段に配置され、固体活性媒質21で増幅された第1波長のパルス増幅光L0の一部をSRSにより第2波長の第2パルス光L2に変換し、第1波長の第1パルス光L1と第2波長の第2パルス光L2とを出力する。第2波長は、第1波長よりも長い。実施の形態1では、SRS発生素子30は、パルス増幅光L0をSRSによって1%以上の波長変換効率で第2波長へと波長変換する。SRS発生素子30には、一例では、YVO₄、GdVO₄、Ba(NO₃)₂、ダイヤモンドなどの材料が用いられる。また、SRS発生素子30は、上記材料を母材としてレーザ活性イオンが

50

添加されているものであってもよい。第1波長が1064nmであり、SR S発生素子30が YVO_4 にレーザ活性イオンとしてNdを添加したNd:YVO₄である場合には、SR S発生素子30によって変換される第2パルス光L2の第2波長は1176nmである。
【0021】

SR S発生素子30は、パルス増幅光L0が入射する面である入射面に設けられる第1波長の光に対する反射を抑える無反射コーティング膜と、第1パルス光L1および第2パルス光L2が出射する面である出射面に設けられる第1波長および第2波長の光に対する反射を抑える無反射コーティング膜と、を有していてもよい。入射面に設けられる無反射コーティング膜によって、パルス増幅光L0が種光源10、励起用光源22および固体活性媒質21に戻ってしまうことを抑制することができる。また、出射面に設けられる無反射コーティング膜によって、第1パルス光L1および第2パルス光L2が種光源10、励起用光源22および固体活性媒質21に戻ってしまうことを抑制することができる。

10

【0022】

図2は、SR S発生素子の構成の他の例を模式的に示す図である。図2に示されるように、SR S発生素子30は、パルス増幅光L0の入射面301並びに第1パルス光L1および第2パルス光L2の出射面302に無反射コーティング膜を設けないノンコートとしてもよい。また、SR S発生素子30は、SR S発生素子30の入射面301に対してパルス増幅光L0がブリュースター角 B_i で入射し、かつ第1パルス光L1および第2パルス光L2がSR S発生素子30の出射面302に対してブリュースター角 B_o で出射するように配置されるようにしてもよい。

20

【0023】

一般に透過型の光学素子の入射面には無反射コーティング膜が設けられる。無反射コーティング膜は光学素子のバルクまたは界面よりも損傷閾値が低いことが多い。一方、図2に示されるように、ブリュースター角 B_i 、 B_o で光学素子にパルス光を入射させると、無反射コーティング膜が無くても入射面での反射率を低減することができる。このため、無反射コーティング膜の損傷が回避でき、光学素子の損傷が起こりにくくなる。また、ブリュースター角 B_i 、 B_o で光学素子にパルス光を入射させる場合には、SR S発生素子30の入射面301および出射面302に無反射コーティング膜を設けなくてもよいことから、無反射コーティング膜の損傷を回避できる利点がある。

【0024】

図1に戻り、温度制御機構31は、SR S発生素子30の温度を制御する。一例では、温度制御機構31は、SR S発生素子30を定められた温度に加熱する加熱部と、加熱部による加熱を制御する加熱制御部と、を有する。温度制御機構31は、後述するように、SR S発生素子30での波長変換効率が1%以上となるようにSR S発生素子30の温度を制御する。

30

【0025】

波長フィルタ40は、波長の違いを利用してSR S発生素子30から出力された第1パルス光L1および第2パルス光L2から第2パルス光L2を分離する。つまり、波長フィルタ40は、SR S発生素子30から出力された第1パルス光L1の光路から第2パルス光L2を分離する。図1の例では、波長フィルタ40は、SR S発生素子30から出射された第1パルス光L1および第2パルス光L2のうち、一方を透過させ、他方を反射させる。これによって、2つの波長の光である第1パルス光L1および第2パルス光L2が空間的に分離される。図1の例では、波長フィルタ40は、第1パルス光L1を透過させ、第2パルス光L2を反射する。

40

【0026】

ダンパ41は、波長フィルタ40で反射される第2パルス光L2の光路上に配置される。ダンパ41は、第2パルス光L2を減衰させる。なお、ダンパ41は、パワーメータなどの計測機器であってもよい。

