

970310-8

PCT

世界知的所有権機関
国際事務局

特許協力条約に基づいて公開された国際出願



(51) 国際特許分類6 H01S 3/05, 3/094, 3/16	A1	(11) 国際公開番号 WO97/21259 (43) 国際公開日 1997年6月12日(12.06.97)
(21) 国際出願番号 PCT/JP95/02491 (22) 国際出願日 1995年12月6日(06.12.95) (71) 出願人 日立金属株式会社 (HITACHI METALS, LTD.)[JP/JP] 〒100 東京都千代田区丸の内二丁目1番2号 Tokyo, (JP) (72) 発明者 宮井 剛(MIYAI, Tsuyoshi) 〒360 埼玉県熊谷市別府1-65-5-304 Saitama, (JP) 牧尾 諭(MAKIO, Satoshi) 〒360 埼玉県熊谷市新堀新田450-3 Saitama, (JP) 古川保典(FURUKAWA, Yasunori) 〒366 埼玉県深谷市七柴西4-17-15 Saitama, (JP) 佐藤正純(SATO, Masayoshi) 〒366 埼玉県深谷市東方4-12-13 Saitama, (JP) (74) 代理人 弁理士 浅井章弘(ASAI, Akihiro) 〒231 神奈川県横浜市中区長者町5-75-1-1120 Kanagawa, (JP)		(81) 指定国 CN, JP, KR, SG. 添付公開書類 国際調査報告書
(54) Title: LASER RESONATOR, LASER DEVICE, DEVICE APPLYING LASER, AND METHOD FOR OSCILLATION OF LASER BEAM (54)発明の名称 レーザ共振器、レーザ装置、レーザ応用装置及びレーザ発振方法 (57) Abstract A laser resonator comprising a laser crystal composed of a chromium fluoride, and at least one optical part, which includes an aperture that allows the laser beam from the crystal to have a size substantially greater than five times that of a first laser beam generated in the resonator.		

(57) 要約

Crを含有するフッ化物からなるレーザ結晶および少なくとも一つの光学部品とからなるレーザ共振器において、共振器内部の開口が実質的に前記レーザ結晶からの発光を前記共振器内部で発振してからなる第1のレーザビームの直径の5倍以上に設定する。

情報としての用途のみ

PCTに基づいて公開される国際出願をパンフレット第一頁にPCT加盟国を同定するために使用されるコード

AL	アルバニア	EE	エストニア	LR	リベリア	RU	ロシア連邦
AM	アルメニア	ES	スペイン	LS	レソト	RD	シアド
AT	オーストリア	FI	フィンランド	LT	リトアニア	SE	スウェーデン
AU	オーストラリア	FR	フランス	LU	ルクセンブルグ	SG	シンガポール
AZ	アゼルバイジャン	GB	イギリス	LV	ラトヴィア	SK	スロバキア共和国
BB	バルバドス	GE	グルジア	MC	モナコ	SN	セネガル
BF	ベルギー	GH	ガーナ	MD	モルドバ	SS	スウェーデン
BG	ブルガリア	GN	ギニア	MG	マダガスカル	ST	サントメ・プリンシペ
BJ	ベナン	GR	ギリシャ	MK	マケドニア	TD	チャド
BR	ブラジル	HU	ハンガリー	VI	ベトナム	TC	タークス・カコス
BY	ベラルーシ	IE	アイルランド	ML	マリ	TJ	タジキスタン
CC	カナダ	IS	アイスランド	MN	モンゴル	TM	トルクメニスタン
CF	中央アフリカ共和国	IT	イタリア	MR	モーリタニア	TR	トルコ
CG	コンゴ	JP	日本	MW	マラウイ	TT	トリニダード・トバゴ
CH	スイス	KE	ケニア	MX	メキシコ	UG	ウガンダ
CI	コート・ジボアール	KP	朝鮮民主主義人民共和国	NE	ニジェール	US	米国
CM	カメルーン	KR	大韓民国	NL	オランダ	UZ	ウズベキスタン共和国
CN	中国	KZ	カザフスタン	NO	ノルウェー	VN	ベトナム
DE	ドイツ	LI	リヒテンシュタイン	NZ	ニュージーランド	YU	ユーゴスラビア
DK	デンマーク	LK	スリランカ	PT	ポルトガル		
				RO	ルーマニア		

1

明 細 書

レーザ共振器、レーザ装置、レーザ応用装置及びレーザ発振方法

技術分野

本発明は光エレクトロニクス分野、特にレーザプリンタ装置、光造形装置、光ディスク、DNAシーケンサ装置およびパーティクルカウンター装置等に用いられるレーザ共振器、レーザ装置、レーザ応用装置及びレーザ発振方法に関する。

背景技術

高度情報化時代の進展に伴い、光ディスク装置やレーザプリンタ装置などのコンピュータ周辺レーザ応用装置において記録密度向上や高速印刷の要求を満足するため、短波長化への要求が高まっている。しかし製品化レベルで要求の高い青色領域（波長400～480nm）を満足する光源としてはHe-Cd（ヘリウムカドミウム）レーザ装置やAr（アルゴン）レーザ装置などのガスレーザ装置しかなく、大型で消費電力が大きい。このようにレーザ装置が大型であるため、レーザ装置を光源として内蔵するレーザ応用装置は少なくともレーザ装置以上の大きさを有する必要があるため大型となり、デスクトップサイズが主流のオフィス環境および住宅環境に適応できない問題があった。

またレーザ装置の投入電力からレーザ光への変換効率が小さく、消費電力の多くは熱となるため冷却手段を必要とし、レーザ応用装置のサイズが大きくなる問題があった。またこの冷却手段の振動による光学系のズレがレーザ応用装置の信頼性を劣化させる等の問題があった。さらにガスの劣化等によりレーザ装置の寿命が短いことからレーザ応用装置の寿命も短いという問題があった。

これに対し、固体レーザの共振器内部に非線形光学結晶を挿入し

2

、固体レーザ発振波である第1のレーザビーム（以下場合によっては基本波と称す）の $1/2$ の波長に変換して第2のレーザビームを発生させる光第2高調波発生（以下単にSHGと記す；Second Harmonic Generation）などの波長変換技術を適応することで、前述のようなガスレーザの有する問題点を解消する試みがなされた。例えば800～900nm帯の波長領域で発振可能なレーザ結晶であるTi:Al₂O₃ (Ti-Sapphire; 以下単にTi-Sapと記す) やCr:LiSrAlF₆ (クロム添加のフッ化リチウムストロンチウムアルミニウム；以下単にLiSAFと記す) を用いた固体レーザのSHG方式が提案された。前記SHG光源において、レーザ媒質単体の寿命はガスから固体結晶となることで大きく改善された。しかし後者のLiSAFレーザの励起光源はKr（クリプトン）レーザすなわちガスレーザであり、従来の問題点が依然として残った。また、Ti-Sapレーザの励起光源としては、QスイッチNd:YAG（ネオジウム添加のイットリウムアルミニウムガーネット）レーザを基本波とする緑色SHGレーザを用いている。したがってレーザ光源全体は固体化されたため寿命は改善された。しかし、励起光源を含めてSHGレーザが2つ用いられたため装置が複雑でサイズおよび消費電力が大きく、従来の問題点を大きく改善するものではなかった。また、いずれの場合もSHG出力はパルス出力のためレーザプリンタ、光造形装置および光ディスク装置などのレーザ応用装置に用いる場合には例えば信号の不連続点が生じるなどの問題があった。

前述のLiSAFレーザの励起光源としては、波長670nmの赤色半導体レーザによる励起が可能であることが既に開示されている（アール・スクワース、ジェイ・I7、メイヤー、イチ・ヒュー、セラース、エイ・ロゼンバーグ、アール・シー・モリス、IM、ロク、"半導体レーザ励起Cr:LiSrAlF₆レーザ" 光学通信16巻11号820頁（1991年）、R. Scheps, J.F. Myers, H.B. Serreze, A. Rosenberg, R.C. Morris, and M. Long, "Diode-pumped Cr:LiSrAlF₆ laser", Opt. Lett., Vol. 16, No. 11, p820 (19

3

91))。したがって前述のLiSAFレーザを基本波とするSHG光源において、励起光源をKrレーザから半導体レーザへ置き換えることで、従来のガスレーザ装置自体のサイズ、消費電力および寿命の問題を大きく改善できる可能性があることが予想される。

しかしながら、LiSAFレーザは共振器内部の損失による効率低下が著しいことが開示されている(クィザンク、ジ-、ジェイ、ディクソン、ピー、イチ、チャイ、ピー、イヌ、キ-ン、「電氣的に波長チューニングされた半導体レーザ励起Cr:LiSrAlF₆レーザ」光学通信17巻1号43頁(1992年)、Qi Zhang, G.J. Dixon, B.H. Chai and P.N. Kean, "Electrically tuned diode-laser-pumped Cr:LiSrAlF₆ laser", Opt. Lett., Vol. 17, No. 1, p43, (1992))。このためこの効率低下の要因を調査し、検討を加えることで具体的な解決策を見出すことにより、解決しなければ実用化の可能性は極めて低い。

前記Qi Zhang等はLiSAFレーザの波長選択を行うための波長チューニング素子である複屈折フィルタをLiSAFレーザの共振器から取り出した。一般に複屈折フィルタはLiSAFレーザなどの波長チューニングが可能なレーザにおいてレーザ共振器中に配置され、発振ビームのうち望ましい波長以外の発振ビームに反射損失などの損失を与え、所望の波長のレーザビームを選択する機能を有する。そこでQi Zhang等は複屈折フィルタを含む波長チューニング専用の共振器をLiSAFレーザの共振器の後段に付加した。つまりLiSAFレーザの共振器に所望の波長の戻り光を帰還し増幅させることで、LiSAFレーザの共振器による損失を与えることなく波長チューニングを行う手段を提案した(米国特許第5218610号)。ここでQi Zhang等が注目した損失は主に複屈折フィルタによる反射損失である。この方式は前記の損失は改善できるが装置が複雑で大きくなる可能性を有していた。

また、レーザ結晶であるLiSAF結晶の不均一なエネルギー吸収がレーザ発振効率の低下に影響することに着目し対策を行った例

4

がある。すなわち吸収に関与するCrを励起方向に異なる濃度で分布せしめることで効率の低下を改善しようとするものである（米国特許第5287373号）。しかしこの方式は市販レベルで実現されておらずQi Zhang等が指摘した問題に対する改善効果は不明である。

ここで前述のF. Balembois等の示した光学系においては励起光源をKrレーザとし平均3.3Wのパルス励起を用いて平均7.4mWのパルスSHGレーザ出力を得ているが、前述のようにSHGレーザ出力は連続波でなければならない。また、必要とされる出力は装置においてばらつくが、10mW程度必要と考えられる。これに対し、現状で市販されているLiSAFレーザの励起が可能な半導体レーザは単一ストライプの場合、最大500mWクラスのものである。ここで、一般に固体レーザの入出力特性において基本波の出力は励起入力に比例するため、励起光源をKrレーザから半導体レーザに置き換えることで基本波パワーは約1/6となる。また、SHG出力は基本波パワーの2乗に比例するため期待されるSHG出力は約1/36、すなわち0.2mWのパルス出力となり、効率の大幅な改善が行われなければ実用に耐え得るSHG出力が得られないことが判る。また、Krレーザに比較して半導体レーザは出力ビームの形状すなわち横モードが著しく扁平であるため、ビーム整形技術を適応しても励起効率の劣化が予想され、SHG出力のさらなる低下が予想される。

すなわち、励起光源を単にKrレーザから半導体レーザに置き換えただけでは、実用上十分な出力を有するSHGレーザ光源は実現しないことが容易に予想される。また、将来半導体レーザの高出力化が達成された場合でも、半導体レーザ自体の発熱量が増加するため強制冷却手段が必要となり、大型で消費電力の大きな装置となることが懸念される。

以上より従来開示されている知見を単に積み上げることではガスレーザの問題点を一挙に解決する半導体レーザで励起したLiSA

5

Fレーザを用いたSHGレーザを実現することは困難であることが判明した。したがって、効率低下の要因を見出し、具体的な対策を講じることにより小型で低消費電力のSHGレーザ光源の実現と、SHGレーザ光源を用いたレーザ応用装置の実現を達成することが必要とされている。

また、前記ガスレーザと同等の出力波長を有するSHG光源として、図10で示すように近赤外の半導体レーザ出力を第1の発振波すなわち基本波とし、外部共振器で共振させて、その中に非線形光学結晶（以下で取り扱う波長変換は全てSHGであるため単にSHG結晶と称す）であるKN（ KNbO_3 ；ニオブ酸カリウム）を配置することで第2の発振波すなわちSH波である青色レーザ光を得る方法が提案されている（W.J.Kozlovsky and W.Lenth, "Generation of 41mW of blue radiation by frequency doubling of a GaAlAs diode laser", Appl. Phys. Lett., vol. 56, no. 23, p2291, 1990）。

しかし、前記SHG光源において、外乱の影響を受けやすい半導体レーザの発振波長をKNの変換効率が最大となる波長に安定に合わせるためには反射戻り光から半導体レーザを守るために光アイソレータ102を入れることが必要であり、またKNを含む外部共振器の共振器長を基本波の波長オーダで制御するために共振器からの反射光を光検出器105で受け、その電氣的出力をフィードバック回路106により半導体レーザを安定に発振させることなどの高度な技術課題があり、製品化レベルの解決がかなり困難と予想される。このSHG光源においては、外乱の影響を受けやすい半導体レーザの発振波長をKNの変換効率が最大となる波長に安定に合わせることに、KNを含む外部共振器の共振器長を基本波の波長オーダで制御することの2つの技術課題について製品化レベルでの解決が困難と予想される。

また、本発明者らは、前述のLISAFLレーザは波長制御素子を用いることで広帯域波長可変レーザとして用いることが可能であり

6

、このLiSAFレーザを第1の発振波（基本波）とし非線形結晶により第2の発振波として青色領域のSHG光として発生させる方法を検討したところ、二つの問題点を発見した。

第1の問題点は波長制御素子の透過帯域以外の波長域はレーザ共振器内では損失となるために発振しきい値が高くなり、必要とするSHGレーザ出力を得るには励起用半導体レーザの出力が高くなってしまふことである。図11はLiSAF結晶を用いた半導体レーザ励起波長可変固体レーザ装置（以下単にLiSAFレーザと称す）の入出力特性である。実線は波長制御素子がある場合のLiSAFレーザの入出力特性を、点線は波長制御素子がない場合の入出力特性を示す。この場合の波長制御素子は色素レーザやTiサファイアレーザで用いられている3枚の厚さの異なる水晶板からなるもので、水晶板を透過できる波長帯域を3nm以下と狭くすることができ、レーザ発振波長幅を0.1nm以下で波長制御できる。図11より透過波長帯域幅の狭い波長制御素子を挿入することで共振器内の損失が増加し、発振しきい値が10倍以上高くなり、入れない場合と同じ出力を得るには10倍以上の励起入力が必要となるため大型の半導体レーザが必要となり、半導体レーザの駆動および冷却のための装置が大きく、消費電力も多くなってしまう。なお、波長制御素子を入れない場合の発振波長幅は約10nmであり、波長制御素子を入れる場合の100倍以上であった。

第2の問題点は従来から用いられている青色SHG光を得ることのできる非線形結晶のKN結晶はSHG波が発生する位相波長幅である位相整合波長半値幅が図12に示すように0.4nmと非常に狭く、さらに結晶の伝搬損失が0.5%/cmと高いために共振器内の損失が大きくなり発振しきい値が高くなり、前記LiSAFレーザ内に挿入しても十分なSH出力を得られないことである。

また、KN結晶は結晶の温度の変化に依存して変換効率が最大となる波長が0.3nm/℃変化するために正確な温度制御をしないと安定

なSH出力が得られないという問題点があった。

発明の開示

本発明者らは、共振器内部の損失について検討した結果、損失は光学部品の開口の大きさと何らかの関係があることを見いだした。ここで開口とは具体的には共振器中の光学部品の光学面の有効断面積を意味する。つまり、通常のレーザ装置において光学部品の開口はレーザビーム径より大きければ問題はないとされていた。ところが、新しいレーザであるLiSAFレーザにおいては光学部品の開口が従来の常識的な大きさでも損失が生じることを見出し本発明に想到した。すなわち、本発明はCrを含有するフッ化物よりなるレーザ結晶および少なくとも一つの光学部品とからなるレーザ共振器において、前記共振器内部の開口が実質的に前記レーザ結晶からの発光が発振してからなる第1のレーザビームの直径の5倍以上であることを特徴とするレーザ共振器である。

図13は代表的な固体レーザであるNd:YVO₄（ネオジウム添加の酸化バナジウムイットリウム）レーザとLiSAFレーザの共振器中の開口による発振効率低下の現象を説明するための図である。図13上部に実験に用いた共振器の形状を示す。

共振器はレーザ結晶の端面に形成された平面ミラーと凹面ミラーとで形成されている。発振ビーム直径は共振器を形成するミラーの曲率半径と距離で決まり、図13上部に示した平凹式共振器においては平面側でビーム直径は最小となり、凹面ミラーで最大となる。このとき凹面ミラーの曲率半径は150mmであり、共振器ミラー間の実効光路長はミラーの曲率半径よりわずかに短い。図13の横軸は平面ミラーからの距離を、右側の縦軸はビーム直径を示している。共振器中のビーム直径は横モードがTEM₀₀モードの真円ビームの場合、下記の式1により求められる最小ビーム直径と、下記の式2により求められる各位置でのビーム直径により計算できる。

$$W_0 = \left[\left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{d(R_1-d)(R_2-d)(R_1+R_2-d)}{(R_1+R_2-2d)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{式 1}$$

$$w(z) = \left[w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 2}$$

式 1 において w_0 は最小ビーム直径、 λ は第 1 のビームの波長、 d は共振器長、 R_1 、 R_2 はミラーの曲率半径を表す。式 2 において $w(z)$ は最小ビーム直径となる位置から距離 z 離れた場所でのビーム直径を表す。計算で求められるビーム直径は最小で約 0.2 mm、最大で約 0.8 mm であった。また、出力ミラー直後のビーム直径を実測してみると各々の場合においてほぼ等しく、計算結果と良く一致していた。ここで共振器中に $\phi 2.5$ mm の開口を挿入し、発振ビーム強度が最大となるように調整し、発振ビーム強度を測定した。

左側の縦軸は開口を挿入した場合と開口を挿入しない場合の発振ビーム強度の比を示している。Nd:YVO₄ レーザでは共振器内部の開口がビーム直径の 3 倍、すなわちビーム直径が最大の 0.8 mm となった場合でも 90% 以上の効率で発振可能であるのに対し、LiSAF レーザでは共振器内部の開口をビーム直径の 5 倍以下とすることで、効率が 80% 程度に低下することが明らかとなった。

また、効率低下の傾きも LiSAF レーザは Nd:YVO₄ レーザに比較して大きいことが分かる。また、Nd:YVO₄ レーザと同程度の効率である 90% 以上を確保するためには開口がビーム直径の 7 倍以上であることが望ましい。さらに 10 倍以上となる領域では効率低下が全く見られないため、特に望ましい領域と考えられる。

一般にビーム直径は横モードが真円の TEM₀₀ モードで光強度がガウシアン分布となっている場合、ピーク強度の $1/e^2$ 以上の範囲の直径で規定されている。また、ビームの横モードが TEM₀₀ 以

9

外の場合はビーム直径を光強度がピークの $1/e^2$ 以下となる境界線の最外周を結ぶ最大長さとして規定する。また、以上は開口の下限に関する規定を述べたものであるが、上限は結晶の最大育成可能サイズ、安定加工可能サイズおよびコーティングの品質が確保できるサイズで限定される。常識的には1000倍程度が望ましい。

つぎに、本発明者らは、LiSAFレーザの入出力特性に飽和現象が存在することを見出した。

図14はLiSAFレーザと代表的な固体レーザであるNd:YVO₄レーザの入出力特性を比較説明するための図である。実線はLiSAFレーザの入出力特性を、点線は一般的な固体レーザ装置の入出力特性を示す。Nd:YVO₄レーザにおいて入出力特性は点線で示したようにある入力値において立上がった後、励起入力と固体レーザ出力はほぼ比例関係となる。一方LiSAFレーザにおいては実線で示したように線形領域を過ぎた後出力特性が飽和し、励起入力が増加しても最後には発振が消滅する現象が見られ、安定な固体レーザ出力を得ることができないという問題点を有するということが分かった。本発明者らは鋭意検討の結果、LiSAFレーザにおいて、図14に示した入出力特性に見られた飽和現象および発振消滅現象はLiSAFを用いたレーザ結晶の温度制御を行うことにより解決できることを見出し、本発明に想到した。

図15はLiSAF結晶を温度制御した場合としない場合のLiSAFレーザの入出力特性を比較説明するための図である。実線はLiSAF結晶を $15 \pm 5^\circ\text{C}$ に温度制御した場合の入出力特性を、点線は温度制御しない場合の入出力特性を示している。図15においてレーザ結晶を温度制御することで線形領域を拡大し、安定な固体レーザ出力を得ることができると分かる。図15においてLiSAF結晶の温度を 15°C とした入出力特性を示したが、結晶温度を 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C と変えた場合の入出力特性も測定したが、いずれの場合も入出力特性における線形領域は拡大され、安

