

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - a > YAG レーザーの開発

小テーマ： 連続発振 Nd:GdVO₄ レーザーの開発 (フェーズ)

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 玉置善紀

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

Ti:sapphire 発振器を励起する装置として、安定かつ高出力で運転することが、高強度フェムト秒レーザーの開発にとって重要な課題となる。高出力かつ高安定・高いビーム品質を実現するべく端面励起による CW グリーンレーザー開発を可能とするレーザー媒質、Nd:GdVO₄ を用いた CW グリーンレーザーの研究。

研究の独自性・新規性

従来市販されてきた CW グリーンレーザーと比較して、熱特性に優れたレーザー媒質 Nd:GdVO₄ を用いることで高出力かつ小型化、及び完全空冷を目指す。

研究の目標

波長 532nm・出力 5W・出力安定性(2 時間) ±1% 以下・規格化ピークレスポンス ±0.5%rms 以下・ビーム角度安定性(ポインティングスタビリティ) 10 μ rad 以下

(2) 研究の進め方及び進捗状況

1. はじめに

レーザー < 1 - 1 - a > における高強度フェムト秒レーザーの開発において、安定にモードロック発振を可能とした Ti:sapphire 発振器が必要不可欠なシステムとなっている。この Ti:sapphire 発振器を励起する装置として、CW グリーンレーザーがある。これを安定かつ高出力で運転することが、高強度フェムト秒レーザーの開発にとって重要な課題となる。本報告では、従来では高出力化に困難とされていた端面励起による CW グリーンレーザー開発を可能とするレーザー媒質、Nd:GdVO₄ を用いた CW グリーンレーザー開発の進捗状況について報告を行なう。

2. ファイバーカップリング空冷制御 LD について

端面励起型固体レーザーを開発する際、励起光源である LD の発振スペクトルの仕様が大きくシステムの仕様に影響する。ここでは、現在用いているファイバーカップリング LD の仕様を確認したので報告する。

測定光学系に用いた物品：Fiber Core=300 μm、ファイバー LD=LA0281FX、Molelectron Power Meter、安藤電機分光器=AQ-6315、電源=KENWOOD 製 PS6-60、平行光レンズ=CVI f=50mm@AR670-1064nm、Wedge2° を使用