【0027】

光学系50は、第1パルス光L1が波長フィルタ40を透過する光路上に配置される。

50

波長フィルタ 40 で分離された第 1 パルス光 L1 は、光学系 50 を通過する。光学系 50 は、第 1 パルス光 L1 を伝送するためのレンズまたはミラーで構成されるが、本開示の固体レーザ装置 1 の用途に応じて適宜構成することができる。一例では、第 1 パルス光 L1 の出力をさらに増幅させたい場合には、光学系 50 に固体増幅器を設けてもよい。あるいは、第 1 パルス光 L1 を高調波発生により第 2 高調波、第 3 高調波または第 4 高調波に波長変換したい場合には、光学系 50 に高調波発生用の非線形光学素子を設けてもよい。光学系 50 で適宜処理を施されたパルス光である第 3 パルス光 L3 は、固体レーザ装置 1 から出力される。

【0028】

偏向器 80 は、固体レーザ装置 1 から出力される第 3 パルス光 L3 を偏向する。具体的には、偏向器 80 は、第 3 パルス光 L3 の加工対象物 51 における照射位置を任意に変位させる。偏向器 80 は、加工対象物 51 上で互いに直交する 2 方向における第 3 パルス光 L3 の照射位置を変位させることができるように、2 つ設けられることが望ましい。偏向器 80 の一例は、ガルバノスキャナである。なお、固体レーザ装置 1 が光学系 50 を有さない場合には、偏向器 80 は、波長フィルタ 40 から出力されたパルス光を偏向する。

10

【0029】

集光レンズ 90 は、偏向器 80 で偏向されたパルス光、図 1 の場合には第 3 パルス光 L3 を、加工対象物 51 の任意の位置に集光して照射する。これによって、第 3 パルス光 L3 が加工対象物 51 に照射され、レーザ加工が行われる。

【0030】

なお、図 1 では、波長フィルタ 40 が、第 1 パルス光 L1 を透過させ、第 2 パルス光 L2 を反射させる場合を示しているが、逆に第 1 パルス光 L1 を反射させ、第 2 パルス光 L2 を透過させるようにしてもよい。この場合には、ダンパ 41 は波長フィルタ 40 の透過側に配置され、光学系 50 は波長フィルタ 40 の反射側に配置されることが好ましい。

20

【0031】

実施の形態 1 では、パルス光の波長変換に SRS を利用している。この SRS を利用したパルス光の波長変換には、一般的な波長変換の手法である高調波発生と比べて利点が存在する。高調波発生では、非線形光学素子に入射するパルス光の波長を 1/2 倍あるいはそれ以下に波長変換する。一般に光学素子のバルクまたはコーティング膜の損傷閾値は、入射するパルス光の波長が短いほど低くなる。従って、ジャイアントパルスを高調波発生で波長変換した場合には、短波長化されたジャイアントパルスによって非線形光学素子、波長フィルタ 40 などの光学素子が損傷しやすくなるという問題がある。一方、SRS では、第 1 波長のパルス光の一部が第 2 波長のパルス光に波長変換されるが、第 2 波長は第 1 波長と比べて長い。従って、第 2 波長に波長変換されたジャイアントパルスは、第 1 波長と比べて SRS 発生素子 30、波長フィルタ 40 などの光学素子を損傷させにくくなる。

30

【0032】

また、高調波発生に用いられる LBO (Lithium Triborate: LiB_3O_5)、CLBO (Cesium Lithium Borate: $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) などの非線形光学素子は吸湿性を持つため、湿度管理を行う必要がある。一方、SRS 発生素子 30 には固体レーザ媒質に用いられる Nd:YVO₄ などを使用することができるため、LBO、CLBO などのように特別な環境および処理は必要なく、従来の固体レーザ装置の内部に容易に導入することができる。

40

【0033】

実施の形態 1 では、SRS 発生素子 30 における波長変換効率を 1% 以上に設定することが好ましい。SRS 発生素子 30 から出力される SRS 光の強度 I_{SRS} は次式 (1) で与えられる。

【0034】

$$I_{\text{SRS}} = I_{\text{Raman0}} \cdot e^{\text{g Raman} \cdot I_{\text{Pump}} \cdot L} \cdot \dots \quad (1)$$

【0035】

ここで、 I_{Raman0} は、SRS 発生素子 30 の入射面 301 における第 2 波長のパルス光

50

の強度であり、 g_{Raman} は、SRS発生素子30のラマン利得係数であり、 I_{Pump} は、SRS発生素子30に入射する第1波長のパルス増幅光L0のピーク強度であり、Lは、SRS発生素子30の長さである。SRS発生素子30の長さLは、SRS発生素子30でのパルス光の進行方向における長さである。また、SRSによる波長変換効率 は次式(2)で表せる。