定な固体レーザー出力を得た。すなわち、温度制御範囲の下限は使用条件においてレーザー結晶が結露しない温度となる。また、上限は使用条件において前記発振消滅現象が観察されない温度となる。レーザー結晶の温度 T が $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$ となる範囲で制御されていることが望ましい。

また、前記共振器を構成する複数のミラーの少なくとも1つが前記レーザー結晶の一端面に形成されていると好ましい。

また、前記光学部品のうち少なくとも一つの部品が波長制御素子であると好ましい。

また、 Cr:LiSrAlF_6 からなるレーザー結晶と、前記レーザー結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザー結晶を励起するための半導体レーザーと、前記レーザー結晶からの発光が前記レーザー共振器において発振してからなる波長 λ_1 が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000 \text{ nm}$ の第1のレーザービームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザービームの直径の5倍以上の開口を有すると好ましい。

また、 Cr:LiSrAlF_6 からなるレーザー結晶と、前記レーザー結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザー結晶を励起するための半導体レーザーと、前記レーザー結晶の温度 T を $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$ の範囲で温度制御するための手段と、前記レーザー結晶からの発光が前記レーザー共振器において発振してからなる波長 λ_1 が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000 \text{ nm}$ の第1のレーザービームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザービームの直径の5倍以上の開口を有する波長制御素子とからなるレーザー装置であると好ましい。

また、前記光学部品が波長制御素子と非線形光学結晶を含むと好ましい。

更に、固体レーザー結晶の発振波長を制御するための制御素子としてブリュースタ角に傾けた複屈折結晶を用いればよく、複屈折結晶

に水晶 (SiO_2)、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 のいずれかを用いれば良い。

好ましくは前記複屈折結晶として厚さ 0.4 ~ 3 mm の 1 枚の水晶板を用いるとよい。更に、非線形結晶として LBO (LiB_3O_5) 及び / 又は BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) を用いると良い。

固体レーザ結晶の発振波長を制御するための制御素子が第 1 の放射波を共振させる共振器ミラーであるとしてよく、さらに共振器ミラーの反射率が 99.9 % 以上の第 1 の発振波の波長帯域幅が中心波長に対して 10 nm 以下であるとよい。

共振器構造が少なくとも 2 枚のミラーからなるか、または共振器構造を形成する少なくとも 1 枚のミラーにおいて前記第 2 高調波の透過率が 60 % 以上を有するとよい。

固体レーザ結晶の発振波長を制御するための制御素子として複屈折結晶を使用した場合について本発明者らは発振しきい値を高くする原因となる波長制御素子である複屈折結晶の透過波長幅について検討を行った。一般にレーザ共振器の発振特性は共振器内の損失に依存しており、損失が高いと発振に至るまでのしきい値が高くなってしまう。また波長制御素子の透過帯域幅は狭いと共振器内の損失となるために発振しきい値が高くなってしまう。図 16 はブリュースタ角に傾けた水晶の複屈折結晶の組み合わせ枚数による透過波長幅を計算したものである。各条件の複屈折結晶厚さは図 16 より複屈折結晶の枚数を増やす、つまり複屈折結晶の厚さを増やすことにより透過波長幅が狭くなっていることがわかる。このことより複屈折結晶の枚数を減らす、つまり複屈折結晶の厚さを減らすことで透過波長幅を広げることができ発振しきい値を下げるができるという効果を有することが判った。

この複屈折結晶は複屈折結晶である LiNbO_3 、 LiTaO_3 等も用いることができる。

更に、図 17 に複屈折結晶を水晶板一枚とした場合の複屈折結晶

12

の厚さに対するレーザ発振波長間隔を示す。ここでレーザ発振波長間隔とは、同時にレーザ発振できうる波長の間隔であり、レーザ媒質の波長に対する利得特性に依存しており、利得特性が広いとレーザ発振できる波長範囲が広いために、波長制御素子の透過波長間隔によっては同時にレーザ発振する場合がある。図17より厚さが厚くなるとレーザ発振する波長の発振波長間隔が狭くなることが分かる。これは厚さが厚いと隣り合うレーザ発振可能な波長間隔が狭くなり、L i S A Fレーザのように広帯域での発振が可能なレーザで同時に2つ以上の発振波長で発振する可能性がある。一般のレーザミラーの反射帯域幅は50 nm程度であるため、2つ以上の同時発振を抑制するためには、前記の反射帯域幅の半分程度の25 nm程度以上の発振波長間隔が必要であることから複屈折結晶の厚さは図17より3 mm以下である必要がある。また結晶の厚さが薄すぎると波長制御が困難となるためとL i S A Fレーザの発振波長幅が約20 nmであることから、図17より結晶の厚さは0.4 mm以上である必要がある。従って、複屈折結晶の厚さは、0.4 ~ 3 mmの範囲でさらに発振しきい値を低くすることができる。

上述のように複屈折結晶を用いることによって発振しきい値を低くすることはできたが、透過波長幅を広げることによって発振波長幅が広くなるため、S H G結晶の位相整合半値幅より大きくなり、あまり効率よくS H Gを発生できない。さらに効率を上げていくために本発明者らは、位相整合半値幅が比較的広いL B O (L i B ₃ O ₅) 結晶やB B O (β - B a B ₂ O ₄) 結晶或いはC L B O (C s L i B ₆ O ₁₀) 結晶を用いることで解決可能であることに想到した。図18はL B O結晶の位相整合波長半値幅である。K N結晶に比べて約20倍の幅を有しているために、波長制御素子である複屈折結晶として図16より厚さ0.5 mmの水晶板を1枚とすることで透過波長幅を10 nm程度とし、共振器内の損失をなくすためにブリュースタ角に傾けて挿入することでL B O結晶の位相整合幅を

13

充分満足したSH出力が得られる。また、LBO結晶は温度に対しても位相整合幅の変化が $0.1\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 以下と小さいために温度制御する必要がなく、伝搬損失が $0.1\%/cm$ と小さいために共振器内損失となる割合が低い。BBO結晶やCLBO結晶を使用してもLBO結晶と同様な効果が得られる。しかし、SH結晶を温度制御することによっても更に安定なSH出力を実現できることは明らかである。

さらに、固体レーザ結晶の発振波長を制御するための制御素子として複屈折結晶を用いず、共振器ミラーの反射率が99.9%以上の波長帯域幅が中心波長に対して10nm以下であるものを用いることでも可能である。レーザ共振器を構成する共振器構造が少なくとも2枚以上のミラーからなり、これら共振器構造を形成する少なくとも1枚のミラーにおいて第2の発振波長つまりSHGの透過率が60%以上とすることでSH光を効率よく共振器外に取り出すことができる。

また、 Cr:LiSrAlF_6 からなるレーザ結晶と、前記レーザ結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザ結晶を励起するための半導体レーザと、前記レーザ結晶からの発光が前記レーザ共振器において発振してからなる波長 λ_1 が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000\text{ nm}$ の第1のレーザビームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザビーム直径の5倍以上の開口を有する非線形光学結晶と、波長制御素子と、前記非線形光学結晶と、前記レーザ結晶と非線形光学結晶を同時にまたは各々単独に温度制御する手段と、第1のレーザビームの一部から異なる波長に変換された第2のレーザビームを取り出す手段を有するレーザ装置であると好ましい。

また、前記非線形光学結晶が LiB_3O_5 （三ほう酸リチウム）、 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ （セシウムリチウムボレート）、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ （ほう酸バリウム）、 KNbO_3 （ニオブ酸カリウム）、 KTaO_3 （タンタル酸カリウム）

)、 K-Li-Nb-O (ニオブ酸リチウム-カリウム)、 K-Ta-Nb-O (ニオブ酸、タンタル酸-カリウム)、または LiIO_3 (ヨウ酸リチウム)のうちのいずれかであると好ましい。

また、本発明に関わるレーザ共振器やレーザ装置をレーザプリンタ装置、光造形装置、光ディスク装置、パーティクルカウンター装置及びDNAシーケンサ装置等に用いると小型で安定性に優れた装置を提供できる。

図面の簡単な説明

図1は本発明の一実施例を説明するための図である。

図2は本発明の別の効率改善の手段であるレーザ結晶の温度制御を適応した場合の他の実施例を説明するための図である。

図3は本発明の他の実施例であるSHGレーザを説明するための図である。

図4は本発明の一実施例をレーザプリンタ装置に用いた応用例を説明するための図である。

図5は本発明の一実施例を光造形装置に用いた応用例を説明するための図である。

図6は本発明の一実施例を光ディスク装置に用いた応用例を説明するための図である。

図7は本発明の一実施例を説明するための図である。

図8は本発明の一実施例を説明するための図である。

図9は本発明の一実施例を説明するための図である。

図10は従来の実施例を説明するための図である。

図11は LiSAF 結晶を用いた半導体レーザ励起固体レーザ装置における波長制御素子の有無による入出力特性を比較説明するための図である。

図12は KN 結晶の位相整合波長幅を説明するための図である。

15

図13は代表的な固体レーザーであるNd:YVO₄レーザーとLiSAFレーザーの共振器中の開口による発振効率低下の現象を説明するための図である。

図14はLiSAF結晶を用いた半導体レーザー励起固体レーザー装置と代表的な固体レーザーであるNd:YVO₄レーザーの入出力特性を比較説明するための図である。

図15はLiSAF結晶を温度制御した場合としない場合のLiSAFレーザーの入出力特性を比較説明するための図である。

図16は複屈折結晶の枚数による透過波長幅を比較説明するための図である。

図17は複屈折結晶の厚さに対する発振波長間隔を説明するための図である。

図18はLBO結晶の位相整合波長幅を説明するための図である。

発明を実施するための最良の形態

以下に、本発明の実施例について詳しく説明するが、本発明はこれらの実施例に限るものではない。

(実施例1)

図1は本発明の一実施例を説明するための図である。半導体レーザー11から出射された励起ビーム31は集光光学系12により集光され、レーザー結晶21を励起する。半導体レーザー11はSDL (Spectra Diode Lab.) 社製AlGaInP系半導体レーザーを用い、出力500 mW、発振波長670 nmである。また、集光光学系12は半導体レーザーコリメータ(焦点距離8 mm)とアナモルフィックプリズムペア(倍率: 6倍)、および単レンズ(焦点距離30 mm)を用いた。

励起されたレーザー結晶21はレーザー結晶端面に形成された入射側共振器ミラー24と出力ミラー25からなる固体レーザー共振器20

16

で第1のレーザビーム32を発振する。固体レーザ共振器20中にはレーザ結晶21と波長制御素子としての波長チューニング素子23が配置されている。共振器中で発振する第1のレーザビーム32の波長は波長チューニング素子23によりチューニングされる。このとき共振器構造20は平凹式共振器であり、出力ミラー25の曲率半径は150mm、実効光路長は曲率半径よりわずかに短くした。

レーザ結晶21にはCr添加量1.5mol%のLiSAF結晶($\phi 3 \times 5$ mm)を用いた。結晶の前方端面24には励起波長に対して反射率2%以下の無反射(以下単にAR; Anti-Reflection)コーティング、第1のレーザビームの波長に対して反射率99%以上の高反射(以下単にHR; High-Reflection)コーティングを施した。ここで前記HRコーティングの反射率は第1のレーザビームを効率良く反射することができれば良く、特に99%以上とする必要はない。後方端面には第1のレーザビームの波長に対して反射率2%以下のARコーティングを施した。出力ミラー25には第1のレーザビームに対し99%以上のHRコーティングを施した。ここで出力ミラー25の反射率は第1のレーザビームを高効率に取り出す事ができればよく、特に99%以上とする必要はない。

また、本発明において図13に示したようにLiSAFレーザの共振器中の開口を第1のレーザビーム直径の5倍以上とすることで損失を大きく改善できることを実証した。これに基づきレーザ結晶は $\phi 3$ mm、波長チューニング素子23の開口は $\phi 5$ mm、出力ミラーの開口は $\phi 10$ mmとした。

また、波長チューニング素子23には水晶板からなる複屈折フィルタ1枚を用い、第1のレーザビーム32に対して最も反射損失が小さくなるブリュースター角となるように配置した。第1のレーザビーム32は複屈折フィルタを光軸の回りに回転することで波長チューニングできる。波長チューニング範囲は約 860 ± 50 nm、

波長選択幅は約0.5nmとした。ここで波長選択幅は第1のレーザービームの出力が著しく低下しない範囲で任意である。さらに波長チューニング素子は複屈折フィルタの他にプリズム、エタロンまたは外部からの注入同期、あるいはその組合せを用いてもよい。

また、LiSAF結晶21の吸収の波長許容幅は約100nmと広く励起用半導体レーザーを温度制御素子などを用いて波長チューニングしなかったが、最大吸収波長に一致させるため波長チューニングしても良い。

また、半導体レーザーの集光光学系はシリンドリカルレンズまたは光ファイバなどのビーム整形機能を有する光学部品を用いることで代用できる。

(実施例2)

図2は本発明の別の効率改善の手段であるレーザー結晶の温度制御を適応した場合の他の実施例を説明するための図である。励起光源11、集光光学系12、レーザー結晶21、波長チューニング素子23および共振器構成20は実施例1と同様である。また、共振器中の開口および波長チューニング範囲等は実施例1と同様である。

図15で示したようにLiSAF結晶を温度制御することで安定なレーザー出力が得られることが分かっており、図2においてLiSAF結晶は電子冷却素子とサーミスタを用いて15℃に温度制御した。制御温度はレーザー結晶が結露しはじめる温度を下限とし、使用条件でレーザー出力に飽和が見られない範囲で任意に設定可能である。

(実施例3)

図3は本発明の他の実施例であるSHGレーザーを説明するための図である。半導体レーザー11を含む励起光学系は実施例1と同様のものを用いた。

励起されたレーザー結晶21はレーザー結晶端面に形成された入射側共振器ミラー24と出力ミラー25からなる固体レーザー共振器20

18

で固体レーザ発振波である基本波32を発生する。固体レーザ共振器20中にはレーザ結晶21と基本波の一部をSHG波に変換するための非線形光学結晶22と波長チューニング素子23が配置されている。非線形光学結晶22には LiB_3O_5 （ホウ酸リチウム；以下単にLBOと称す）を用い、サイズは $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}$ で基本波およびSHG波波長に対し2%以下のARコーティングを施した。

またLiSAF結晶21とLBO結晶22は同時に 25 ± 0.1 ℃に温度制御素子を用いて温度制御を行った。出力ミラー25には基本波に対し99%以上のHRコーティングを、SHG波に対してはARコーティングを施し実施例1と同様開口を $\phi 10 \text{ mm}$ とした。その他の光学部品は実施例1と同様のものを用いた。共振器中で発振する基本波32の波長は波長チューニング素子23により非線形光学結晶22の波長変換効率が最大となる波長にチューニングされ、前記基本波32の一部は非線形光学結晶22によりSHG波33に波長変換され出力ミラー25から出射される。本発明により半導体レーザ入力455mWのときSHG出力10mWを得た。

波長チューニング範囲は約 $860 \pm 70 \text{ nm}$ 、波長選択幅は0.5nmとした。ここで、波長チューニング範囲はLBO結晶の変換効率が最大となる波長近傍で、波長選択幅はSHGレーザ出力が著しく低下しない範囲で任意である。

また、LBO結晶22の代わりに $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ （ほう酸バリウム）、 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ （セシウムリチウムボレート）、 KNbO_3 （ニオブ酸カリウム）、 K-Li-Nb-O （ニオブ酸リチウムカリウム）、または LiIO_3 （ヨウ酸リチウム）など基本波の波長チューニング領域のいずれかで波長変換素子として位相整合可能な非線形光学結晶のいずれを用いても良い。

以上の実施例と同等の出力が得られた従来のガスレーザを用い、特性比較を行った。寿命ではガスレーザが2000～5000時間で出力が50%に低下したのに対し、SHGレーザの場合1000

19

0時間以上の動作でも出力の低下は見られなかった。したがって本実施例により寿命は2～5倍に延びた。また、サイズではガスレーザが10～15リットルであったのに対し、SHGレーザは0.3リットルであった。したがって本実施例によりサイズは1/50～1/30に小型化できた。また、消費電力ではガスレーザが1000～2000Wであったのに対し、SHGレーザは5Wであった。したがって本実施例により消費電力を1/400～1/200に低減できた。以上のガスレーザと本実施例であるSHGレーザとの特性比較表を表1に示す。

表1 ガスレーザと本発明のSHGレーザとの各仕様の比較結果

レーザ光源	出力(mW)	寿命(時間)	サイズ(リットル)	電力(W)
Arレーザ	15	5000	10	2000
He-Cdレーザ	10	2000	15	1000
SHGレーザ	10	>10000	0.3	5

(実施例4)

図4は本発明の一実施例をレーザプリンタ装置に用いた応用例を説明するための図である。図3で説明したSHGレーザ光源100から出射されたSHGレーザ出力33は、音響光学(以下単にAO; Acousto-Optical)変調器51、ビームエキスパンダ52、回転多面鏡53、fθレンズ54を通過し、感光ドラム55に集光される。AO変調器51は画像情報に応じてSHG出力43の変調を行

20

い、回転多面鏡53は水平（紙面内）方向に走査する。この組合せで2次元情報は感光ドラム55に部分的な電位差として記録される。感光ドラム55は前記電位差に応じてトナーを付着して回転し、記録用紙に情報を再生する。

このとき感光ドラム55に塗布された感光体はセレン（Se）であり、SHGレーザ光源100の出力波長は感光体の感度の比較的高い420nmとし、出力10mWとした。ここで感光体はSe以外のものを用いてもよい。

（実施例5）

図5は本発明の一実施例を光造形装置に用いた応用例を説明するための図である。光源には図3で説明したSHGレーザ光源100を用いた。青色硬化樹脂61を容器に満たし、レーザ光を液面上に2次元走査する。このとき青色硬化樹脂61は光が吸収された液面部61-aのみ硬化する。一断層の形成が終了するとエレベータ62は降下し、次の断層の造形を連続的に行う。この作業により、所望の形状の立体モデル63が作成できた。このときSHGレーザ光源は波長430nm、出力10mWとした。

（実施例6）

図6は本発明の一実施例を光ディスク装置に用いた応用例を説明するための図である。光源には図3で説明したSHGレーザ光源100を用いた。光ディスク装置は光磁気記録方式を採用した。SHGレーザ光源100より出射されたSHGレーザ出力33はビームエキスパンダ52で拡大された後、平行光となる。ビームスプリッタ72で一部はねられた光は前方モニタ73に取り込まれる。ビームスプリッタ72を通過したビームは集光光学系74で媒体75に集光され、反射された光はビームスプリッタ72で一部反射された後2つのビームに分離され2つのディテクタ76に各々取り込まれる。前方モニタ73ではSHGレーザ出力33をモニタしてSHGレーザ出力33の制御を行う。また、ビームスプリッタ72後の2

21

つのディテクタ76は各々オートフォーカスと信号検出を行う。媒体75には一定の磁界が印加されており、SHGレーザ出力33を変調させて媒体75のキュリー温度まで焦点の温度を上げて磁化を反転することにより記録を行った。出力ON時には媒体の磁界が反転し、出力OFF時には磁界反転が行われず信号記録が可能となる。なお、記録周波数は10MHzとした。また信号再生時には記録時と同様のSHGレーザ光源100を用い、良好な再生信号を得た。

(実施例7)

図7は本発明の一実施例を説明するための図である。半導体レーザ111から出射された励起ビーム141は集光光学系112により集光され、レーザ結晶121を励起する。半導体レーザ111はSDL (Spectra Diode Lab.) 社製AlGaInP系半導体レーザを用い、出力500mW、発振波長670nmである。また、集光光学系112は半導体レーザコリメータ($f=8\text{mm}$)とアナモルフィックプリズムペア(倍率:6倍)、および単レンズ($f=30\text{mm}$)を用いた。

励起されるレーザ結晶121はレーザ結晶端面に形成された入射側共振器ミラー122と出力ミラー124からなる固体レーザ共振器120で基本波142を発生する。固体レーザ共振器120中にはレーザ結晶121とSHG結晶131と波長制御素子125が配置されている。このとき固体レーザ共振器120は平凹式共振器であり、出力ミラー124の曲率半径は150mm、共振器長は145mmとした。レーザ結晶121にはCr添加量1.5mol%のLiSAF結晶($\phi 3\times 5\text{mm}$)を用いた。結晶の前方端面には励起波長に対して反射率2%以下の無反射(以下単にAR; Anti-Reflection)コーティング、基本波波長に対して反射率99%以上の全反射(以下単にHR; High-Reflection)コーティングを施した。後方端面には基本波波長に対して反射率0.2%以下のARコーティングを施し、入射側共振器ミラー122とした。

22

SHG結晶31は $3 \times 3 \times 5$ mmのLBO結晶をLiSAF結晶121の直後に配置した。LBO結晶の両端面には基本波波長に対して反射率0.2%以下、SH波長に対して反射率1%以下のARコーティングを施した。波長制御素子125には厚さ0.5 mmの1枚の水晶板からなる複屈折結晶を用い、光軸に対してブリュースター角に配置して光軸の回りを回転させることで波長制御し、SHG結晶131であるLBO結晶の変換効率が最大となる波長に調整した。共振器内部においてSHG結晶131により一部SH波143に変換されて出力ミラー124から共振器外部にSH出力として取り出される構造となる。この構造において発振しきい値は図12の波長制御素子がない場合の2倍程度であり、SH出力10 mWが得られた。