次に得られた、電流-出力特性を図 1 に示す。また、分光器を用いて得られた電流-波長特性を図 2 に示す。

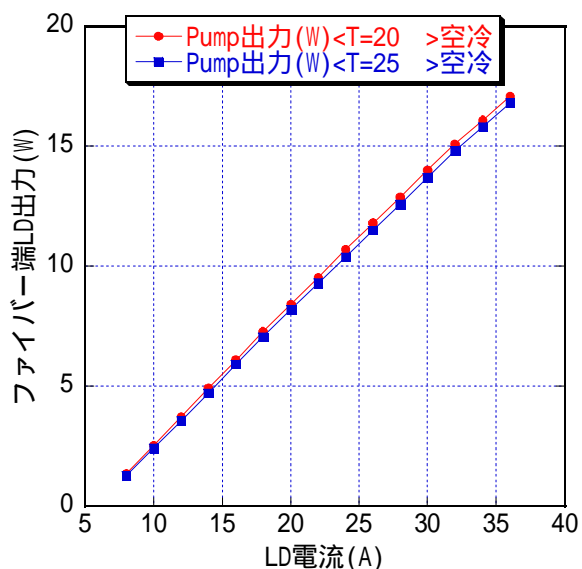


図1 電流-出力特性

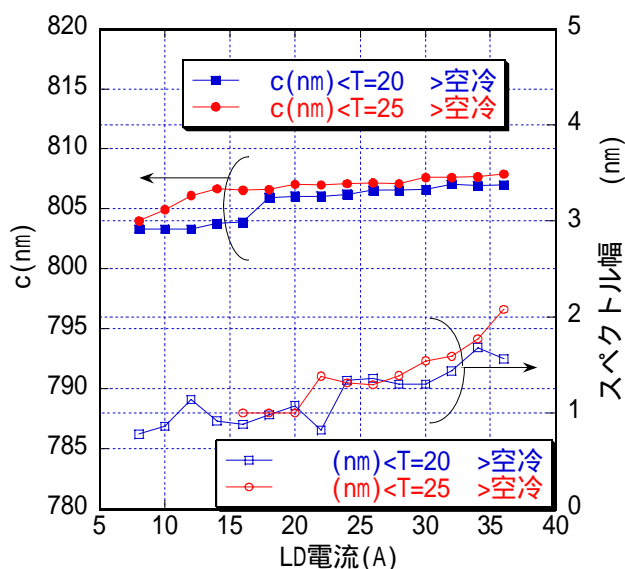


図2 電流-中心波長及び波長幅特性

測定結果から、現在用いているファイバーカップリング LD の仕様は中心波長が 803nm ~ 806nm となり、スペクトル幅は 1.0nm ~ 1.8nm であることが分かる。次に所有する Nd:GdVO₄ の一般的な吸収スペクトル帯域を図3に示す。

Nd:GdVO₄吸収係数 t=3(mm) 0.5%at Shandong製

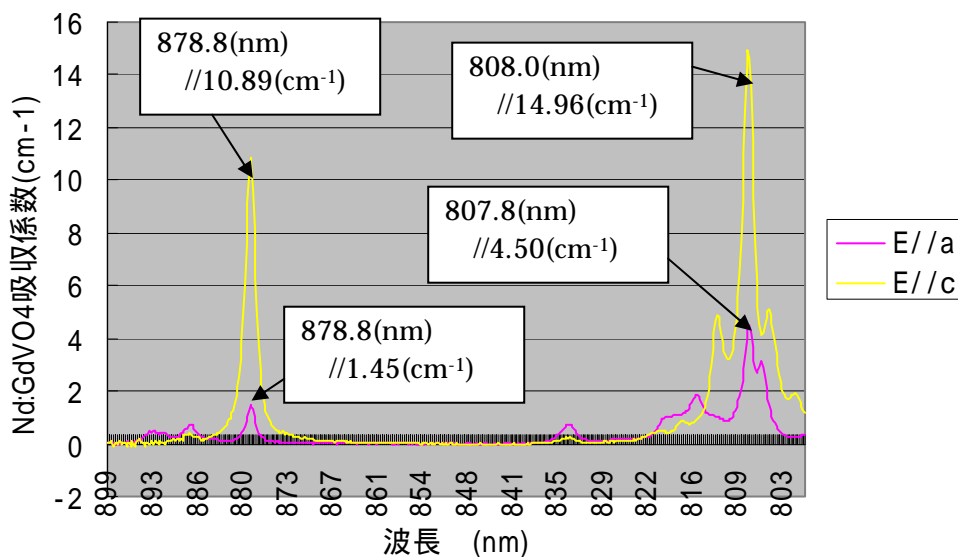


図3 レーザー媒質 Nd:GdVO₄ 吸収波長帯域

図3に示すように、現在所有しているファイバーカップリング LD では Nd:GdVO₄ の吸収帯域の 808nm (吸収係数 14.96cm⁻¹<C 軸成分>) から 2~5nm も離れていることが分かる。しかし、Nd:GdVO₄ のもつ吸収帯域が 808nm を中心として C 軸でも a 軸でも 4nm 以上もあるので励起する上で、どれだけの励起エネルギーが吸収されるレーザー発振を効率良く行えるか計算を行った。その計算結果を図4に示す。