【0036】

$$= I_{\text{SRS}} / I_{\text{Pump}} \cdots (2)$$

【0037】

SRSの波長変換効率 は、(1)式および(2)式から、第1パルス光L1のピーク強度に対して非線形に増加するため、入射パルス光のピーク強度が定められた定格ピーク強度よりも増加した場合に、波長変換効率 が増加する。すなわち、SRS発生素子30は、定格ピーク強度以上の第1パルス光L1に対して、減衰器として機能する。SRS発生素子30から出射した第2パルス光L2を波長フィルタ40によって第1パルス光L1の光路から除外することで、ジャイアントパルスが発生した場合に、ジャイアントパルスによって光学系50の損傷および加工対象物51の加工品質の低下を回避することができる。つまり、ジャイアントパルスが発生しても、波長変換効率 が増加するため、SRS発生素子30で、ダンパ41に吸収される第2パルス光L2が多く生成される。これによって、SRS発生素子30から出力される第1パルス光L1のピーク強度が必要以上に大きくなることが抑制される。

【0038】

波長変換効率 を1%以上とするためには、(1)式の指数関数の中、すなわち $g_{\text{Raman}} \times I_{\text{Pump}} \times L$ の値が「15」以上「30」以下になるように g_{Raman} 、 I_{Pump} およびLを設定することが好ましい。一例では、SRS発生素子30にNd:YVO₄を用いる場合には、Nd:YVO₄のラマンモードのうち最もラマン利得係数の大きい893 cm⁻¹におけるラマン利得係数は4.5 cm/GWであるため、 $I_{\text{Pump}} \times L$ の値が「3 GW/cm」以上「7 GW/cm」以下となる I_{Pump} およびLに設定することが好ましい。

【0039】

一方、 g_{Raman} は、温度が高いほど小さくなり、かつ温度が低いほど大きくなる性質を有する。つまり、SRS発生素子30の温度を温度制御機構31によって調整することで、 I_{Pump} またはLを変化させる場合と同じ効果が得られる。このため、上記したように実施の形態1の固体レーザー装置1では、SRS発生素子30の温度を制御する温度制御機構31を備えることが好ましい。SRS発生素子30の温度を温度制御機構31で調整することによって、任意の $I_{\text{Pump}} \times L$ に対して1%以上の波長変換効率を得ることができる。このように、SRSの強度がSRS発生素子30の温度に依存することを利用して、SRS発生素子30の温度を制御することで、SRSの波長変換効率を制御し、ジャイアントパルスによる固体活性媒質21の後段に配置されるSRS発生素子30および波長フィルタ40の損傷を回避するという効果を得られるようにすることもできる。

【0040】

以上のように、 g_{Raman} を一定に保つことができる場合には、波長変換効率 が1%以上となる I_{Pump} およびLを設定すればよく、固体レーザー装置1は、温度制御機構31を有さなくてもよい。一方、任意の I_{Pump} およびLが設定される場合には、波長変換効率 が1%以上となるように g_{Raman} を変化させるために、固体レーザー装置1は、温度制御機構31を備えることが望ましい。

【0041】

図3は、SRS発生素子にNd:YVO₄を用い、SRS発生素子に1064 nmのパルス光を入射した場合のSRSへの波長変換特性の一例を示す図である。横軸は1064 nmのパルス光の入射平均出力である1064 nm入射平均出力を示し、左の縦軸は1064 nmのパルス光の出射平均出力である1064 nm出射平均出力を示し、右の縦軸はSRS波長である1176 nmのパルス光の出射平均出力である1176 nm出射平均出力を示している。本実験では入射パルス光のビーム径、パルス幅および繰り返し周波数を一

10

20

30

40

50

定としているため、1064nmのピーク出力およびピーク強度は平均出力に比例する。1064nm入射平均出力がある値以上でSR Sが発生し、1064nm出射平均出力の低下および1176nm出射平均出力の増加が確認できる。