なお、本発明における図7中の共振器内部に挿入されたSHG結晶131と波長制御素子125の位置は前後の交代が可能である。LiSAF結晶121の吸収の波長許容幅は約100 nmと広く励起用半導体レーザを温度制御素子などを用いて波長制御しなかったが、最大吸収波長に一致させるため制御しても良い。

(比較例1)

図7と同様なレーザ共振器において、波長制御素子125を厚さ5 mmの1枚の水晶板、SHG結晶131としてKN結晶を用いた。この厚さ5 mmの水晶板の波長制御素子によるレーザ発振波長間隔は12 nmと狭いためにレーザ結晶121であるLiSAF結晶において発振する基本波は波長が12 nm間隔で4～5本、同時に発振してしまった。更に、SHG結晶であるKNは位相整合波長半値幅が0.4 nmと狭く、基本波の波長の一つだけをKN結晶に合わせても、他の波長でもレーザ発振しているため、基本波パワーが分散されるためにSH出力は数nW程度しか得られなかった。

(実施例8)

図8は本発明の他の実施例を説明するための図である。半導体レ

23

ーザ111および集光光学系112からなる励起光学系は実施例7と同様である。励起されたレーザ結晶121はレーザ結晶端面に形成された入射側共振器ミラー122と凹面ミラー126および平面出力ミラー123の3枚の共振器ミラーからなる固体レーザ共振器120で基本波142を発生する。固体レーザ共振器120中には入射側共振器ミラー122と平面出力ミラー123の間にレーザ結晶121とSHG結晶131が、平面出力ミラー123と凹面ミラー126との間に波長制御素子125が配置されている。このとき用いたレーザ結晶121とSHG結晶131の材質、形状およびコーティングは実施例7と同様である。また、波長制御素子125は実施例7と同様のものを用いた。

凹面ミラー126は基本波波長に対して反射率99%以上のHRコーティングを施した。また、平面出力ミラー123には基本波波長に対しては反射率99%以上のHRコーティング、SH波長に対しては透過率85%以上のARコーティングを施した。波長制御素子125を光軸の回りを回転させることで波長制御し、SHG結晶131であるLBO結晶の変換効率が最大となる波長に調整した。共振器内部においてSHG結晶131により一部SH波143に変換されて平面出力ミラー123から共振器外部にSH出力143として取り出される構造となる。この構造においては図7における波長制御素子125でのSH光の損失がないために、SH出力15mWが得られた。

(実施例9)

図9は本発明の他の実施例を説明するための図である。半導体レーザ111および集光光学系112からなる励起光学系は実施例7と同様である。励起されたレーザ結晶121はレーザ結晶端面に形成された入射側共振器ミラー122と出力ミラー124からなる固体レーザ共振器120で基本波142を発生する。このとき用いたレーザ結晶121とSHG結晶131の材質、形状およびコーティ

24

ングは実施例 7 と同様である。出力ミラー 124 は基本波波長に対して反射率 99.9% 以上の HR コーティングを中心波長 860 nm $\pm$ 5 nm で施しているために波長制御素子を用いなくても発振波長の制御が行える。SH 波長に対しては透過率 85% 以上の AR コーティングを施している。図 18 で示したように SHG 結晶 131 である LBO 結晶の位相整合波長の半値幅が 8 nm と広いために特に波長制御しなくても効率よく SH 光が得られる。

本発明において共振器内部の開口を考慮した LiSAF レーザの共振器設計を行うことにより、半導体レーザ励起 LiSAF レーザの効率を大きく改善した。また、LiSAF 結晶の温度制御を行うことにより同レーザの発振消滅現象を回避し、安定なレーザ出力を得る手段を提案した。この LiSAF レーザを用いることにより出力 10 mW クラスの SHG レーザを実現した。本発明により寿命を 2~5 倍に、サイズを 1/50~1/30 に、消費電力を 1/400~1/200 に、大きく改善できた。さらにレーザ応用装置の小型、低消費電力化および長寿命化と信頼性向上を達成した。

本発明では更に、波長可変レーザ、特に LiSAF レーザを用いた内部共振器型 SHG 方式において、波長制御素子の透過波長幅を広げることにより発振しきい値を低減させ、位相整合幅の広い SHG 結晶である LBO 結晶を用いることでレーザ装置としての第 2 高調波発生装置の効率および信頼性向上を実現した。さらに、この第 2 高調波発生装置を光源とすることで応用製品としてレーザプリンタなどの信頼性が向上した。

産業上の利用可能性

以上説明したように、本発明によれば小型で安定性に優れたレーザ共振器、レーザ装置、レーザプリンタ装置等のレーザ応用装置を提供することができる。

25

請 求 の 範 囲

1. Cr を含有するフッ化物からなるレーザ結晶および少なくとも一つの光学部品とからなるレーザ共振器において、前記共振器内部の開口が実質的に前記レーザ結晶からの発光を前記共振器内部で発振してからなる第1のレーザビームの直径の5倍以上であることを特徴とするレーザ共振器。
2. 前記レーザ結晶がCr:LiSrAlF₆ (クロム添加のフッ化リチウムストロンチウムアルミニウム)であることを特徴とする請求項1に記載のレーザ共振器。
3. 前記レーザ結晶を温度制御する手段を有することを特徴とする請求項1又は請求項2に記載のレーザ共振器。
4. 前記レーザ結晶を入出力特性が飽和しない範囲で温度制御するための手段を有することを特徴とする請求項3に記載のレーザ共振器。
5. 前記レーザ結晶の温度Tを $0 \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度制御するための手段を有することを特徴とする請求項3又は請求項4に記載のレーザ共振器。
6. 前記共振器を構成する複数のミラーの少なくとも1つが前記レーザ結晶の一端面に形成されていることを特徴とする請求項1乃至請求項5のいずれかに記載のレーザ共振器。
7. 前記光学部品のうち少なくとも一つの部品が波長制御素子であることを特徴とする請求項1乃至請求項6のいずれかに記載のレーザ共振器。
8. 前記固体レーザ結晶の発振波長を制御するための前記制御素子としてブリュースタ角に傾けた複屈折結晶を用いることを特徴とする請求項7に記載のレーザ共振器。
9. 前記複屈折結晶に水晶(SiO₂)、LiNbO₃、LiTaO₃、液晶板の何れか1種以上を用いることを特徴とする請求項8に記載



のレーザ共振器。

10. 前記複屈折結晶が厚さ0.5mm以下の1枚の水晶板を用いることを特徴とする請求項9に記載のレーザ共振器。

11. 前記光学部品が波長制御素子と非線形光学結晶を含むことを特徴とする請求項1乃至請求項10のいずれかに記載のレーザ共振器。

12. 前記第1のレーザビームの少なくとも一部が前記非線形光学結晶を通過することで第1のレーザビームとは波長の異なる第2のレーザビームに変換されることを特徴とする請求項11に記載のレーザ共振器。

13. 前記非線形光学結晶が LiB_3O_5 （三ほう酸リチウム）、 CsLiB_3O_5 （三ほう酸セシウムリチウム）、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ （ほう酸バリウム）、 KNbO_3 （ニオブ酸カリウム）、 KTaO_3 （タンタル酸カリウム）、 K-Li-Nb-O （ニオブ酸リチウム-カリウム）、 K-Ta-Nb-O （ニオブ酸、タンタル酸-カリウム）、または LiIO_3 （ヨウ酸リチウム）のうちの少なくとも一つであることを特徴とする請求項11又は請求項12に記載のレーザ共振器。

14. 前記レーザ結晶と非線形光学結晶を同時に又は単独に温度制御する手段を有することを特徴とする請求項11乃至請求項13のいずれかに記載のレーザ共振器。

15. 請求項1乃至請求項14のいずれかに記載のレーザ共振器と、前記レーザ結晶を励起するための手段とを含むことを特徴とするレーザ装置。

16. 前記レーザ結晶を励起するための手段が半導体レーザであることを特徴とする請求項15に記載のレーザ装置。

17. Cr:LiSrAlF_6 からなるレーザ結晶と、前記レーザ結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザ結晶を励起するための半導体レーザと、前記レーザ結晶からの発光が前記レーザ共振器において発振してからなる波長 λ 、



が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000 \text{ nm}$ の第1のレーザビームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザビームの直径の5倍以上の開口を有する波長制御素子とからなることを特徴とする請求項15又は16に記載のレーザ装置。

18. Cr:LiSrAlF₆からなるレーザ結晶と、前記レーザ結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザ結晶を励起するための半導体レーザと、前記レーザ結晶の温度Tを $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$ の範囲で温度制御するための手段と、前記レーザ結晶からの発光が前記レーザ共振器において発振してからなる波長 λ_1 が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000 \text{ nm}$ の第1のレーザビームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザビームの直径の5倍以上の開口を有する波長制御素子とからなることを特徴とする請求項15又は16に記載のレーザ装置。

19. Cr:LiSrAlF₆からなるレーザ結晶と、前記レーザ結晶の一端面に少なくとも1つの共振器ミラーを形成してなる共振器構造と、前記レーザ結晶を励起するための半導体レーザと、前記レーザ結晶からの発光が前記レーザ共振器において発振してからなる波長 λ_1 が $780 \leq \lambda_1 \leq 1000 \text{ nm}$ の第1のレーザビームと、前記共振器内部に挿入された前記第1のレーザビーム直径の5倍以上の開口を有する非線形光学結晶と、波長制御素子と、前記非線形光学結晶と、前記レーザ結晶と非線形光学結晶を同時にまたは各々単独に温度制御する手段と、第1のレーザビームの一部から異なる波長に変換された第2のレーザビームを取り出す手段を有することを特徴とする請求項15又は16に記載のレーザ装置。

20. 請求項15乃至請求項19のいずれかに記載のレーザ装置を用いたことを特徴とするレーザ応用装置。

21. 前記レーザ応用装置がレーザプリンタ装置であることを特徴とする請求項20に記載のレーザ応用装置。

22. 前記レーザ応用装置が光造形装置であることを特徴とする請



28

求項20に記載のレーザ応用装置。

23. 前記レーザ応用装置が光ディスク装置であることを特徴とする請求項20に記載のレーザ応用装置。

24. 前記レーザ応用装置がパーティクルカウンター装置であることを特徴とする請求項20に記載のレーザ応用装置。

25. 前記レーザ応用装置がDNAシーケンサー装置であることを特徴とする請求項20に記載のレーザ応用装置。

26. Cr(クロム)を含有するフッ化物からなるレーザ結晶からの発光をレーザ共振器において発振させて第1のレーザビームを得るレーザ発振方法において、前記第1のレーザビームの直径の実質的に5倍以上の直径の開口部を有する共振器中で、共振させることを特徴とするレーザ発振方法。



1/12

図 1

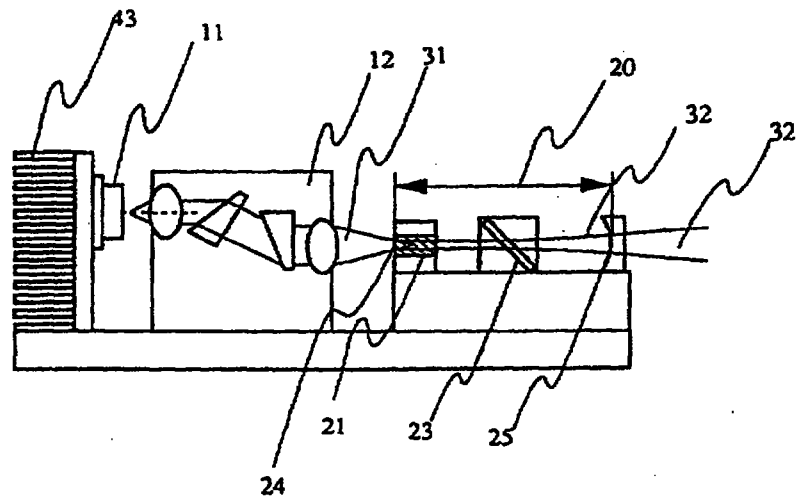
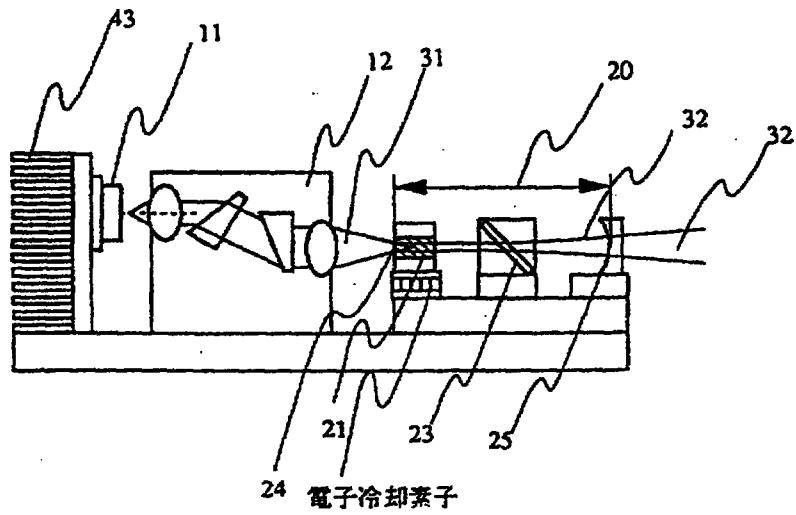


図 2



2/12

図 3

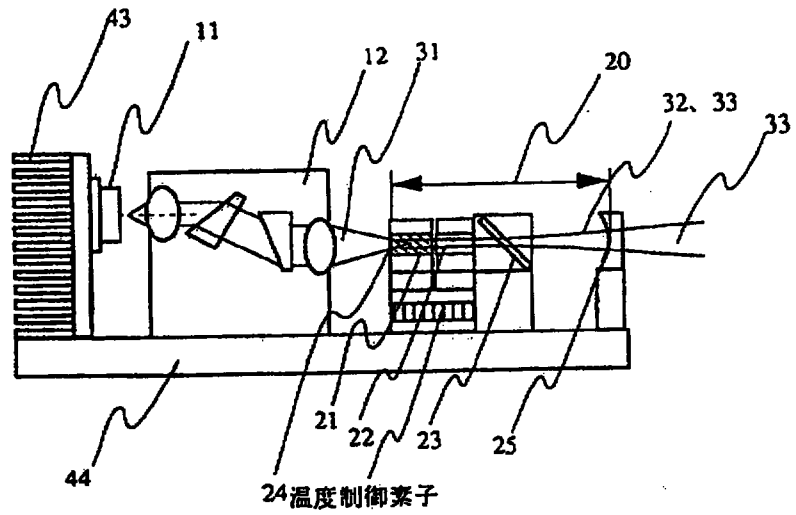
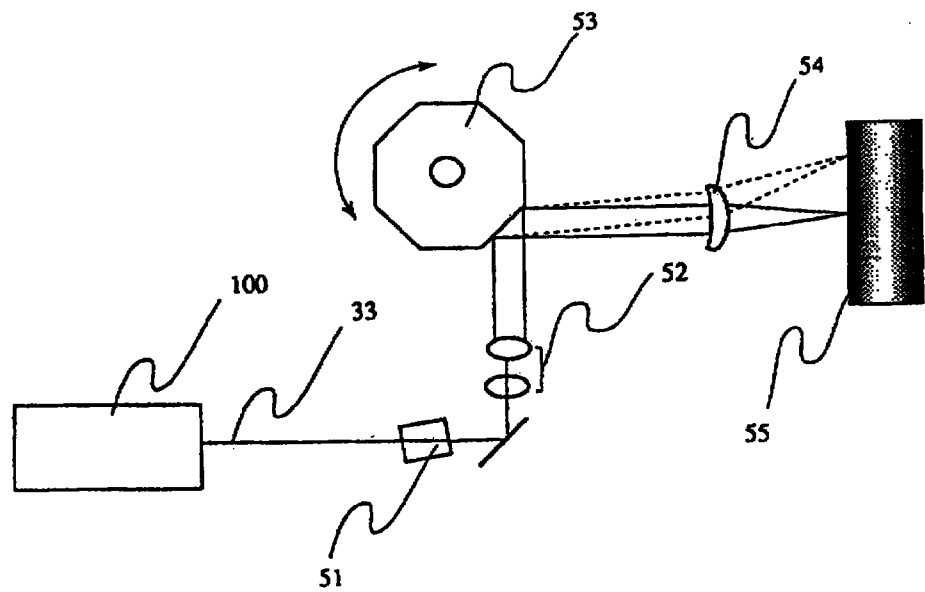
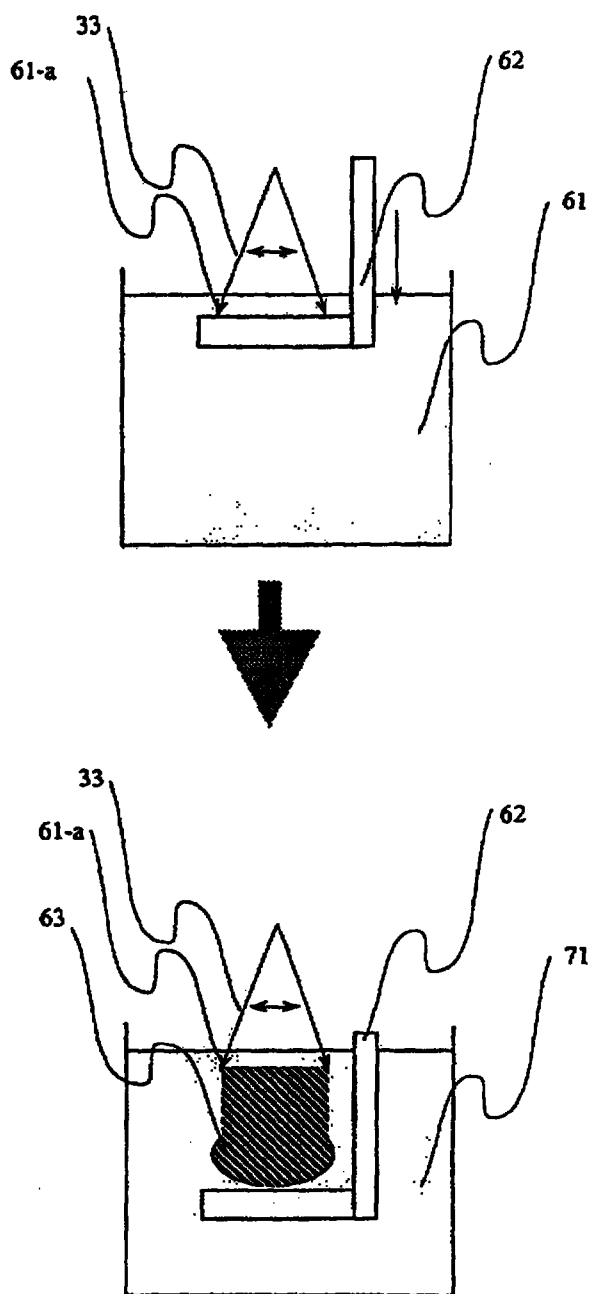