【0042】

実施の形態1の構成において、SR S発生素子30の材質および光軸方向における長さ、並びにSR S発生素子30に入射するパルス増幅光L0のビーム径を一定とした場合に、パルス増幅光L0のピーク出力は、SR S発生素子30から出射される第1パルス光L1のピーク出力が最大となるように設定することが好ましい。図3によれば、1064nm出射平均出力が最大となる1064nm入射平均出力において、1064nm入射平均出力が±10%変化した場合に、1064nm出射平均出力の変化は±1%以下になっている。具体的には、横軸の1064nm入射平均出力が40W以上50W以下の範囲において、左側の縦軸の1064nm出射平均出力は、約36Wで一定の値となっている。つまり、1064nm入射平均出力の変動に対する1064nm出射平均出力の変動が低減されており、出射平均出力の安定性を高める効果を奏している。上述のように図3の実験における平均出力の変化はピーク出力の変化を意味するため、1064nm出射ピーク出力が最大となるように1064nm入射ピーク出力を設定することで、同様の効果を得ることができる。ただし、1064nmの出射ピーク出力、すなわち透過パワーを最大とするには、SR Sの発生に關与する出力以外の条件、すなわちSR S発生素子30の材質および光軸方向における長さ、並びにSR S発生素子30に入射するパルス増幅光L0のビーム径が定められた状態とする必要がある。

【0043】

実施の形態1では、SR S発生素子30および波長フィルタ40を通過するパルス光のビーム径は大きいことが好ましい。実施の形態1の構成でジャイアントパルスが発生した場合、第1波長のジャイアントパルスによってSR S発生素子30が損傷する可能性がある。また、第2波長へと波長変換されたジャイアントパルスによってSR S発生素子30および波長フィルタ40が損傷する可能性がある。一般に、パルス光による光学素子の損傷閾値は、パルス光のピーク強度に依存する。すなわち、光学素子に入射するパルス光のビーム径が大きいほど、損傷しにくくなる。一方、SR Sの閾値はパルス光のピーク強度および媒質長に依存する。つまり、SR S発生素子30を通過するパルス光のビーム径を拡大することでパルス光のピーク強度が低下した場合には、SR S発生素子30の媒質長を長くすることによって所望のSR S光を発生させることが可能である。この結果、ジャイアントパルスが発生した場合に、ジャイアントパルスによる固体活性媒質21の後段に配置されるSR S発生素子30および波長フィルタ40の損傷を回避するという効果を安定的に得ることが可能となる。

【0044】

SR S発生素子30を通過するビーム径を大きくする手段として、固体活性媒質21から出射するパルス増幅光L0の発散角を大きくすることが好適である。あるいは、固体活性媒質21からパルス増幅光L0を収束した状態で出射させ、集光点の後方で再びパルス増幅光L0が発散した状態に変化した後にSR S発生素子30にパルス増幅光L0が入射するようにSR S発生素子30を配置してもよい。

【0045】

実施の形態1によれば、パルス増幅光L0のピーク出力が定められた定格のピーク出力よりも大きい場合に、パルス増幅光L0はSR S発生素子30によって波長変換され、波長フィルタ40によって光路から分離される。この結果、ジャイアントパルスが発生することによる固体活性媒質21の後段に配置される光学素子の損傷、および加工対象物51の加工品質の低下が抑制されるという効果を有する。

【0046】

実施の形態2 .

実施の形態2では、SR S発生素子30は、固体活性媒質21と同一材料としてもよいし、SR S発生素子30は、固体活性媒質21と同一母材のノンドープ材料または低ドー

10

20

30

40

50

ブ材料としてもよい。すなわち、SR S発生素子30は、固体活性媒質21の母材と同一の母材に対して、固体活性媒質21にドーブされたレーザ活性イオンと同一のレーザ活性イオンを固体活性媒質21のレーザ活性イオンの濃度以下の濃度でドーブした低ドーブ材料であってもよい。あるいはSR S発生素子30は、レーザ活性イオンを含有しない固体活性媒質21の母材と同一の母材であるノンドーブ材料であってもよい。ノンドーブ材料または低ドーブ材料は、固体活性媒質21の後段に配置することが好ましい。さらに、ノンドーブ材料または低ドーブ材料は、固体活性媒質21の後段に固体活性媒質21と離間して配置されていてもよいし、あるいは固体活性媒質21のパルス増幅光L0が出射される面に接合されていてもよい。

【0047】

図4から図6は、実施の形態2による固体レーザ装置の固体活性媒質およびSR S発生素子の構成例を示す図である。一例では、母材である YVO_4 に0.2at.%のレーザ活性イオンであるNdをドーブしたNd:YVO₄を固体活性媒質21に用いる場合のSR S発生素子30には、図4から図6に示される材料を用いることができる。図4には、SR S発生素子30が、固体活性媒質21と同一の材料であるドーブ濃度0.2at.%のNd:YVO₄である場合が示されている。図5には、SR S発生素子30が、固体活性媒質21の母材と同一の母材であって、レーザ活性イオンがドーブされていないドーブ材料であるノンドーブのYVO₄である場合が示されている。図6には、SR S発生素子30が、固体活性媒質21の母材と同一の母材であるYVO₄に対して、固体活性媒質21にドーブされたレーザ活性イオンと同一のNdを固体活性媒質21のレーザ活性イオンの濃度以下の濃度でドーブした低ドーブ材料である場合が示されている。図6では、ドーブ濃度が0.1at.%のNd:YVO₄がSR S発生素子30として用いられている。

【0048】

このように、SR S発生素子30に固体活性媒質21と同一材料、固体活性媒質21と同一母材のノンドーブ材料、あるいは固体活性媒質21よりもレーザ活性イオンの濃度が低い低ドーブ材料を用いることで、固体レーザ装置1の部品点数または部品種類を削減することができる。また、SR S発生素子30を固体活性媒質21のパルス増幅光L0が出射される面に接合することで、固体活性媒質21およびSR S発生素子30を含む固体レーザ装置1を小型化することが可能となる。

【0049】

実施の形態3.

図7は、実施の形態3による固体レーザ装置の構成の一例を模式的に示す図である。なお、実施の形態3では、固体活性媒質21と波長フィルタ40との間の光路の構成が実施の形態1とは異なるので、図7には、固体活性媒質21と波長フィルタ40との間の光路の構成を示している。

【0050】

実施の形態3では、図7に示されるように、固体レーザ装置1は、固体活性媒質21と波長フィルタ40との間でSR S発生素子30の後段に、折り返しミラー60a, 60bと、ダンパ61と、移動機構62と、平行平面基板63と、回転機構64と、をさらに備える。

【0051】

光の進行する光路上の配置では、折り返しミラー60a, 60bがSR S発生素子30と波長フィルタ40との間に配置される。言い換えれば、SR S発生素子30、折り返しミラー60a, 60b、波長フィルタ40の順に光が通過する。また、光路上の配置において、折り返しミラー60a, 60bは、SR S発生素子30の入射面301と波長フィルタ40との間に少なくとも1つ設けられればよく、図7の例では、2つの折り返しミラー60a, 60bが設けられる場合が示されている。以下では、折り返しミラー60a, 60bは、それぞれを区別しない場合には、折り返しミラー60と称される。折り返しミラー60は、SR S発生素子30から出射した第1波長の第1パルス光L1を反射し、第2波長の第2パルス光L2を透過する。折り返しミラー60は、第1波長の第1パルス光

10

20

30

40

50

L 1 が S R S 発生素子 3 0 を少なくとも 2 回以上透過するように配置される。ただし、図 7 の例では、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を 2 回透過するように、後述する移動機構 6 2 によって S R S 発生素子 3 0 の位置が調整されている。

【 0 0 5 2 】

図 8 は、実施の形態 3 による固体レーザ装置の構成の他の例を模式的に示す図である。図 8 では、折り返しミラー 6 0 による反射光である第 1 パルス光 L 1 がすべて S R S 発生素子 3 0 を透過するように S R S 発生素子 3 0 の位置が調整されている状態が示されている。図 8 の状態から S R S 発生素子 3 0 を紙面内における上方に移動させると図 7 に示されるように、折り返しミラー 6 0 b で反射された第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を透過しない状態となる。図 8 に示されるように、すべての折り返しミラー 6 0 によって反射される第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を透過する位置は、基準位置と称される。なお、第 2 パルス光 L 2 に対する折り返しミラー 6 0 の透過率を適切に設定することで、部分反射された第 2 パルス光 L 2 を S R S 発生素子 3 0 に入射させ、S R S 発生素子 3 0 における波長変換効率が 1 % 以上となるように構成することも可能である。

10

【 0 0 5 3 】

ダンパ 6 1 は、折り返しミラー 6 0 で透過する第 2 パルス光 L 2 を減衰させる。このため、図 7 の例では、ダンパ 6 1 は、折り返しミラー 6 0 の透過側に配置される。なお、ダンパ 6 1 は、パワーメータなどの計測機器であってもよい。