図 4



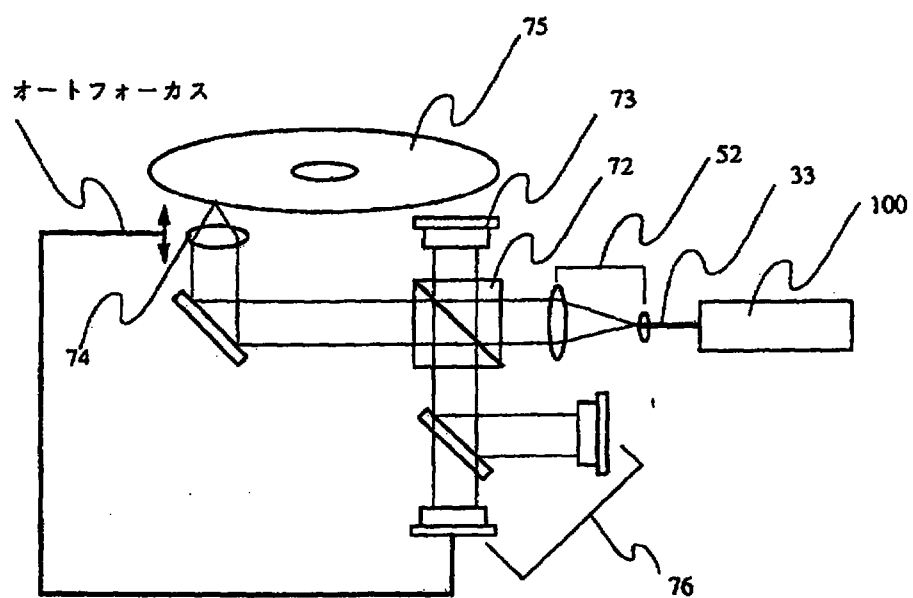
3/12

図 5



4/12

図 6



5/12

図 7

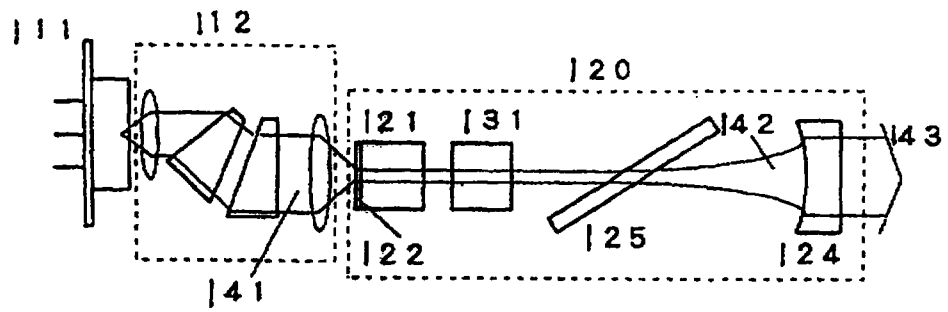


図 8

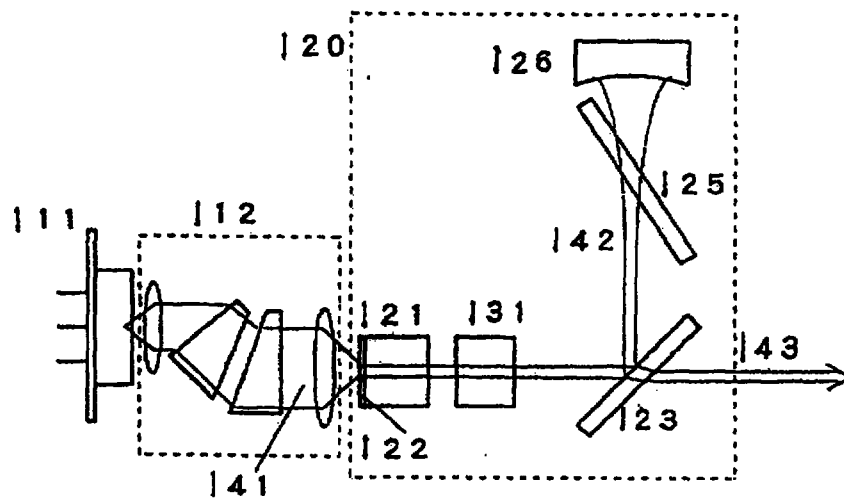
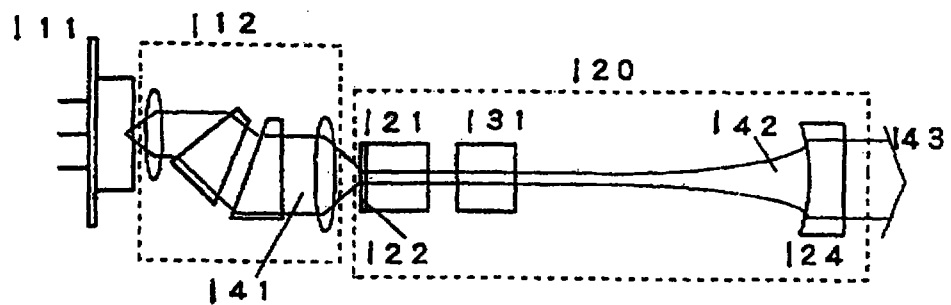
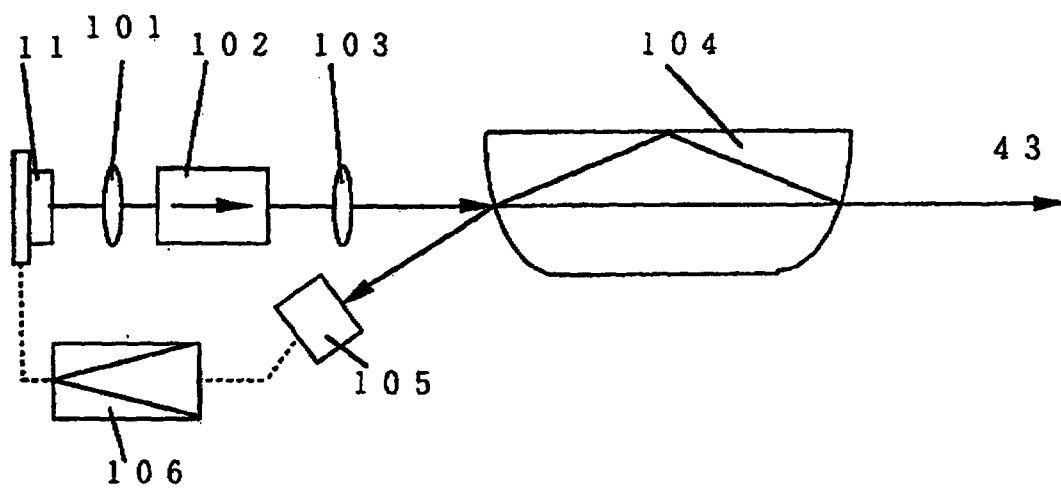


図 9



6/12

10



7/12

図 1 1

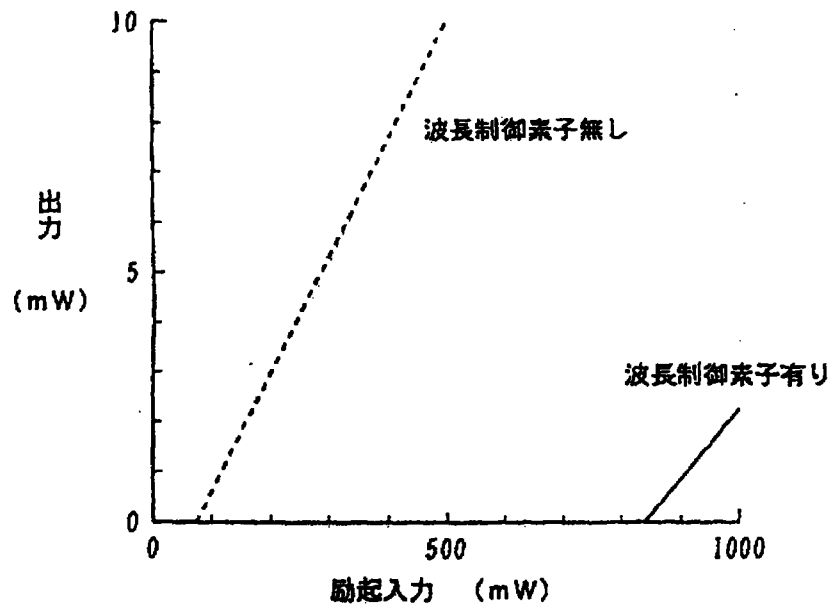
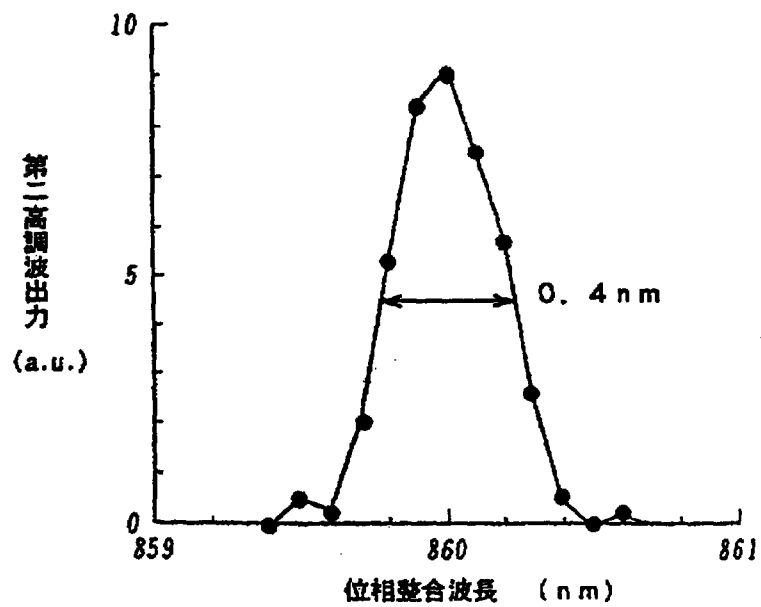
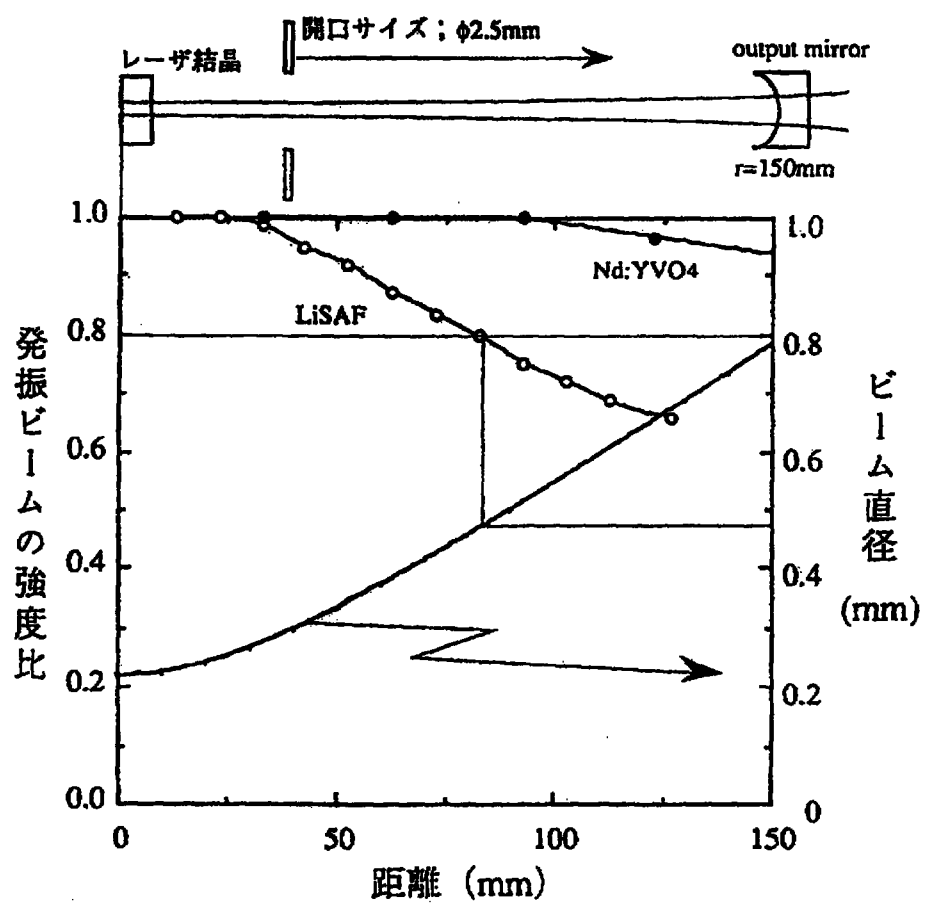


図 1 2



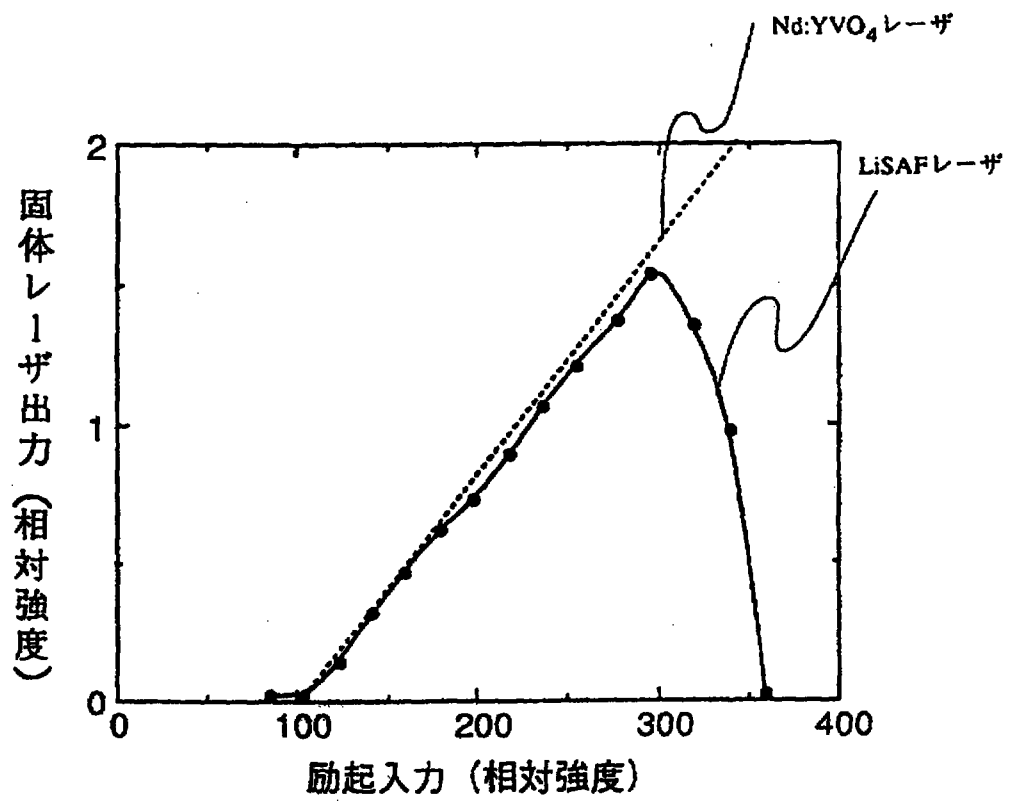
8/12

図13



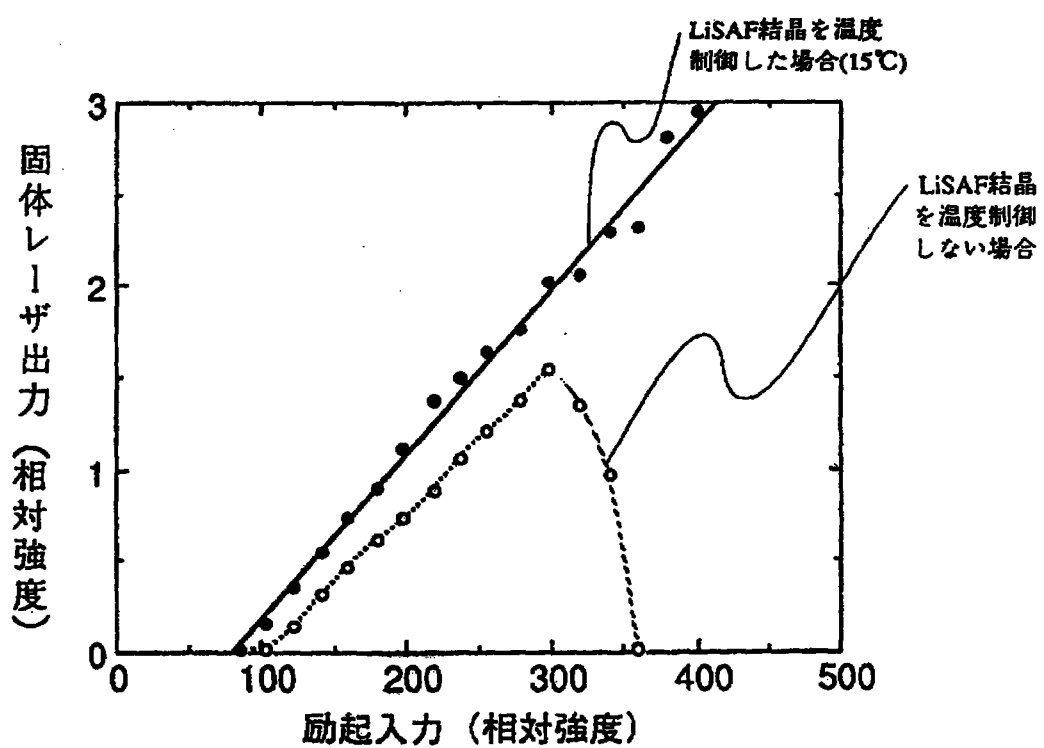
9/12

図 1 4



10/12

図 15



11/12

図 16

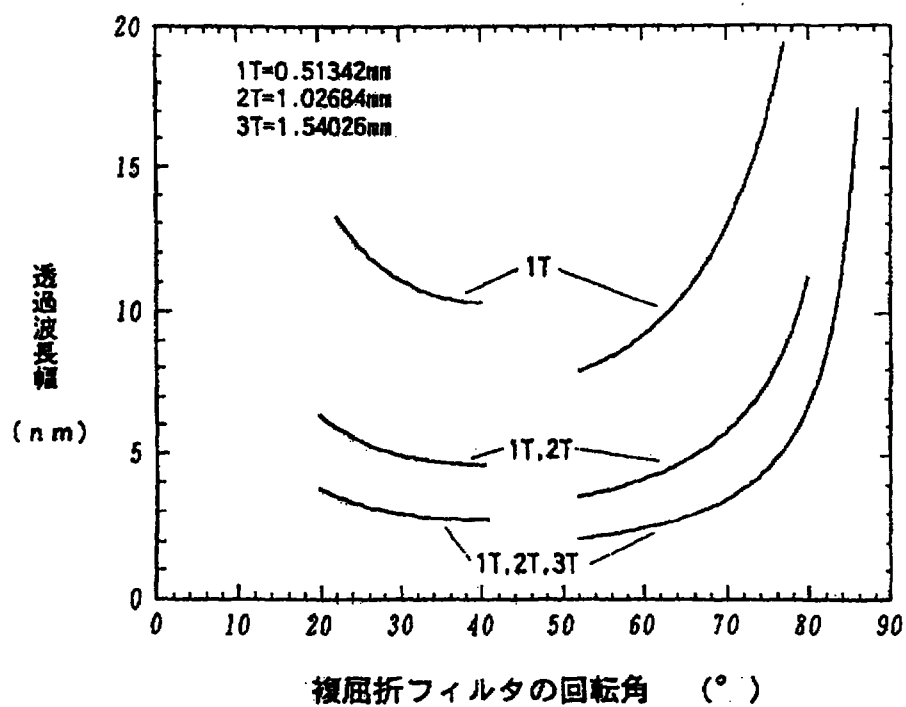
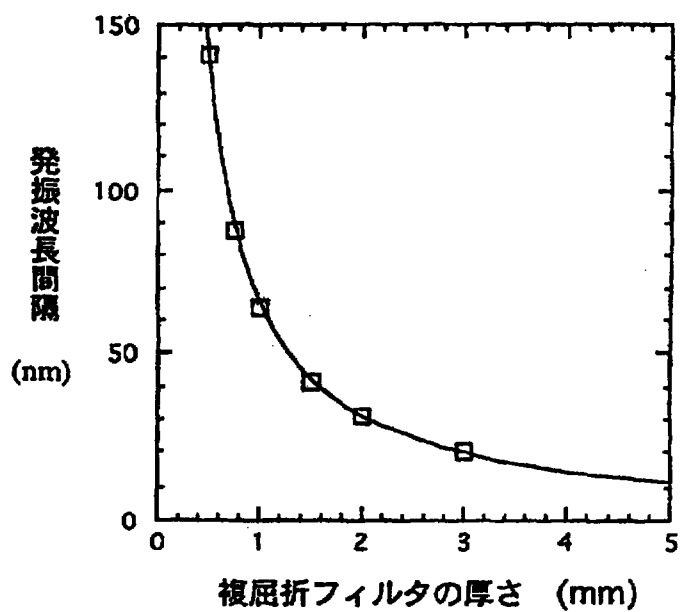
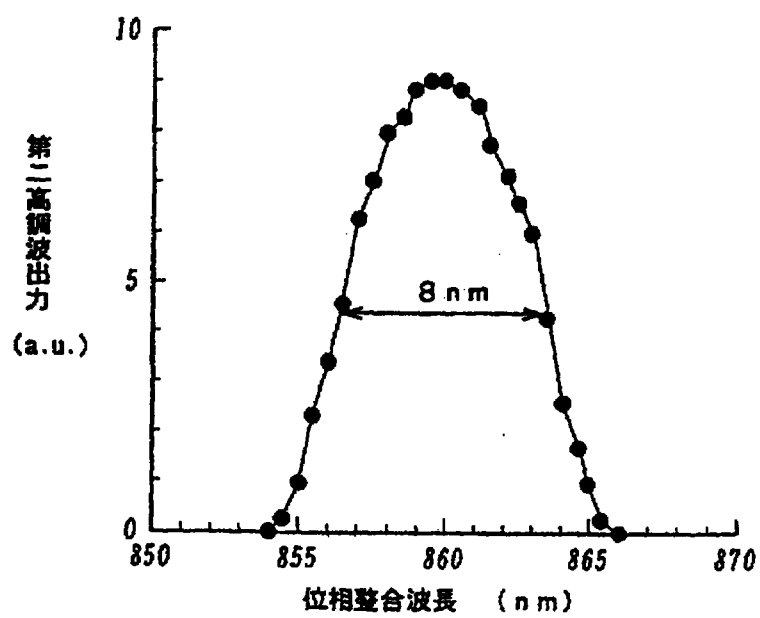


図 17



12/12

図 18



DESCRIPTION

LASER RESONATOR, LASER, LASER APPLIED UNIT, LASER OSCILLATION METHOD

Technical Field

This invention relates to an optoelectronic field and, more specifically, to a laser resonator, a laser, a laser applied unit and a laser oscillation method for use in laser printers, optical shaping units, optical disk drives, DNA sequencers, particle counters and the like.