【 0 0 5 4 】

移動機構 6 2 は、S R S 発生素子 3 0 を移動させる。図 8 に示されるように、移動機構 6 2 によって S R S 発生素子 3 0 が基準位置にある場合には、S R S 発生素子 3 0 は、固体活性媒質 2 1 から出射される第 1 パルス光 L 1、および折り返しミラー 6 0 a、6 0 b によって反射される第 1 パルス光 L 1 のすべてを透過することができる大きさを有する。つまり、基準位置において、S R S 発生素子 3 0 は、折り返しミラー 6 0 の数 + 1 回だけ第 1 パルス光 L 1 が透過するように構成される。移動機構 6 2 は、S R S 発生素子 3 0 を透過する第 1 パルス光 L 1 の数を 1 回から折り返しミラー 6 0 の数 + 1 回までの範囲で変更することができるように、S R S 発生素子 3 0 を移動させる。

20

【 0 0 5 5 】

(1) 式によれば、S R S 強度は S R S 発生素子 3 0 の長さ L と S R S 発生素子 3 0 に入射する第 1 波長のパルス光のピーク強度に依存する。実施の形態 3 では、第 1 波長のパルス光、すなわちパルス増幅光 L 0 および第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を複数回往復することで、実効的な素子長を長くすることができる。また、折り返しミラー 6 0 で第 2 波長の S R S 成分である第 2 パルス光 L 2 を透過させて第 1 波長の光路から除外しているため、(1) 式における I_{Raman} は折り返しミラー 6 0 を通過する度に実質的に 0 になる。この結果、媒質長の長い S R S 発生素子 3 0 を 1 回通過する場合と比べて、実施の形態 3 ではジャイアントパルスに対する減衰率を高める効果を奏する。このように、移動機構 6 2 で S R S 発生素子 3 0 を移動させることで、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する回数とともに、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する通過距離を変化させることもできる。

30

【 0 0 5 6 】

このほかに、S R S 発生素子 3 0 を、固体増幅器 2 0 から出射されるパルス増幅光 L 0 の進行方向に移動させることで、折り返しミラー 6 0 で反射された第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径を変化させることもできる。一例では、実施の形態 1 で説明したように、S R S 発生素子 3 0 に入射する第 1 パルス光 L 1 のビーム径が大きくなるように、移動機構 6 2 は S R S 発生素子 3 0 を移動させることができる。なお、固体活性媒質 2 1 から出射されるパルス増幅光 L 0 の拡がり角を変えることでも、S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径を変化させることができる。ただし、実際には、固体活性媒質 2 1 に入射するパルス光 L S の発散角を変えることで、S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径を変化させることになる。

40

【 0 0 5 7 】

50

このように、実施の形態 3 では、移動機構 6 2 は、折り返しミラー 6 0 で反射された第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する回数、および第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する通過距離のうち少なくとも 1 つを変化させる。

【 0 0 5 8 】

平行平面基板 6 3 は、波長フィルタ 4 0 の前段に配置される折り返しミラー 6 0 b と波長フィルタ 4 0 との間に配置される。平行平面基板 6 3 は、第 1 パルス光 L 1 が入射する面である入射面と、第 1 パルス光 L 1 が出射する面である出射面と、が互いに平行となる形状を有する。

【 0 0 5 9 】

回転機構 6 4 は、平行平面基板 6 3 を回転させることによって、平行平面基板 6 3 の入射面と第 1 パルス光 L 1 の光軸との間の角度を変化させる。一例では、回転機構 6 4 は、平行平面基板 6 3 の入射面に平行で互いに直交する 2 つの軸の回りに、平行平面基板 6 3 を回転させる。回転機構 6 4 は、平行平面基板 6 3 を回転させることで、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過することによって生じた光軸シフトを補正する。

【 0 0 6 0 】

実施の形態 3 では、折り返しミラー 6 0 で反射された第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する回数、および第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を通過する通過距離のうち少なくとも 1 つを変化させる移動機構 6 2 を備える。移動機構 6 2 で S R S 発生素子 3 0 を移動させることによって、第 1 波長のパルス光が S R S 発生素子 3 0 を通過する回数を、1 回から折り返しミラー 6 0 の数 + 1 回までの間で変化させることが可能となる。また、通過する回数を変化させることで、実質的な S R S 発生素子 3 0 の媒質長を長くすることが可能となる。さらに、S R S 発生素子 3 0 に入射するビーム径を大きくすることで、光学素子の損傷の可能性を抑制することができる。このように、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を複数回往復するようにし、かつ各折り返しミラー 6 0 での反射時に第 2 パルス光 L 2 を除去することで、ジャイアントパルスが発生した場合のジャイアントパルスの減衰率を高めることができるという効果を奏する。