Background Art

With the progress of the advanced information communication age, demand for adaptation of computer peripheral laser applied units, such as optical disk drives and laser printers, to short wavelengths is arising to meet requirements for improved recording density and high-speed printing. However, as light sources capable of providing a blue color range (wavelength of 400 to 480 nm) which is in high demand for commercialization, only gas lasers such as He-Cd (helium-cadmium) and Ar (argon) lasers are available which are bulky and power consuming. Since lasers are bulky, laser applied units which incorporate a laser as a light source need to be larger than the laser and hence, become bulky. Therefore, there is the problem that such laser applied units cannot be fit in office environment and living environment in which desk top sized units are the

most fit.

Further, there is another problem that a laser applied unit becomes bulky because the conversion efficiency of a laser from input power to laser beams is small and a cooling means is required as most of consumption power turns into heat. There is still another problem that the dislocation of optics caused by the vibration of this cooling means deteriorates the reliability of a laser applied unit. A further problem is that the service life of a laser applied unit is short due to a short service life of a laser caused by gas deterioration or the like.

An attempt has been made to overcome the above problems of a gas laser by applying a wavelength conversion technology such as second harmonic generation (to be abbreviated as "SHG" hereinafter) which is caused by inserting a non-linear optical crystal into the resonator of a solid laser to convert a first laser beam (to be referred to as "fundamental wave" hereinafter in some cases), an oscillation wave of the solid laser, into a wave having half the wavelength of the first laser beam so as to generate a second laser beam. For instance, there has been proposed an SHG system for a solid laser in which $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ (Ti-Sapphire; to be abbreviated as "Ti-Sap" hereinafter) or Cr:LiSrAlF_6 (chromium added lithium strontium aluminum fluoride; to be abbreviated as "LiSAF" hereinafter) are used as laser crystals capable of oscillating at a wavelength range of 800 to 900 nm. In the SHG light source, the service life of a

laser medium alone has been greatly improved by changing from gas to a solid crystal. However, the excitation light source of the latter LiSAF laser is a Kr (krypton) laser, that is, a gas laser, and hence, there still remain the problems of the prior art. As the excitation light source of a Ti-Sap laser, a green SHG laser which uses a Q switch Nd:YAG (neodymium added yttrium aluminum garnet) laser to generate a fundamental wave is used. Therefore, since the entire laser light source is solidified, its service life is improved. However, since two SHG lasers including the excitation light source are used, the unit becomes complex, bulky and power consuming and hence, does not greatly improve the problems of the prior art. Further, since SHG output is a pulse output in both cases, when it is used in laser applied units such as optical shaping units and optical disk drives, there is the problem that a disconnection point exists in a signal, for example.

It has already been disclosed in R. Scheps, J.F. Myers, H.B. Serreze, A. Rosenberg, R.C. Morris, and M. Long, "Diode-pumped Cr:LiSrAlF₆ laser", Opt. Lett., Vol.16 No.11, p.820 (1991) that excitation is possible with a red semiconductor laser having a wavelength of 670 nm as the excitation light source of the above LiSAF laser. Therefore, it is presumed that there is the possibility of greatly improving the size, power consumption and service life problems of the prior art gas lasers by replacing a Kr laser with a semiconductor laser as an excitation light

source in the SHG light source which uses the above LiSAF laser to generate a fundamental wave.

However, it is disclosed in Qi Zhang, G.J. Dixon, B.H. Chai and P.N. Ke an, "Electronically tuned diode-laser-pumped Cr:LiSrAlF₆ laser", Opt. Lett., Vol.17, No.1, p.43 (1992) that a loss in a resonator greatly reduces the efficiency of a LiSAF laser. For this reason, the possibility of implementation is extremely low unless the cause of reducing the efficiency is investigated and studied to find a solution.

Qi Zhang et al. as mentioned in the foregoing took from the resonator of a LiSAF laser a birefringence filter which is a wavelength tuning element for selecting the wavelength of the LiSAF laser. Generally speaking, a birefringence filter is arranged in a laser resonator of a laser capable of wavelength tuning, such as a LiSAF laser or the like, and has the function of selecting a laser beam having a desired wavelength by providing a loss such as a reflection loss to oscillation beams having wavelengths other than the desired wavelength out of all the oscillation beams. Then Qi Zhang et al. added a resonator dedicated for wavelength tuning including a birefringence filter after the resonator of a LiSAF laser. That is, they proposed means of tuning wavelength without providing a loss caused by the resonator of the LiSAF laser, by feeding back a laser beam having a desired wavelength to the resonator of the LiSAF laser and amplifying the laser beam (USP 5218610). The loss which Qi

Zhang et al. paid attention to is a reflection loss caused by the birefringence filter. Although this system can improve the above loss, it has the possibility that the apparatus may be complex and bulky.

Another attempt has been made to overcome the problems of the prior art, paying attention to the fact that nonuniform energy absorption of a LiSAF crystal as a laser crystal has an effect on a reduction in laser oscillation efficiency. That is, Cr which plays a part in absorption is distributed in different concentrations in an excitation direction to improve a reduction in the efficiency (USP 5287373). However, this system has not been commercially available yet and its effect of improving the problems indicated by Qi Zhang et al. is unknown.

In the optics shown by F. Balembois et al. as described above, an average pulse SHG laser output of 7.4 mW is obtained using a Kr laser as an excitation light source and an average pulse excitation power of 3.3 W. However, as described above, an SHG laser output should be a continuous wave. A required output is considered to be about 10 mW though it differs by each unit. Commercial semiconductor lasers capable of exciting LiSAF lasers have the maximum output of 500 mW in the case of a single stripe. Since output of a fundamental wave is generally in proportion to excitation input in the input/output characteristics of a solid laser, the power of the fundamental wave becomes about 1/6 by changing the excitation light source from a Kr laser

to a semiconductor laser. Further, since an SHG output is in proportion to the square of the power of the fundamental wave, an anticipated SHG output becomes about 1/36, that is, a pulse output of 0.2 mW. Therefore, it is understood that a practically usable SHG output cannot be obtained without great improvement made on the efficiency. Since the shape, that is, transverse mode, of the output beam of a semiconductor laser is extremely flat, compared with that of a Kr laser, deterioration in excitation efficiency is expected even when a beam shaping technique is applied. Therefore, a further reduction in SHG output is anticipated.

In other words, it is easily anticipated that an SHG laser light source having a practically sufficient output cannot be realized simply by changing the excitation light source from a Kr laser to a semiconductor laser. Further, if a semiconductor laser having a high output is realized in the future, forced cooling means is required because the amount of heat generated from the semiconductor laser itself increases. As the result, there is the possibility that the apparatus will be bulky and power consuming.

As described above, it has been found difficult to realize an SHG laser which makes use of a LiSAF laser excited by a semiconductor laser to solve all the problems of a gas laser simply by combining what have been disclosed heretofore. Therefore, it is now necessary to realize a small-sized, power-saving SHG laser light source and a laser applied unit using such an SHG laser light source by finding

the cause of reducing the efficiency and taking countermeasures.

There is also proposed a method for obtaining a blue laser beam as a second oscillation wave, that is, an SH wave, from an SHG light source having the same output wavelength as that of the afore-mentioned gas laser, wherein the output of a near infrared semiconductor laser shown in Fig. 10 is taken as a first oscillation wave, that is, a fundamental wave, and resonated in an external resonator, and KN (KNbO_3 : potassium niobate) which is a nonlinear optical crystal (to be referred to as "SHG crystal" because wavelength conversions hereinafter are all for SHG) is arranged in the external resonator to obtain the blue laser beam (W.J. Kozlovsky and W. Lenth, "Generation of 41 mW of blue radiation by frequency doubling of a GaAlAs diode laser", Appl. Phys. Lett., Vol.56 No.23, p.2291, 1990).

However, the above SHG light source involves the following advanced technical problems. One of them is that it is necessary to insert an optical isolator 102 to protect the semiconductor laser from reflected light in order to always adjust the oscillation wavelength of the semiconductor laser which is easily affected by disturbance to a wavelength at which the conversion efficiency of KN becomes maximal. Another problem is that reflected light from the resonator should be received by an optical detector 105 to control the length of the external resonator including KN in the order of the wavelength of the

fundamental wave and the electrical output of the optical detector 105 is fed back to a feedback circuit 106 to stably oscillate the semiconductor laser. Therefore, it is expected to be difficult to find solutions to these technical problems for commercialization. In this SHG light source, it is expected to be difficult to solve the above two technical problems for commercialization that the oscillation wavelength of the semiconductor laser easily affected by disturbance is controlled to a wavelength at which the conversion efficiency of KN becomes maximal and that the length of the external resonator including KN is controlled in the order of the wavelength of the fundamental wave.

The inventors of the present invention have found that it is possible to use the above LiSAF laser as a broad-band wavelength variable laser by using a wavelength control element, studied a method for causing a nonlinear crystal to generate SHG light having a blue color range as a second oscillation wave, using this LiSAF laser to generate a first oscillation wave (fundamental wave), and found two problems.

The first problem is that the oscillation threshold value becomes high because wavelength ranges other than the transmission wavelength range of the wavelength control element become a loss in the laser resonator and the output of the excitation semiconductor laser becomes high to obtain a required SHG laser output. Fig. 11 shows the input/output characteristics of a semiconductor laser excited wavelength

variable solid laser (to be abbreviated as "LiSAF laser" hereinafter) which uses a LiSAF crystal. The solid line indicates the input/output characteristics of the LiSAF laser when there exists a wavelength control element and the dotted line indicates the input/output characteristics when there is no wavelength control element. The wavelength control element is formed of three quartz plates having different thicknesses as used in dye lasers and Ti sapphire lasers, can narrow the range of wavelength transmitting the quartz plates to 3 nm or less, and can control the laser oscillation wavelength width to 0.1 nm or less. It is understood from Fig. 11 that a loss in the resonator increases and the oscillation threshold value becomes 10 times or more by inserting a wavelength control element having a narrow transmission wavelength range, and hence, a large-sized semiconductor laser is necessary because an excitation input 10 times or more is required to obtain the same output as that when the wavelength control element is not inserted, resulting in a large apparatus for driving and cooling the semiconductor laser and large power consumption. When the wavelength control element is not inserted, the oscillation wavelength width is about 10 nm which is 100 times or more when the wavelength control element is inserted.

The second problem is that a loss in the resonator becomes large and the oscillation threshold value becomes high since a nonlinear KN crystal which has been used

heretofore to obtain blue SHG light has a narrow phase match wavelength half-value width, that is, phase wavelength width at which a SHG wave is generated, of 0.4 nm as shown in Fig. 12, and a high propagation loss of 0.5 %/cm, thereby making it impossible to obtain a sufficient SH output even when the KN crystal is inserted into the LiSAF laser.

There is still another problem that a stable SH output cannot be obtained unless the temperature of the KN crystal is controlled accurately because the wavelength of the KN crystal at which the conversion efficiency becomes maximal changes by 0.3 nm/°C, depending on temperature variations.

Disclosure of the Invention

The inventors have studied the loss in the resonator and found that the loss is connected with the size of the opening of an optical part somehow. The term "opening" means the effective cross section of the optical surface of the optical part in the resonator. That is, it is considered that there is no problem if the opening of the optical part in a regular laser is larger than the diameter of a laser beam. However, the inventors have found that a loss is generated in a LiSAF laser which is a new laser even when the opening of an optical part is normal in size and accomplish the present invention. That is, the present invention is a laser resonator including a laser crystal made of a fluoride containing Cr and at least one optical part, in which an opening in the resonator is substantially 5 times or more the diameter of a first laser beam which is

obtained by oscillating radiation from the laser crystal.

Fig. 13 is a diagram for explaining such a phenomenon that oscillation efficiency is reduced by openings in the resonators of an Nd:YVO₄ (neodymium-added vanadium yttrium oxide) laser as a typical solid laser and a LiSAF laser. The shape of the resonator used in experiments is shown on an upper part of Fig. 13.

The resonator includes a plane mirror formed on an end surface of the laser crystal and a concave mirror. The diameter of an oscillation beam is determined by the curvature radii of these mirrors forming the resonator and the distance between the mirrors. In the plane-concave type resonator shown on an upper part of Fig. 13, the diameter of the beam is minimal at the plane mirror and maximal at the concave mirror. At this point, the curvature radius of the concave mirror is 150 mm, and the effective optical path between the resonator mirrors is slightly shorter than the curvature radius of the mirror. The axis of abscissas of Fig. 13 indicates the distance from the plane mirror and the axis of ordinates on right side indicates the diameter of a beam. The diameter of a beam in the resonator can be calculated from the minimum diameter of a beam obtained from the following expression 1 and the diameter of a beam at each location obtained from the following expression 2 when the transverse mode is TEM₀₀ mode, that is, a round beam.

$$w_0 = \left[\left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{d(R_1 - d)(R_2 - d)(R_1 + R_2 - d)}{(R_1 + R_2 - 2d)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{expression 1}$$

$$w(z) = \left[w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{expression 2}$$

In the expression 1, w_0 is the minimum diameter of a beam, λ is the wavelength of a first beam, d is the length of the resonator, and R_1 and R_2 are the curvature radii of the mirrors. In the expression 2, $w(z)$ is the diameter of a beam at a distance z from a position where the diameter of the beam is minimal. The diameter of the beam calculated is about 0.2 mm at the minimum and about 0.8 mm at the maximum. When the diameter of the beam right after the output mirror was measured actually, the calculated value was almost equal to the actual value. An opening having a diameter of 2.5 mm was formed in the resonator and adjusted so that the strength of an oscillation beam became maximal and the actual strength of the oscillation beam was measured.

The axis of ordinates on left side indicates the ratio of oscillation beam strength when an opening is formed to oscillation beam strength when no opening is formed. It was found that, in an Nd:YVO₄ laser, oscillation is possible with an efficiency of 90 % or more when the opening in the resonator is 3 times the diameter of a beam, that is, when the diameter of a beam becomes the maximum of 0.8 mm,

whereas, in a LiSAF laser, the efficiency is reduced to 80 % by setting the opening in the resonator to 5 times or less the diameter of a beam.

The reduction rate of the efficiency of the LiSAF laser is larger than that of the Nd:YVO₄ laser. To obtain the same efficiency of 90 % or more as that of the Nd:YVO₄ laser, the opening is preferably 7 times or more the diameter of a beam. Further, since an efficiency reduction is not seen when the opening is 10 times or more the diameter of a beam, this range is particularly preferred.

Generally speaking, the diameter of a beam is defined as a diameter within the peak strength range of $1/e^2$ or more when the transverse mode is a round TEM₀₀ mode and light intensity shows a Gaussian distribution. Further, when the transverse mode of the beam is other than TEM₀₀, the diameter of a beam is defined as the maximum length connecting the most outer end of the boundary line where light intensity becomes $1/e^2$ or less of its peak. What has been described above defines the lower limit of the opening. The upper limit of the opening is specified by the maximum size of a possibly grown crystal, the size of a crystal processable stably, and the size of a crystal for securing the quality of coating. It is preferred that the upper limit is 1,000 times the diameter of a beam.

Then the inventors have found that a saturation phenomenon exists in the input/output characteristics of a LiSAF laser.

Fig. 14 is a diagram for explaining the comparison of input/output characteristics between a LiSAF laser and a Nd:YVO₄ laser, a typical solid laser. The solid line indicates the input/output characteristics of the LiSAF laser and the dotted line indicates the input/output characteristics of the general solid laser. In the Nd:YVO₄ laser, the input/output characteristics rise at an input value as shown by the dotted line and then excitation input and solid laser output are almost proportional to each other. On the other hand, in the LiSAF laser, as shown by the solid line, there is seen such a phenomenon that an output characteristic reaches saturation after a linear range and oscillation is finally lost even when excitation input increases. As the result, it is found that there is the problem that a stable solid laser output cannot be obtained. The inventors have conducted intensive studies and have found that the above saturation phenomenon and the above oscillation lost phenomenon that are seen in the input/output characteristics of the LiSAF laser as shown in Fig. 14 can be eliminated by controlling the temperature of a laser crystal made of LiSAF. The present invention has been predicated upon this finding.

Fig. 15 is a diagram for explaining the comparison of input/output characteristics of a LiSAF laser when the temperature of a LiSAF crystal is controlled and when the temperature is not controlled. The solid line indicates the input/output characteristics of the laser when the

temperature of the LiSAF crystal is controlled to $15 \pm 5^\circ\text{C}$ and the dotted line indicates the input/output characteristics when the temperature is not controlled. It is seen in Fig. 15 that the linear area is expended by controlling the temperature of the laser crystal and a stable solid laser output can be obtained. Fig. 15 shows the input/output characteristics when the temperature of the LiSAF crystal is set to 15°C . The input/output characteristics obtained by changing the crystal temperature to 10, 20, 30 and 40°C were measured. In either case, the linear area of the input/output characteristics was expanded and a stable solid laser output was obtained. In other words, the lower limit of the temperature control range is a temperature at which the laser crystal is free from dew condensation. The upper limit of the temperature control range is a temperature at which the above oscillation lost phenomenon is not observed under use conditions. It is desired that the temperature T of the laser crystal is controlled in a range of $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$.

Preferably, at least one of a plurality of mirrors constituting the resonator is formed on one end surface of the laser crystal.

Preferably, at least one of the optical parts is a wavelength control element.

Preferably, a laser comprises a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser

crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000$ nm, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, and an opening having a diameter 5 times or more that of the first laser beam which is formed into the resonator.

Further preferably, a laser comprises a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, means for controlling the temperature T of the laser crystal in a range of $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000$ nm, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, and a wavelength control element having an opening with a diameter 5 times or more that of the first laser beam and formed in the resonator.

Preferably, the optical parts include a wavelength control element and a nonlinear optical crystal.

Further, a birefringence crystal inclined at the Brewster angle may be used as a control element for controlling the oscillation wavelength of a solid laser crystal and any one of quartz (SiO_2), LiNbO_3 and LiTaO_3 may be used as the birefringence crystal.

Preferably, a single quartz plate having a thickness of 0.4 to 3 mm may be used as the birefringence crystal.

Further, LBO (LiB_3O_5) and/or BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) may be used as the nonlinear crystal.

The control element for controlling the oscillation wavelength of the solid laser crystal is preferably a resonator mirror for resonating the first radiation and the wavelength width of the first oscillation wave for which the resonator mirror has a reflectance of 99.9 % or more is preferably 10 nm or less with respect to the central wavelength.

Preferably, the resonator structure is constituted by at least two mirrors, or, at least one of the mirrors constituting the resonator structure has a second harmonic transmittance of 60 % or more.

The inventors have conducted studies on the transmission wavelength width of a birefringence crystal as a wavelength control element which causes a high oscillation threshold value when the birefringence crystal is used as a control element for controlling the oscillation wavelength of a solid laser crystal. Generally speaking, the oscillation characteristics of a laser resonator depend on a loss in the resonator. When the loss is high, the threshold value until oscillation is obtained becomes high. When the transmission wavelength width of the wavelength control element is narrow, there is a loss in the resonator, resulting in a high oscillation threshold value. Fig. 16 shows the calculation of a transmission wavelength width based on the number of quartz plates of the birefringence

crystal inclined at the Brewster angle. It is understood from Fig. 16 that the transmission wavelength width is narrowed by increasing the number of quartz plates of the birefringence crystal, that is, the thickness of the birefringence crystal. Thereby it is revealed that the wavelength control element has the effect that transmission wavelength width can be expanded and the oscillation threshold value can be lowered by reducing the number of quartz plates of the birefringence crystal, that is, the thickness of the birefringence crystal.

LiNbO_3 , LiTaO_3 or other birefringence crystal may be used as the birefringence crystal.

Further, Fig. 17 shows laser oscillation wavelength interval with respect to the thickness of the birefringence crystal when the birefringence crystal is formed of a single quartz plate. The term "laser oscillation wavelength interval" denotes the interval between the wavelengths of simultaneous laser oscillations, that depends on the gain characteristic of a laser medium for each wavelength. Since, when the gain characteristic is wide, the wavelength range of possible laser oscillations is wide, laser oscillations occur at the same time according to the transmission wavelength interval of the wavelength control element. It is seen from Fig. 17 that the interval between the wavelengths of laser oscillations is narrow when the thickness of the birefringence filter increases. This is because, when the thickness is large, the interval between

the adjacent wavelengths of possible laser oscillations is narrow and a laser which can oscillate at a broad bandwidth, such as a LiSAF laser, may oscillate at two or more oscillation wavelengths. Since a general laser mirror has a reflection bandwidth of 50 nm, an oscillation wavelength interval of 25 nm or more, about half the above reflection bandwidth is required to suppress two or more simultaneous oscillations. Therefore, the thickness of the birefringence crystal needs to be 3 mm or less according to Fig. 17. Since wavelength control becomes difficult when the thickness of the crystal is too small and the oscillation wavelength width of a LiSAF laser is about 20 nm, the thickness of the crystal needs to be 0.4 mm or more according to Fig. 17. Therefore, when the thickness of the birefringence crystal is in the range of 0.4 to 3 mm, the oscillation threshold value can be further reduced.