【 0 0 6 1 】

また、実施の形態 3 では、S R S 発生素子 3 0 の後段に平行平板である平行平面基板 6 3 および平行平面基板 6 3 を回転させる回転機構 6 4 を備える。回転機構 6 4 を用いて、平行平面基板 6 3 の入射面と第 1 パルス光 L 1 の光軸との間の角度を適切に設定することで、第 1 パルス光 L 1 が S R S 発生素子 3 0 を複数回通過することにより生じた光軸シフトを補正することが可能となる。

【 0 0 6 2 】

実施の形態 4 .

図 9 は、実施の形態 4 による固体レーザー装置の構成の一例を模式的に示す図である。なお、実施の形態 4 では、固体活性媒質 2 1 と波長フィルタ 4 0 との間の光路の構成が実施の形態 1 とは異なるので、図 9 には、固体活性媒質 2 1 と波長フィルタ 4 0 との間の光路の構成を示している。

【 0 0 6 3 】

実施の形態 4 では、図 9 に示されるように、固体レーザー装置 1 は、アパーチャ 7 0 をさらに備える。アパーチャ 7 0 は、S R S 発生素子 3 0 の後段に配置される。アパーチャ 7 0 は、開口が形成された板状部材である。アパーチャ 7 0 は、円形の開口であることが好ましい。アパーチャ 7 0 は、アパーチャ 7 0 を通過するパルス光、すなわち第 1 パルス光 L 1 および第 2 パルス光 L 2 のうち、発散角が定められた値よりも大きい成分を除去し、発散角が定められた値よりも小さい成分を透過させる機能を有する。

【 0 0 6 4 】

一般に、非導波路型のバルク素子で発生する第 2 波長の S R S 光は、第 1 波長のパルス光よりも発散角の大きい成分を有する。従って、実施の形態 4 のように、S R S 発生素子

10

20

30

40

50

30の後段にアパーチャ70を配置することで、発散角の大きい第2波長のパルス成分を選択的に除去することができるという効果を有する。

【0065】

以上の実施の形態に示した構成は、一例を示すものであり、別の公知の技術と組み合わせることも可能であるし、実施の形態同士を組み合わせることも可能であるし、要旨を逸脱しない範囲で、構成の一部を省略、変更することも可能である。

【符号の説明】

【0066】

1 固体レーザー装置、10 種光源、11 制御部、20 固体増幅器、21 固体活性媒質、22 励起用光源、23 ダイクロイックミラー、30 SRS発生素子、31 温度制御機構、40 波長フィルタ、41, 61 ダンパ、50 光学系、51 加工対象物、60, 60a, 60b 折り返しミラー、62 移動機構、63 平行平面基板、64 回転機構、70 アパーチャ、80 偏向器、90 集光レンズ、100 固体レーザー加工装置、301 入射面、302 出射面、L0 パルス増幅光、L1 第1パルス光、L2 第2パルス光、L3 第3パルス光、LE 励起光、LS パルス光。