As described above, the oscillation threshold value can be reduced by using a birefringence crystal. However, since the oscillation wavelength width is broadened by expanding the transmission wavelength width, it is larger than the phase match half-value width of a SHG crystal, thereby making it difficult to cause SHG efficiently. The inventors have found it possible to further increase efficiency by using an LBO (LiB_3O_5), BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) or CLBO ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) crystal having a relatively wide phase match half value width. Fig. 18 shows the phase match wavelength half value width of the LBO crystal. Since the crystal has a width

about 20 times that of a KN crystal, an SH output that satisfies the phase match width of the LBO crystal can be obtained by setting the transmission wavelength width of a wavelength control element which is formed of a single 0.5 mm thick quartz plate as a birefringence crystal to 10 nm and by inclining the wavelength control element at the Brewster angle to eliminate a loss in the resonator. Since a change in the phase match width of the LBO crystal by temperature variations is small at 0.1 nm/°C, it is not necessary to control the temperature of the LBO crystal. Further, since the propagation loss of the LBO crystal is small at 0.1 %/cm, it rarely becomes a loss in the resonator. The same effect as that of the LBO crystal can be obtained by using a BBO crystal or a CLBO crystal. However, it is obvious that a further stable output can also be obtained by controlling the temperature of an SH crystal.

Moreover, this is also possible by using what has a wavelength width of 10 nm or less with respect to the central wavelength, for which a resonator mirror has a reflectance of 99.9 % or more, without using a birefringence crystal as a control element for controlling the oscillation wavelength of a solid laser crystal. When the resonator structure constituting a laser resonator is constructed by at least two mirrors, SH light can be taken outside the resonator efficiently by setting a second oscillation wavelength, that is, SHG transmittance of at least one of the mirrors constituting the resonator structure to 60 % or

more.

Preferably, a laser comprises a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000 \text{ nm}$, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, a nonlinear optical crystal having an opening with a diameter 5 times or more that of the first laser beam and inserted into the resonator, a wavelength control element, means for controlling the temperature of the nonlinear optical crystal and the temperatures of the laser crystal and the nonlinear optical crystal simultaneously or individually, and means for taking out a second laser beam having a wavelength different from that of the first laser beam and converted from part of the first laser beam.

Preferably, the nonlinear optical crystal is selected from LiB_3O_5 (lithium triborate), $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ (caesium lithium borate), $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (barium borate), KNbO_3 (potassium niobate), KTaO_3 (potassium tantalate), K-Li-Nb-O (lithium-potassium niobate), K-Ta-Nb-O (niobic acid, tantalic acid-potassium) and LiIO_3 (lithium iodate).

When a laser resonator or a laser according to the present invention is used in a laser printer, an optical shaping unit, an optical disk drive, a particle counter, a DNA sequencer and the like, a small-sized apparatus having

excellent stability can be provided.

Other objects and advantages of the present invention will become more apparent from the following description with reference to the accompanying drawings.

Brief Description of Drawings

Fig. 1 is a diagram for explaining an embodiment of the present invention.

Fig. 2 is a diagram for explaining another embodiment of the present invention in which control of the temperature of a laser crystal is applied as another means for improving efficiency.

Fig. 3 is a diagram for explaining an SHG laser according to another embodiment of the present invention.

Fig. 4 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in a laser printer.

Fig. 5 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in an optical shaping unit.

Fig. 6 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in an optical disk drive.

Fig. 7 is a diagram for explaining another embodiment of the present invention.

Fig. 8 is a diagram for explaining still another embodiment of the present invention.

Fig. 9 is a diagram for explaining still another

embodiment of the present invention.

Fig. 10 is a diagram for explaining an embodiment of the prior art.

Fig. 11 is a diagram for explaining the comparison of the input/output characteristics of a semiconductor laser excited solid laser in the presence and the absence of a wavelength control element.

Fig. 12 is a diagram for explaining the phase match wavelength width of an KN crystal.

Fig. 13 is a diagram for explaining the oscillation efficiency reduction phenomenon caused by an opening in the resonators of an Nd:YVO₄ laser as a typical solid laser and a LiSAF laser.

Fig. 14 is a diagram for explaining the comparison of the input/output characteristics of a semiconductor laser excited solid laser using a LiSAF crystal and an Nd:YVO₄ laser as a typical solid laser.

Fig. 15 is a diagram for explaining the comparison of the input/output characteristics of a LiSAF laser when the temperature of the LiSAF crystal is controlled and when the temperature is not controlled.

Fig. 16 is a diagram for explaining the comparison of transmission wavelength width which differs according to the number of quartz crystals of a birefringence crystal.

Fig. 17 is a diagram for explaining the oscillation wavelength interval with respect to the thickness of a birefringence crystal.

Fig. 18 is a diagram for explaining the phase match wavelength width of an LBO crystal.

Best Mode for Carrying out the Invention

The most preferred embodiments of the present invention are described in detail. However, it is to be understood that the present invention is not limited to the embodiments.

(Embodiment 1)

Fig. 1 is a diagram for explaining an embodiment of the present invention. An excitation beam 31 radiated from a semiconductor laser 11 is converged by converging optics 12 and excites a laser crystal 21. An AlGaInP semiconductor laser manufactured by Spectra Diode Laboratory Co. which has an output of 50 mW and an oscillation wavelength of 670 nm is used as the semiconductor laser 11. A semiconductor laser collimator (focusing distance of 8 mm), an anamorphic prism pair (magnification of 6X) and a single lens (focusing distance of 30 mm) are used as the converging optics 12.

The excited laser crystal 21 oscillates a first laser beam 32 in a solid laser resonator 20 which comprises an input-side resonator mirror 24 formed on an end surface of the laser crystal and an output mirror 25. In the solid laser resonator 20, the laser crystal 21 and a wavelength tuning element 23 as a wavelength control element are arranged. The wavelength of the first laser beam 32 oscillated in the resonator is tuned by the wavelength tuning element 23. In this embodiment, the resonator

structure 20 is a plane-concave type resonator, the output mirror 25 has a curvature radius of 150 mm, and the effective optical path is slightly shorter than the curvature radius.

A LiSAF crystal ($\phi 3 \times 5$ mm) containing 1.5 mol% of Cr is used as the laser crystal 21. To the front end surface 24 of the crystal are applied an anti-reflection (to be abbreviated as AR hereinafter) coating having a reflectance of 2 % or less for an excitation wavelength and a high reflection (to be abbreviated as HR hereinafter) coating having a reflectance of 99 % or more for the wavelength of the first laser beam. In this respect, any reflectance of the HR coating is acceptable if it can reflect the first laser beam efficiently and the reflectance does not need to be 99 % or more. To the rear end surface is applied an AR coating having a reflectance of 2 % or less for the wavelength of the first laser beam. To the output mirror 25 is applied an HR coating having a reflectance of 99 % or more for the first laser beam. In this respect, any reflectance of the output mirror 25 is acceptable if it can take out the first laser beam with a high efficiency, and the reflectance does not need to be 99 % or more.

In the present invention, as shown in Fig. 13, it has been verified that the loss can be greatly improved by setting the openings in the resonator of the LiSAF laser to 5 times or more the diameter of the first laser beam. Based on this fact, the diameter of the opening of the laser

crystal has been set to 3 mm, the diameter of the opening in the wavelength tuning element 23 to 5 mm and the diameter of the opening in the output mirror to 10 mm.

A single birefringence filter made of a quartz plate is used as the wavelength tuning element 23 and inclined at the Brewster angle so that the reflection loss of the first laser beam becomes minimal. The wavelength of the first laser beam 32 can be tuned by turning the birefringence filter around the optical axis. The wavelength tuning range is set to about 860 ± 50 nm and the wavelength selection width is set to about 0.5 nm. Any wavelength selection width is acceptable if the output of the first laser beam is not reduced considerably. Further, besides a birefringence filter, a prism, etalon, external injection synchronism or a combination thereof may be used as the wavelength tuning element.

The absorption wavelength allowable width of the LiSAF crystal 21 is wide at about 100 nm, and no temperature control element is used to tune the wavelength of the excitation beam radiated from the semiconductor laser. However, wavelength tuning may be carried out by matching the wavelength of the excitation beam with the maximum absorption wavelength.

An optical part having a beam shaping function such as a cylindrical lens or an optical fiber may be used in place of the converging optics of the semiconductor laser.

(Embodiment 2)

Fig. 2 is a diagram for explaining another embodiment of the present invention in which laser crystal temperature control is applied as another means for improving efficiency. The excitation light source 11, the converging optics 12, the laser crystal 21, the wavelength tuning element 23 and the resonator structure 20 are the same as those of Embodiment 1. The openings in the resonator and the wavelength tuning range are also the same as in Embodiment 1.

As shown in Fig. 15, it is known that a stable laser output can be obtained by controlling the temperature of a LiSAF crystal. In Fig. 2, the temperature of the LiSAF crystal is controlled to 15°C by using an electronic cooling element and a thermistor. The lower limit of the control temperature is a temperature at which the laser crystal starts dew condensation and which can be set freely if saturation is not seen in laser output under use conditions. (Embodiment 3)

Fig. 3 is a diagram for explaining an SHG laser according to another embodiment of the present invention. The same excitation optics including the semiconductor laser 11 as those of Embodiment 1 are used.

The excited laser crystal 21 generates a fundamental wave 32 which is a solid laser oscillation wave in the solid laser resonator 20 which comprises the input-side resonator mirror 24 formed on an end surface of the laser crystal and the output mirror 25. The laser crystal 21, a nonlinear

optical crystal 22 for converting part of the fundamental wave of the laser crystal 21 into an SHG wave and a wavelength tuning element 23 are arranged in the solid laser resonator 20. LiB_3O_5 (lithium borate which is abbreviated as LBO hereinafter) is used as the nonlinear optical crystal 22 which measures 3 x 3 x 5 mm and is coated with an AR coating having a reflectance of 2 % or less for the wavelengths of the fundamental wave and the SHG wave.

The temperatures of the LiSAF crystal 21 and the LBO crystal 22 are controlled to $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ by using a temperature control element. To the output mirror 25 are applied an HR coating having a reflectance of 99 % or more for the fundamental wave and an AR coating for the SHG wave, and the diameter of an opening in the mirror is set to 10 mm as in Embodiment 1. The other optical parts are the same as those of Embodiment 1. The wavelength of the fundamental wave 32 oscillated in the resonator is tuned by the wavelength tuning element 23 to a wavelength at which the wavelength conversion efficiency of the nonlinear optical crystal 22 becomes maximal, and part of the fundamental wave 32 is converted into an SHG wave 33 by the nonlinear optical crystal 22 and radiated from the output mirror 25. According to the present invention, an SHG output of 10 mW was obtained at a semiconductor laser input of 455 mW.

The wavelength tuning range is set to about 860 ± 70 nm and the wavelength selection width is set to 0.5 nm. In this respect, any wavelength tuning range and any wavelength

selection width are acceptable if the wavelength is near a wavelength at which the conversion efficiency of the LBO crystal becomes maximal and if the SHG laser output does not decrease significantly, respectively.

Further, a nonlinear optical crystal capable of phase matching in the wavelength tuning range of the fundamental wave, such as β -BaB₂O₄ (barium borate), CsLiB₆O₁₀ (caesium lithium borate), KNbO₃ (potassium niobate), K-Li-Nb-O (lithium potassium niobate) or LiIO₃ (lithium iodate), may be used as a wavelength conversion element.

Using a gas laser of the prior art which achieved the same output as that of the above embodiment, comparison of characteristic properties was made. The gas laser had a service life of 2,000 to 5,000 hours and experienced a 50 % reduction in output whereas the SHG laser experienced no reduction in output after 1,000 hours or more of operation. Therefore, the service life of the SHG laser was extended to 2 to 5 times that of the prior art according to the embodiment of the present invention. The gas laser had a volume of 10 to 15 liters whereas the SHG laser had a volume of 0.3 liter. Therefore, the volume of the SHG laser was reduced to 1/50 to 1/30 that of the prior art according to the embodiment of the present invention. The gas laser had a power consumption of 1,000 to 2,000 W whereas the SHG laser had a power consumption of 5 W. Therefore, the power consumption of the SHG laser was reduced to 1/400 to 1/200 that of the prior art according to the embodiment of the

present invention. Comparison between the characteristic properties of the gas laser and the SHG laser of the embodiment of the present invention is shown in Table 1.

Table 1

Comparison results of specifications between gas laser and SHG laser of the present invention

laser light source	output (mW)	service life (hours)	volume (liter)	power consumption (W)
Ar laser	15	5000	10	2000
He-Cd laser	10	2000	15	1000
SHG laser	10	>10000	0.3	5

(Example 4)

Fig. 4 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in a laser printer. The SHG laser output 33 radiated from an SHG laser light source 100 illustrated in Fig. 3 passes through an acousto-optical (to be abbreviated as AO hereinafter) modulator 51, a beam expander 52, a rotary polygon mirror 53 and an f θ lens 54 and is converged on a photosensitive drum 55. The AO modulator 51 modulates the SHG output 43 according to image information, and the rotary polygon mirror 53 scans in a horizontal direction (of the paper of the drawing). With this combination, secondary information is recorded on the photosensitive drum 55 as

partial potential differences. The photosensitive drum 55 turns, adhered by toner according to the potential differences, and reproduces information on recording paper.

At this point, a photosensitive material applied to the photosensitive drum 55 is selenium (Se) and the output wavelength of the SHG laser light source 100 is set to 420 nm to which the photosensitive material is relatively highly sensitive and its output is set to 10 mW. In this respect, a photosensitive material other than Se may be used.

(Embodiment 5)

Fig. 5 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in an optical shaping unit. The SHG laser light source 100 illustrated in Fig. 3 is used as a light source. A blue cured resin 61 is charged into a container and a laser beam is caused to scan the surface of the liquid two-dimensionally. At this point, only a surface portion 61-a of the blue curing resin 61 that absorbs light cures. After the formation of one layer is completed, an elevator 62 falls to form the next layer continuously. With this operation, a solid model 63 having a desired shape can be formed. At this point, the SHG laser light source has a wavelength of 430 nm and an output of 10 mW.

(Embodiment 6)

Fig. 6 is a diagram for explaining an application example in which an embodiment of the present invention is applied in an optical disk drive. The SHG laser light

source 100 illustrated in Fig. 3 is used as a light source. An optical disk drive of opto-magneto recording system is used. An SHG laser output 33 radiated from the SHG laser light source 100 is expanded by a beam expander 52 and then becomes parallel beams. Part of the beams reflected by the beam splitter 72 are received by a front monitor 73. The beams passing through the beam splitter 72 are converged on a medium 75 by a converging optic 74. Reflected light partially reflected by the beam splitter 72 and separated into two beams to be received by two detectors 76. The front monitor 73 monitors the SHG laser output 33 to control it. Each of the two detectors 76 after the beam splitter 72 performs autofocusing and signal detection. A fixed magnetic field is applied to the medium 75 so that the SHG laser output 33 is modulated and the focusing temperature is raised to a Curie temperature of the medium 75 to reverse magnetization for recording. When the output is on, the magnetic field of the medium is reversed, and when the output is off, the magnetic field is not reversed and signal recording is enabled. The recording frequency is set to 10 MHz. At the time of signal reproduction, the same SHG laser light source 100 as that for recording is used to obtain a well reproduced signal.

(Embodiment 7)

Fig. 7 is a diagram for explaining another embodiment of the present invention. Excitation beams 141 radiated from a semiconductor laser 111 are converged by converging

optics 112 to excite a laser crystal 121. An AlGaInP semiconductor laser manufactured by Spectra Diode Laboratory Co. and having an output of 500 mW and an oscillation wavelength of 670 nm is used as the semiconductor laser 111. A semiconductor laser collimator ($f = 8$ mm), an anamorphic prism pair (magnification: 6X) and a single lens ($f = 30$ mm) are used as the converging optics 112.

The excited laser crystal 121 generates a fundamental wave 142 in a solid laser resonator 120 which includes an input-side resonator mirror 122 formed on an end surface of the laser crystal and an output mirror 124. In the solid laser resonator 120, the laser crystal 121, an SHG crystal 131 and a wavelength control element 125 are arranged. At this point, the solid laser resonator 120 is a plane-concave resonator having a length of 145 mm, and the output mirror 124 has a curvature radius of 150 mm. A LiSAF crystal ($\phi 3 \times 5$ mm) containing 1.5 mol% of Cr is used as the laser crystal 121. To a front end surface of the crystal are applied an AR coating having a reflectance of 2 % or less for an excitation wavelength and an HR coating having a reflectance of 99 % or more for the wavelength of the fundamental wave. To a rear end surface of the crystal is applied an AR coating having a reflectance of 0.2 % or less for the wavelength of the fundamental wave to make it the input-side resonator mirror 122.

The SHG crystal 131 formed of a $3 \times 3 \times 5$ mm LBO crystal is arranged right after the LiSAF crystal 121. To

both end surfaces of the LBO crystal is applied an AR coating having a reflectance of 0.2 % or less for the wavelength of the fundamental wave and 1 % or less for SH wavelength. A birefringence crystal formed of a single 0.5 mm thick quartz plate is used as the wavelength control element 125, inclined at the Brewster angle with respect to the optical axis and turned around the optical axis to control the wavelength of the fundamental wave to a wavelength at which the conversion efficiency of the LBO crystal as the SHG crystal 131 becomes maximal. In the resonator, part of the fundamental wave is converted into an SH wave 143 by the SHG crystal 131 and taken out from the output mirror 124 to the outside of the resonator as an SH output. In this structure, the oscillation threshold value was twice that when the wavelength control element shown in Fig. 12 did not exist and an SH output of 10 mW was obtained.

The locations of the SHG crystal 131 and the wavelength control element 125 inserted into the resonator shown in Fig. 7 in the present invention can be exchanged. The absorption wavelength allowable width of the LiSAF crystal 121 is wide at about 100 nm and the wavelength of the excitation semiconductor laser is not controlled using the temperature control element. However, the wavelength may be controlled to the maximum absorption wavelength.

(Comparative Embodiment 1)

In the same laser resonator as that of Fig. 7, a single

5 mm thick quartz plate was used as the wavelength control element 125 and a KN crystal was used as the SHG crystal 131. Since the interval between laser oscillation wavelengths controlled by the wavelength control element formed of this single 5 mm thick quartz plate was narrow at 12 nm, 4 to 5 fundamental waves were oscillated simultaneously at a wavelength interval of 12 nm by the LiSAF crystal as the laser crystal 121. An SH output of several nWs only was obtained as KN which was the SHG crystal had a narrow phase match wavelength half value width of 0.4 nm and the power of the fundamental wave was diverged because laser beams were oscillated at other wavelengths even if one of the wavelengths of the fundamental waves was converted by the KN crystal.

(Embodiment 8)

Fig. 8 is a diagram for explaining another embodiment of the present invention. Excitation optics consisting of the semiconductor laser 111 and the converging optics 112 are the same as those of Embodiment 7. The excited laser crystal 121 generates a fundamental wave 142 in a solid laser resonator 120 which is formed of three resonator mirrors consisting of an input-side resonator mirror 122 formed on an end surface of the laser crystal, a concave mirror 126 and a plane output mirror 123. In the solid laser resonator 120, the laser crystal 121 and the SHG crystal 131 are arranged between the input-side resonator mirror 122 and the plane output mirror 123 and a wavelength

control element 125 is arranged between the plane output mirror 123 and the concave mirror 126. The materials, shapes and coatings of the laser crystal 121 and the SHG crystal 131 used at this time are the same as those of Embodiment 7. The same wavelength control element 125 as that of Embodiment 7 was used.

To the concave mirror 126 was applied an HR coating having a reflectance of 99 % or more for the wavelength of the fundamental wave. To the plane output mirror 123 were applied an HR coating having a reflectance of 99 % or more for the wavelength of the fundamental wave and an AR coating having a transmittance of 85 % or more for an SH wavelength. The wavelength control element 125 was turned around the optical axis to control the wavelength of the fundamental wave to a wavelength at which the conversion efficiency of the LBO crystal as the SHG crystal 131 became maximal. In the resonator, part of the fundamental wave is converted into an SH wave 143 by the SHG crystal 131 and taken out from the plane output mirror 123 to the outside of the resonator as an SH output 143. In this structure, an SH output of 15 mW was obtained since there was no loss in the SH light at the wavelength control element 125 shown in Fig. 7.

(Embodiment 9)

Fig. 9 is a diagram for explaining still another embodiment of the present invention. Excitation optics consisting of the semiconductor laser 111 and the converging

optics 112 are the same as those of Embodiment 7. The excited laser crystal 121 generates a fundamental wave 142 in a solid laser resonator 120 which includes an input-side resonator mirror 122 formed on an end surface of the laser crystal and an output mirror 124. The materials, shapes and coatings of the laser crystal 121 and the SHG crystal 131 used at this time are the same as those of Embodiment 7. Since the output mirror 124 is coated with an HR coating having a reflectance of 99.9 % or more for the wavelength of the fundamental wave with a central wavelength of 860 ± 5 nm, control of an oscillation wavelength can be carried out without a wavelength control element. The output mirror 124 is also coated with an AR coating having a transmittance of 85 % or more for an SH wavelength. As shown in Fig. 18, since the phase match wavelength half value width of the LBO crystal as the SHG crystal 131 is wide at 8 nm, SH light can be obtained efficiently without controlling wavelength.

In the present invention, by designing a LiSAG laser resonator, taking into consideration openings in the resonator, the efficiency of the semiconductor laser excited LiSAF laser is greatly improved. Further, by controlling the temperature of the LiSAF crystal, the oscillation lost phenomenon of the laser is avoided and means for obtaining a stable laser output is proposed. Using this LiSAF laser, an SHG laser having an output of 10 mW is implemented. The present invention makes it possible to extend service life to 2 to 5 times and reduce volume and power consumption to

1/50 to 1/30 and 1/400 to 1/200 those of the prior art, respectively. In addition, the present invention makes it possible to reduce the size and power consumption, extend the service life and improve the reliability of laser applied units.