10

20

30

40

50

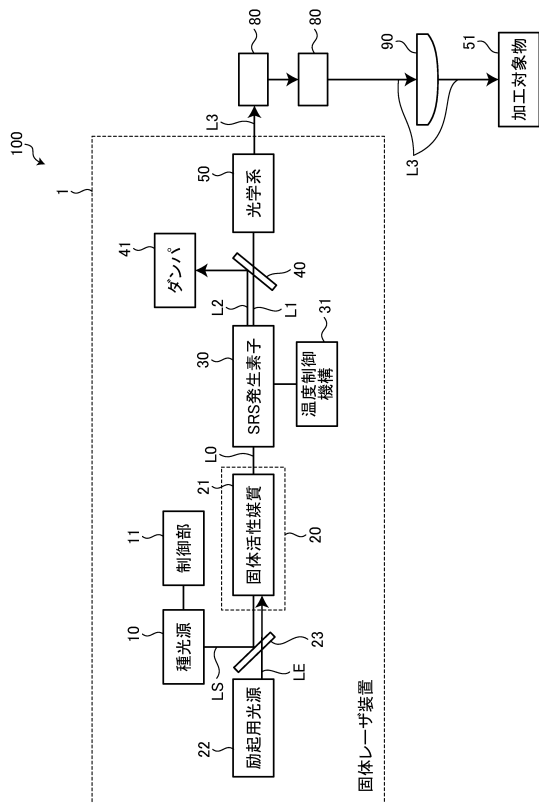
【要約】

固体レーザー装置(1)は、種光源(10)と、固体増幅器(20)と、誘導ラマン散乱発生素子(30)と、波長フィルタ(40)と、を備える。種光源(10)は、第1波長のパルス光(LS)を出力する。固体増幅器(20)は、パルス光(LS)を増幅した第1波長のパルス増幅光(L0)を出力する固体活性媒質(21)を有する。誘導ラマン散乱発生素子(30)は、固体増幅器(20)の後段に配置されパルス増幅光(L0)を誘導ラマン散乱によって1%以上の波長変換効率で第2波長へと波長変換し、第1波長の第1パルス光(L1)と第2波長の第2パルス光(L2)とを出力する。波長フィルタ(40)は、波長の違いを利用して、誘導ラマン散乱発生素子(30)から出力された第1パルス光(L1)の光路から第2パルス光(L2)を分離する。

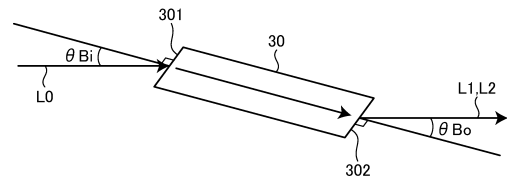
10

【図面】

【図1】



【図2】



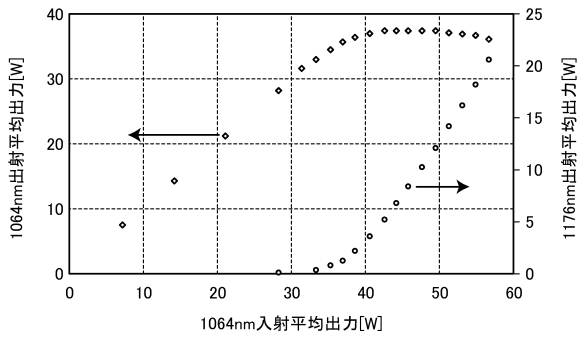
20

30

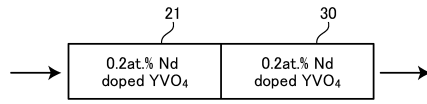
40

50

【 図 3 】

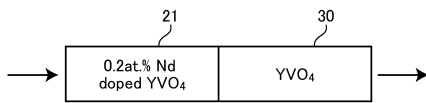


【 図 4 】

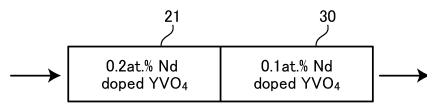


10

【 図 5 】



【 図 6 】



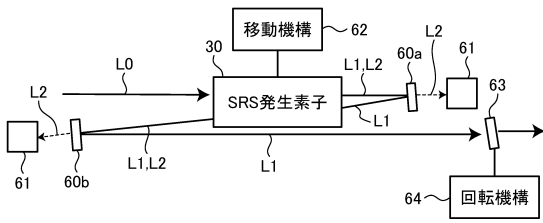
20

30

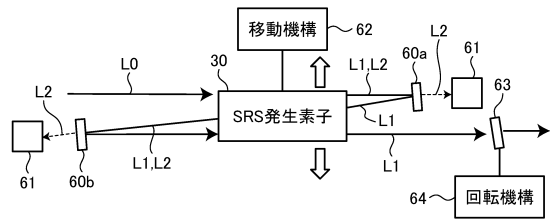
40

50

【図 7】

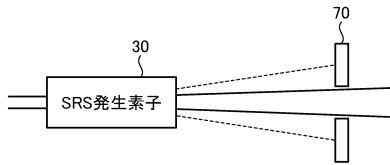


【図 8】



10

【図 9】



20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2003-017787(JP,A)
特開2008-209909(JP,A)
特開2006-019603(JP,A)
特開2002-031823(JP,A)
米国特許出願公開第2006/0120418(US,A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01S 3/30