According to the present invention, in a wavelength variable laser, particularly an internal resonator SHG system using a LiSAF laser, the oscillation threshold value is reduced by expanding the transmission wavelength width of the wavelength control element and the efficiency and reliability of a second harmonic generator as a laser are improved by using an LBO crystal as an SHG crystal having a wide phase match width. Moreover, using this second harmonic generator as a light source, the reliability of a laser applied product such as a laser printer is improved.

Industrial Applicability

As described on the foregoing pages, according to the present invention, a small-sized laser resonator, laser and laser applied unit such as a laser printer having excellent stability can be provided.



CLAIMS

1. A laser resonator comprising a laser crystal made of a fluoride containing Cr and at least one optical part, characterized in that an opening in the resonator has substantially a diameter 5 times or more that of a first laser beam, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the resonator.
2. The laser resonator of claim 1, wherein the laser crystal is made of Cr:LiSrAlF₆ (chromium added lithium strontium aluminum fluoride).
3. The laser resonator of claim 1 or 2 which has means for controlling the temperature of the laser crystal.
4. The laser resonator of claim 3 which has means for controlling the temperature of the laser crystal in a range where input/output characteristics thereof do not reach saturation.
5. The laser resonator of claim 3 or 4 which has means for controlling the temperature T of the laser crystal in a range of $0 \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$.
6. The laser resonator of any one of claims 1 to 5, wherein at least one of a plurality of mirrors constituting the resonator is formed on one end surface of the laser crystal.
7. The laser resonator of any one of claims 1 to 6, wherein at least one of the optical parts is a wavelength control element.
8. The laser resonator of claim 7, wherein a birefringence



crystal inclined at the Brewster angle is used as the wavelength control element for controlling the oscillation wavelength of the solid laser crystal.

9. The laser resonator of claim 8, wherein at least one selected from quartz (SiO_2), LiNbO_3 , LiTaO_3 and a liquid crystal plate is used as the birefringence crystal.

10. The laser resonator of claim 9, wherein a single quartz plate having a thickness of 0.5 mm or less is used as the birefringence crystal.

11. The laser resonator of any one of claims 1 to 10, wherein the optical parts include a wavelength control element and a nonlinear optical crystal.

12. The laser resonator of claim 11, wherein at least part of the first laser beam is converted into a second laser beam having a wavelength different from that of the first laser beam when it passes through the nonlinear optical crystal.

13. The laser resonator of claim 11 or 12, wherein the nonlinear optical crystal is made of at least one selected from LiB_3O_5 (lithium triborate), CsLiB_3O_5 (caesium lithium borate), $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (barium borate), KNbO_3 (potassium niobate), KTaO_3 (potassium tantalate), K-Li-Nb-O (lithium-potassium niobate), K-Ta-Nb-O (niobic acid, tantalic acid-potassium) and LiIO_3 (lithium iodate).

14. The laser resonator of any one of claims 11 to 13 which has means for controlling the temperatures of the laser crystal and the nonlinear optical crystal simultaneously or





individually.

15. A laser comprising the laser resonator according to any one of claims 1 to 14 and a laser crystal.

16. The laser of claim 15, wherein means for exciting the laser crystal is a semiconductor laser.

17. The laser of claim 15 or 16 comprising a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000 \text{ nm}$, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, and a wavelength control element having an opening with a diameter 5 times or more the diameter of the first laser beam and inserted into the resonator.

18. The laser of claim 15 or 16 comprising a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, means for controlling the temperature T of the laser crystal in a range of $0 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000 \text{ nm}$, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, and a wavelength control element having an opening with a diameter 5 times or more the diameter of the first laser beam and inserted into the resonator.





19. The laser of claim 15 or 16 comprising a laser crystal made of Cr:LiSrAlF_6 , a resonator structure in which at least one resonator mirror is formed on one end surface of the laser crystal, a semiconductor laser for exciting the laser crystal, a first laser beam having a wavelength λ_1 that satisfies $780 \leq \lambda_1 \leq 1,000 \text{ nm}$, which is obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the laser resonator, a nonlinear optical crystal having an opening with a diameter 5 times or more the diameter of the first laser beam and inserted into the resonator, a wavelength control element, means for controlling temperature of the nonlinear optical crystal and the temperatures of the laser crystal and the nonlinear optical crystal simultaneously or individually, and means for taking out a second laser beam converted from part of the first laser beam and having a wavelength different from that of the first laser beam.
20. A laser applied unit which uses the laser of any one of claims 15 to 19.
21. The laser applied unit of claim 20 which is a laser printer.
22. The laser applied unit of claim 20 which is an optical shaping unit.
23. The laser applied unit of claim 20 which is an optical disk drive.
24. The laser applied unit of claim 20 which is a particle counter.
25. The laser applied unit of claim 20 which is a DNA



THIS SHEET HAS BEEN
REPLACED

sequencer.

26. A laser oscillation method for oscillating radiation from a laser crystal made of a fluoride containing chromium in a laser resonator to obtain a first laser beam, wherein resonance is carried out in the resonator having an opening with a diameter which is substantially 5 times or more the diameter of the first laser beam.

This Sheet Has Been Replaced



ABSTRACT

In a laser resonator comprising a laser crystal made of a fluoride containing chromium and at least one optical part, the diameter of an opening in the resonator is set to 5 times or more the diameter of a first laser beam obtained by oscillating radiation from the laser crystal in the resonator.

Fig. 1

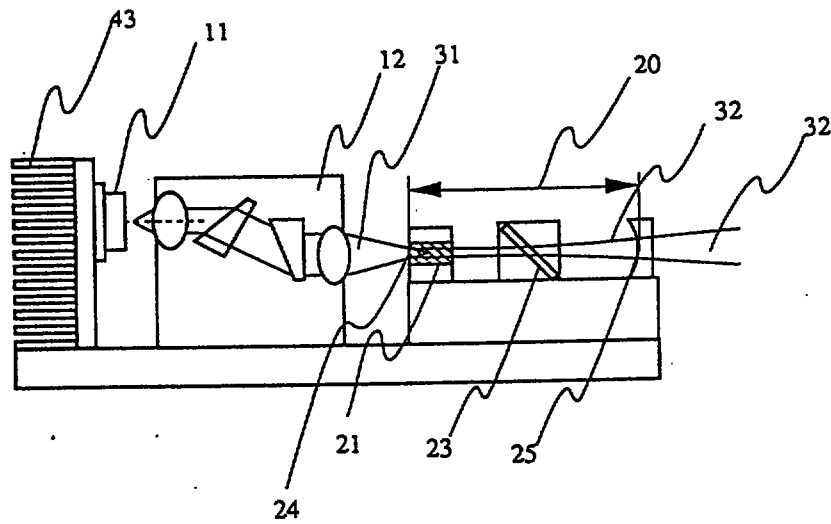


Fig. 2

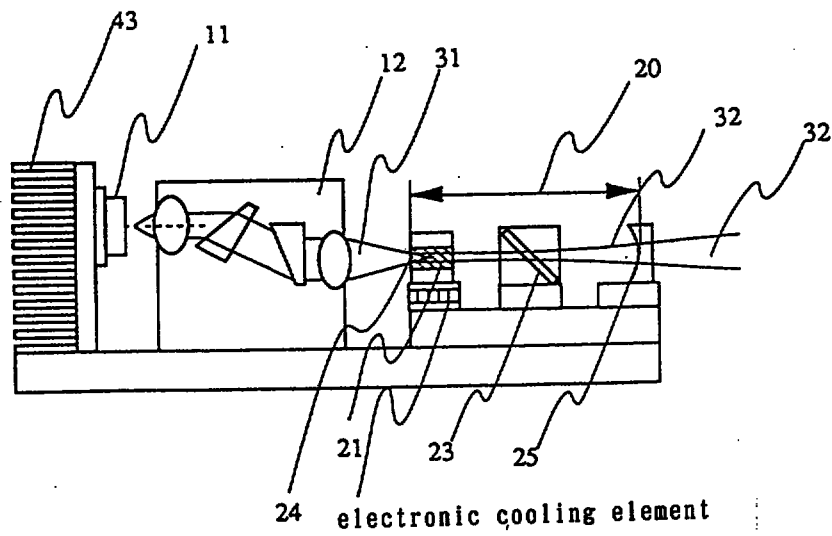


Fig. 3

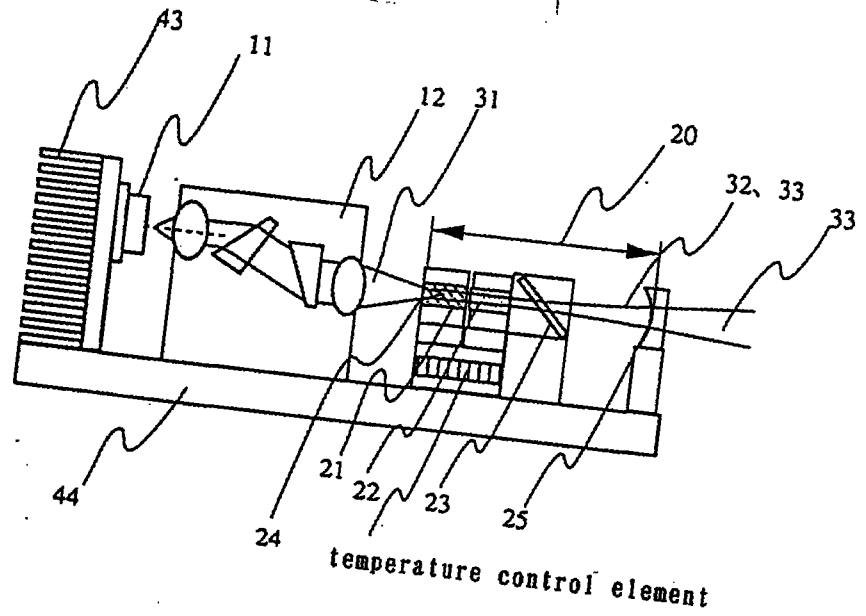


Fig. 4

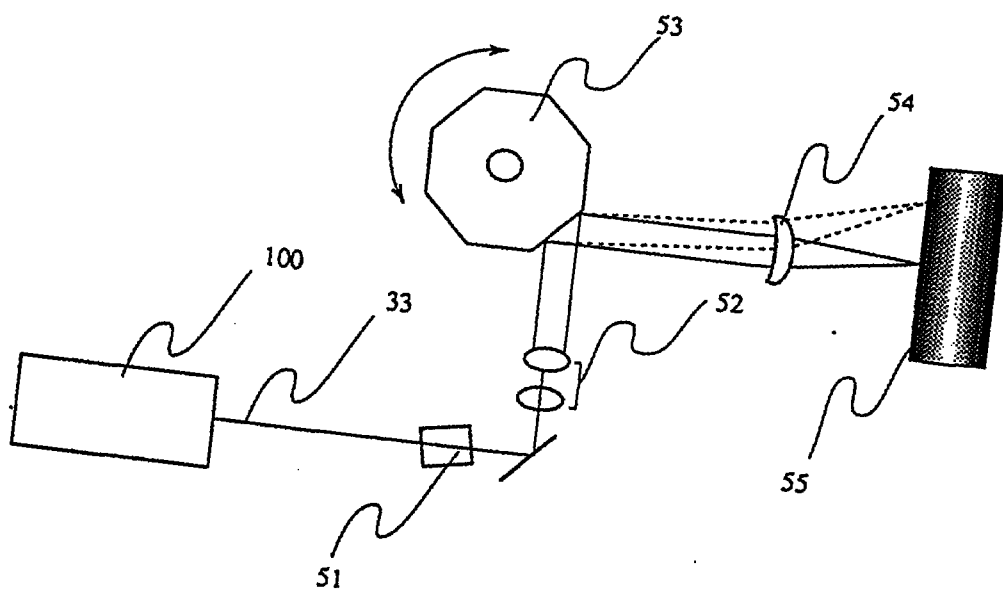


Fig. 5

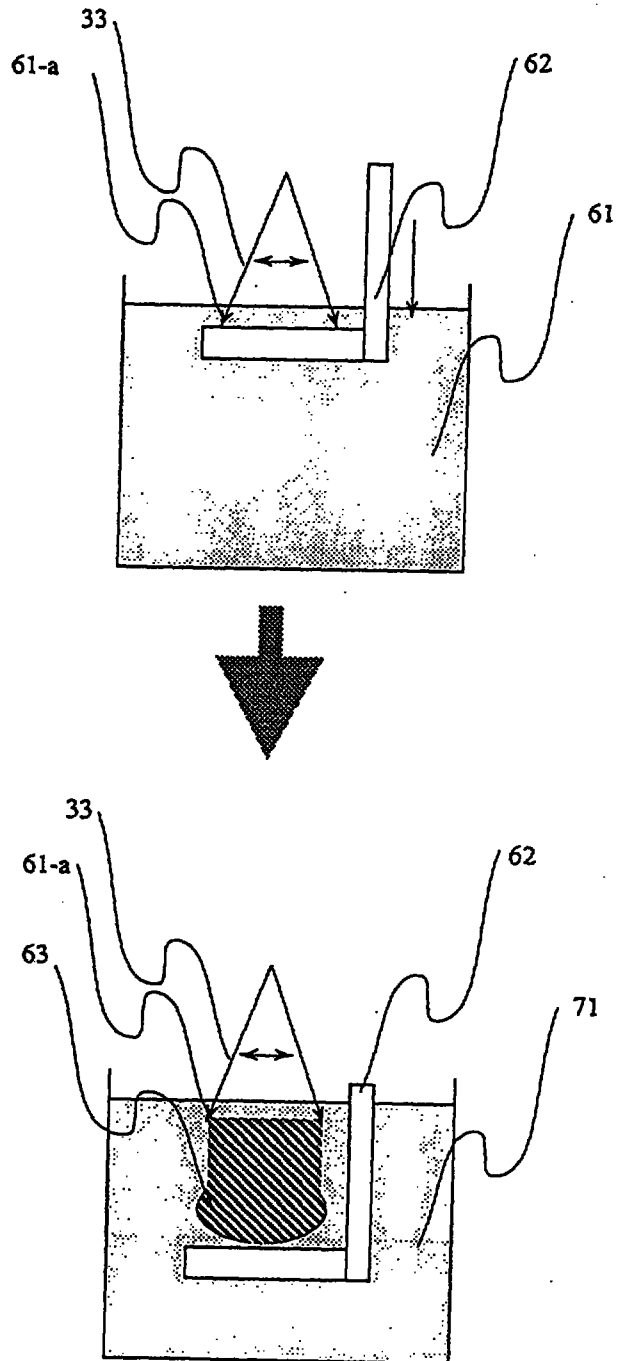


Fig. 6

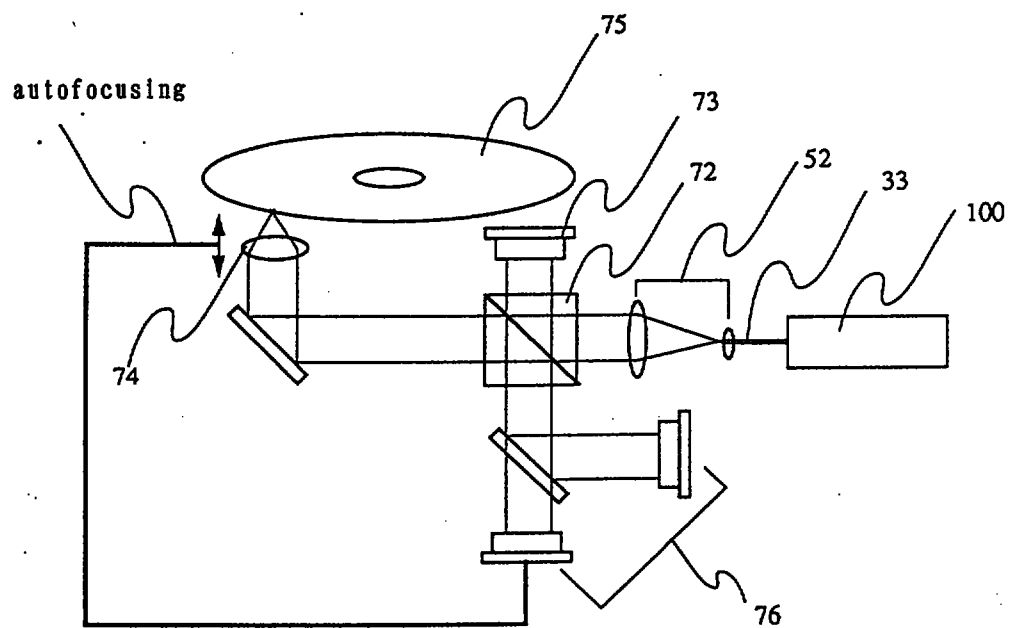


Fig. 7

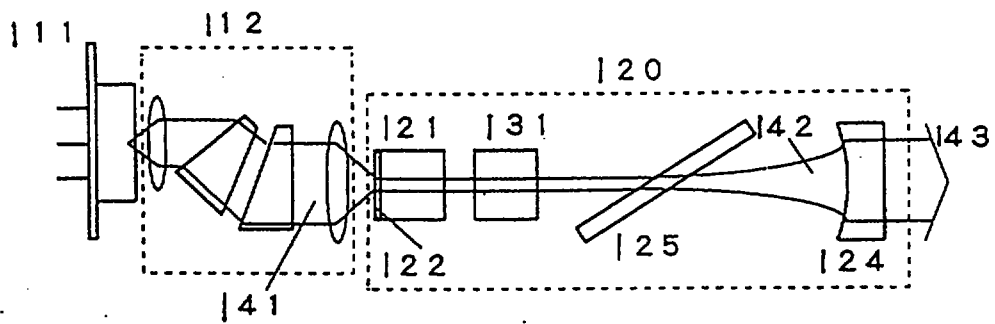


Fig. 8

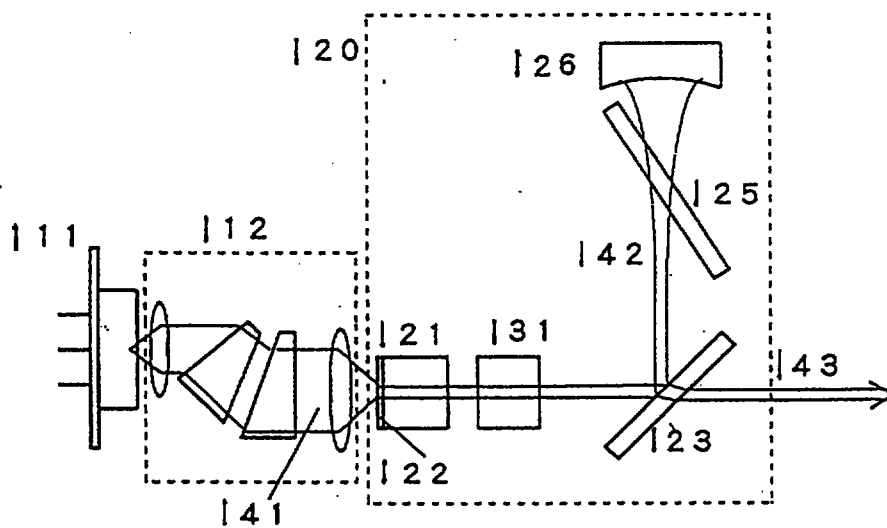


Fig. 9

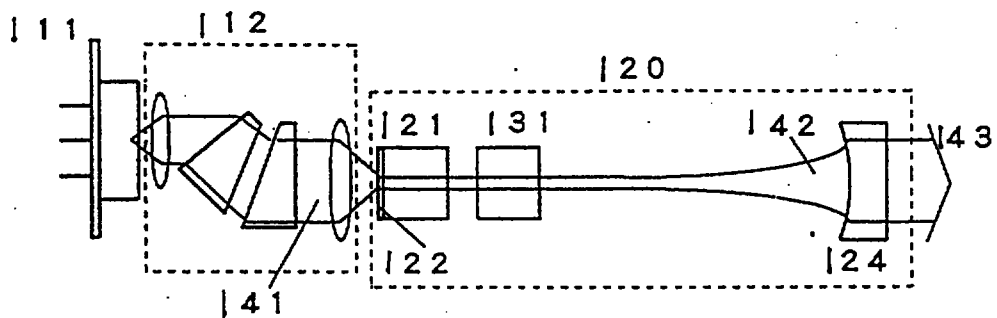


Fig. 10

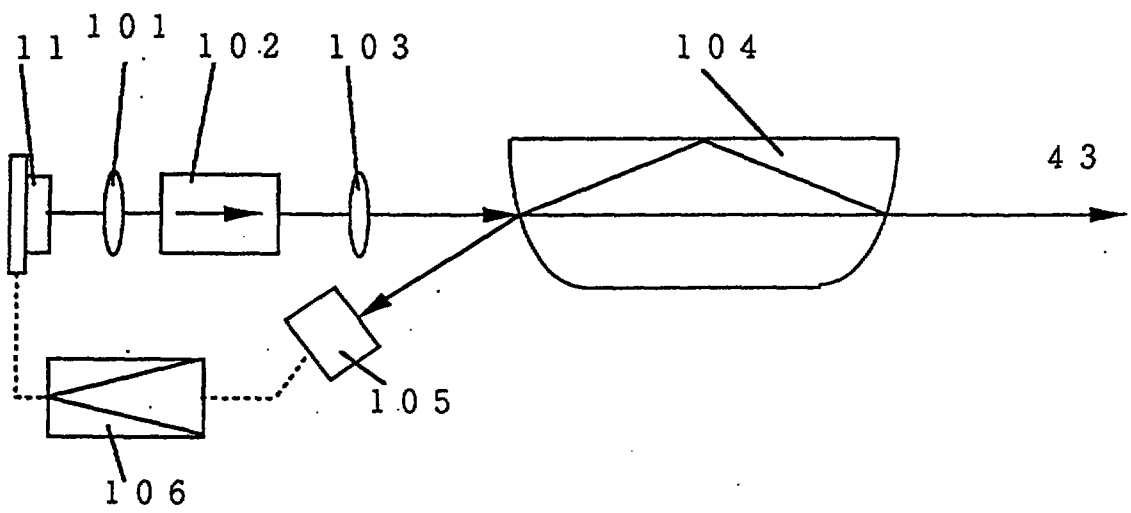


Fig. 11

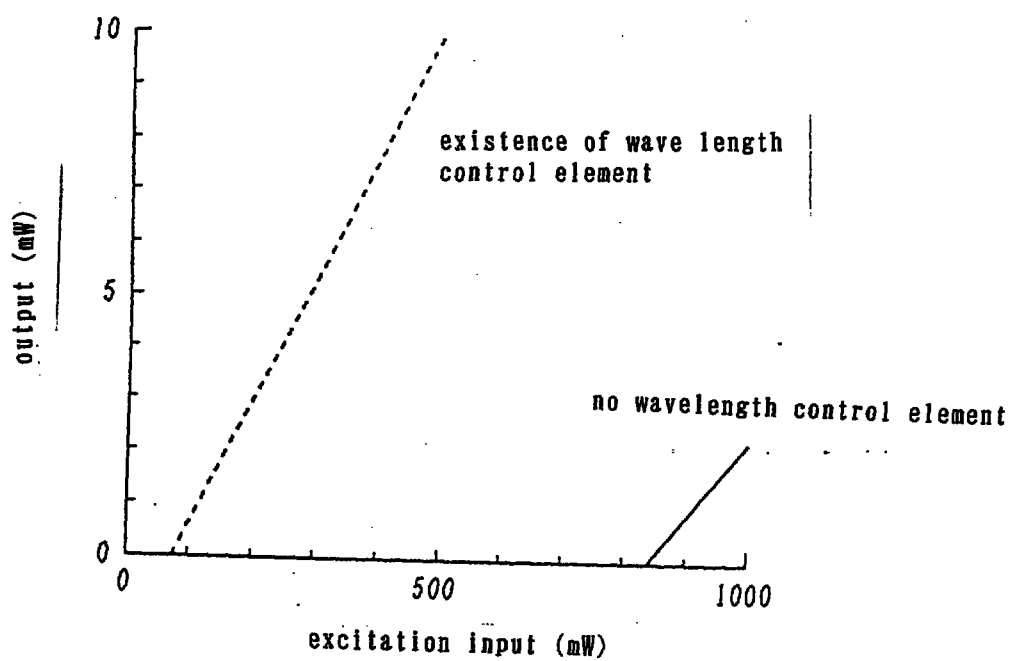


Fig. 12

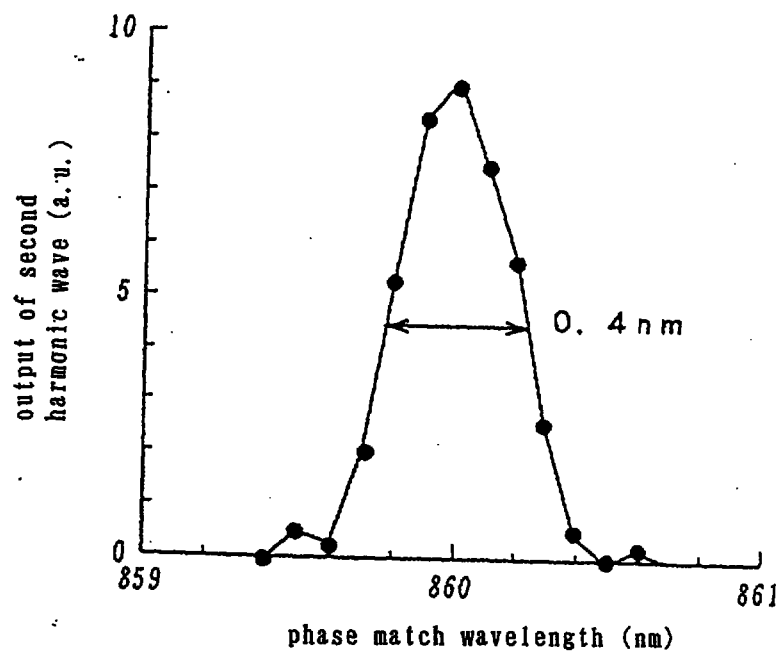


Fig. 13

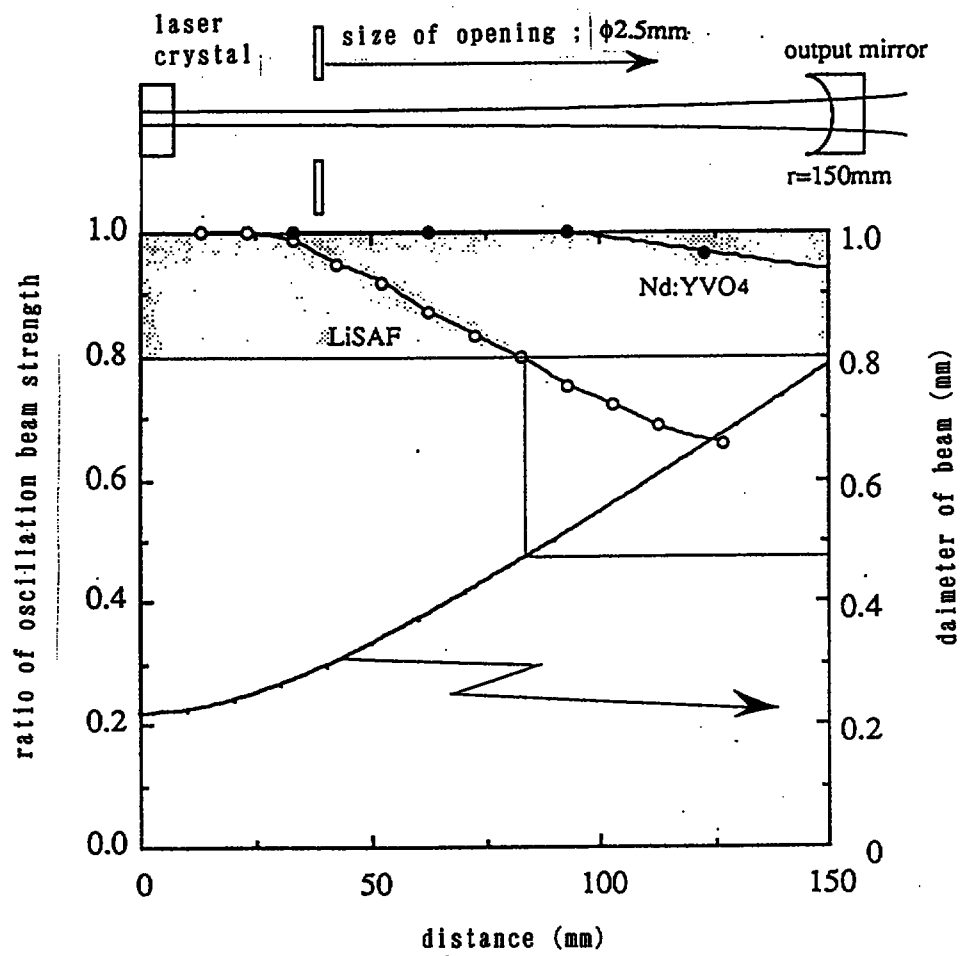


Fig. 14

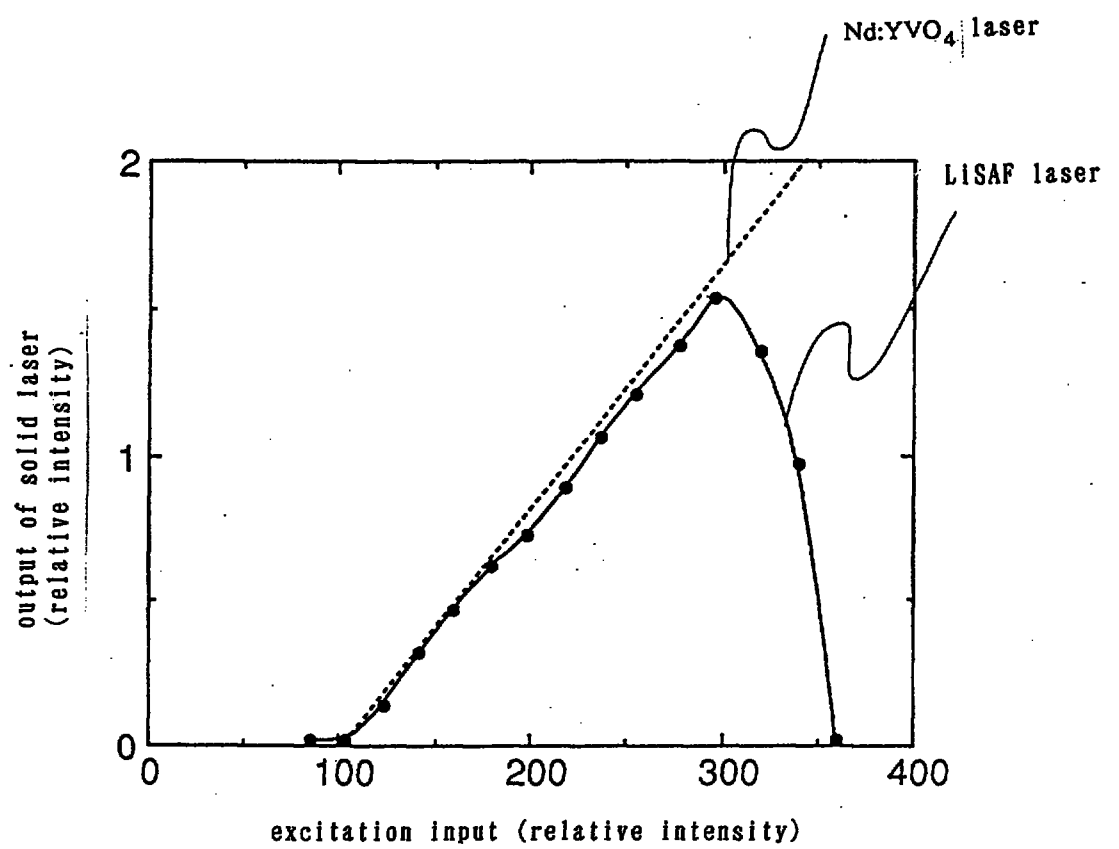


Fig. 15

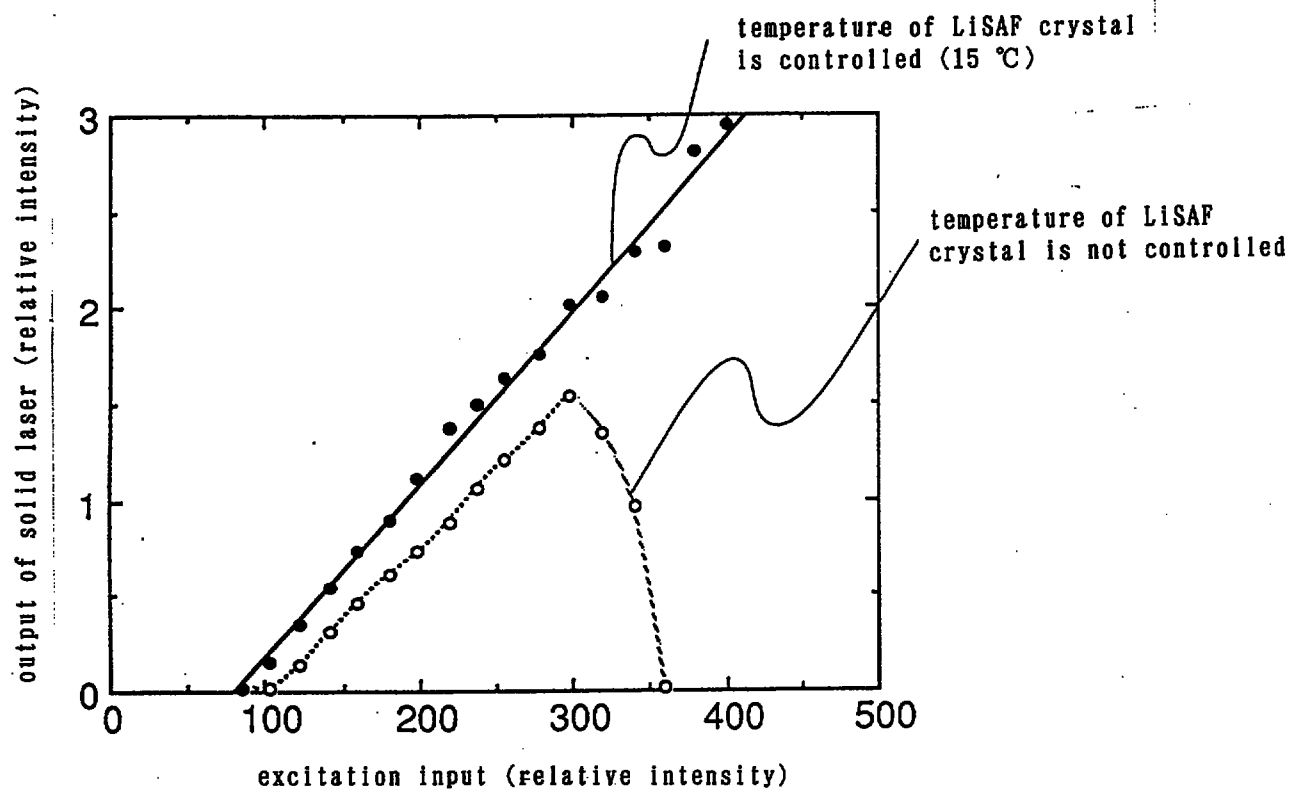


Fig. 16

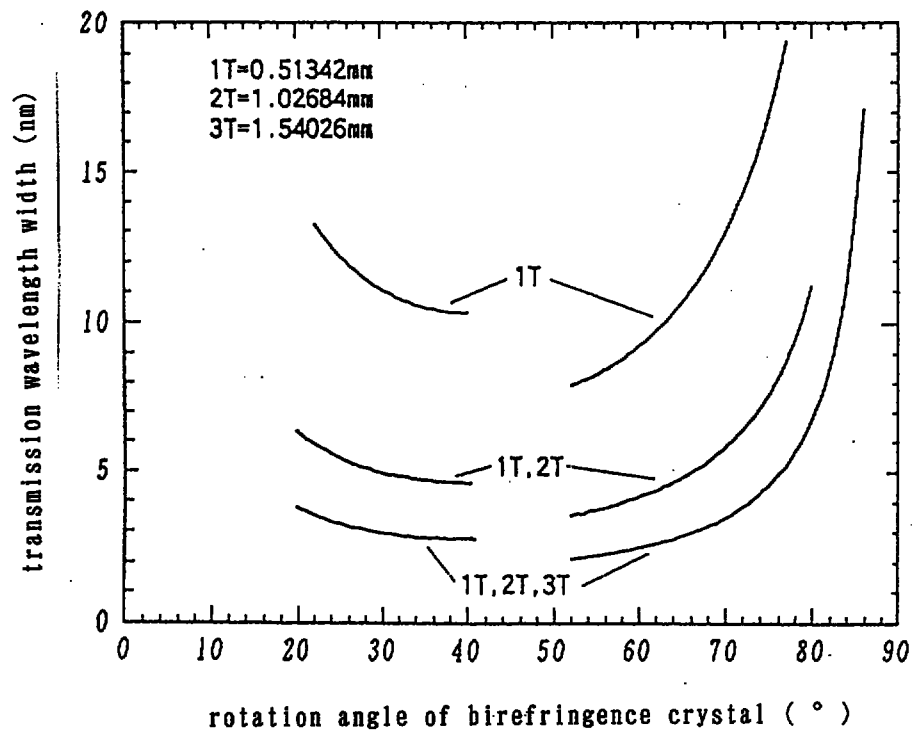


Fig. 17

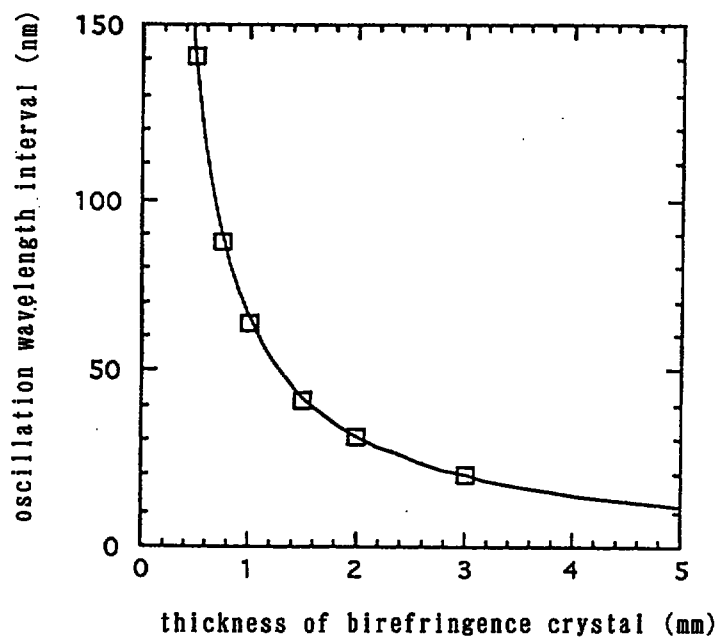
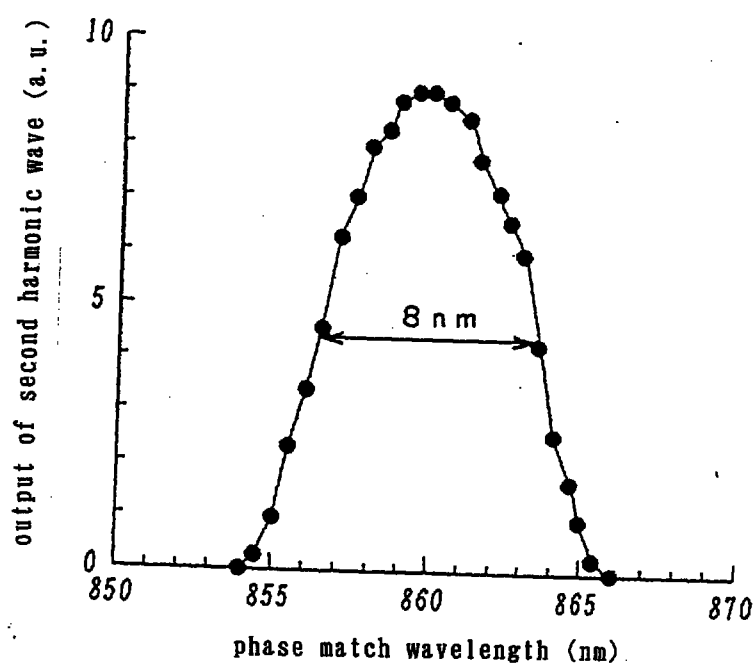
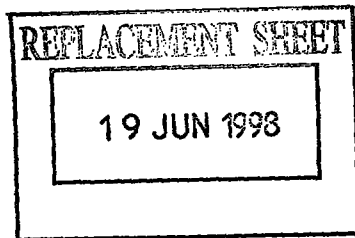


Fig. 18





CLAIMS

1. A laser resonator comprising a laser crystal made of a fluoride containing Cr and at least one optical part, characterized in that said laser crystal (121), SHG crystal (131) and birefringence filter (125) are arranged in this order ; wherein said birefringence filter is inclined at Brewster angle with respect to an optical axis, and phase matching is executed by rotating said birefringence filter around normal axis thereof with keeping an inclination of Brewster angle.
2. A laser resonator of claim 1, wherein at least one crystal plate selected from quartz (SiO_2), LiNbO_3 and LiTaO_3 is used as the birefringence crystal such that transmission wavelength which is 10 nm or less than.
3. A laser resonator of claim 1 or 2, wherein the thickness of said birefringence filter is from 0.6 mm to 3.0 mm in order to set oscillation wavelength interval at 10 nm or less than.
4. A laser resonator of claim 1, wherein a plane output mirror (123) is arranged between said SHG crystal (131) and said birefringence filter, in order to input only fundamental wave into said birefringence filter.
5. A laser resonator comprising a laser crystal made of a fluoride containing Cr and at least one optical part, characterized in that said laser crystal (121), SHG crystal (131) and output mirror (124) are arranged in this order ; wherein said output mirror is provided with a coating having wavelength selection characteristic for fundamental wave,



in order to carry out a phase matching of oscillation wavelength.

6. A laser resonator of claims 1 to 5, wherein an opening of optical parts arranged in a resonator has a diameter 5 times of more that of a first laser beam.