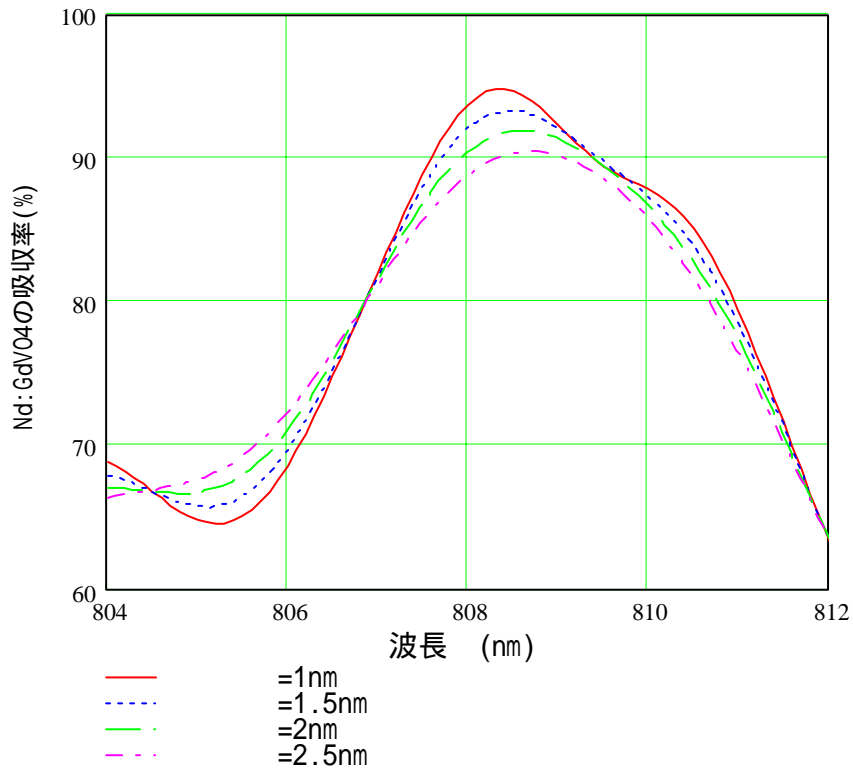


図4 励起波長および波長幅による吸収特性計算結果

励起の中心波長が808nmから-2nmずれると吸収割合は70%にまで落ち込んでしまう事が分かった。また吸収波長に合致する波長域では90%以上の吸収割合を保てる。これにより、ファイバーカップリングペルチェ冷却型空冷LDの仕様は、中心波長を806nm~808nmにて調節が可能となっている。また、レーザー媒質を励起する際重要なパラメータであるスペクトル幅は、1.0nm~2.1nmにて発振していることを確認。また、出力はLD運転電流推奨値内では1.27W~17.8Wまで出力を測定した。これは、レーザー媒質のNd:GdVO₄を励起する上で効率良く励起することの出来る値であることが、確認できた。

3. 基本波 CW 共振器構築

次に、共振器構築を行なった。本システムを製作するにあたり、浜松ホトニクス(株)が振興調整費により共同研究を行なっている、自然科学研究機構 分子科学研究所 平等研究室にて得られた技術を用いて、808nm励起によるNd:GdVO₄のCW共振器を構築した。共振器構成を、図5に示す。

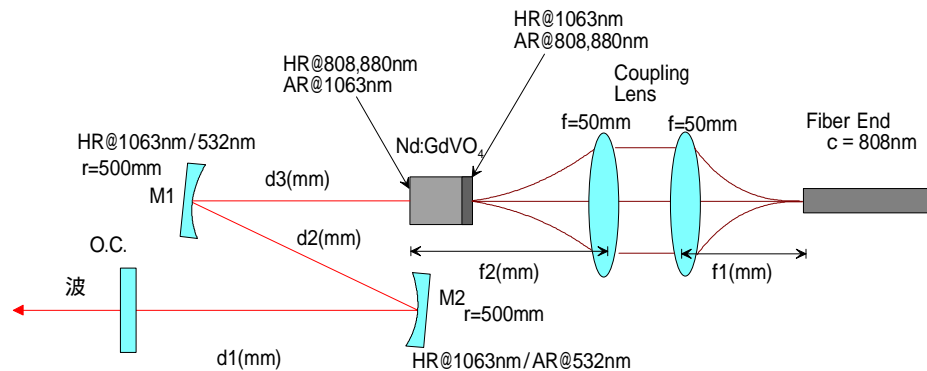


図5 基本波 CW 共振器構造概観図

次に、共振器構成として図5に示すパラメータとして $d_3=45\text{mm}$ 、 $d_2=25\text{mm}$ 、 $d_1=\text{可変}$ とした場合に ABCD 行列計算を用いることで共振器の安定性や基本波による横モード半径の特性を評価した。まず、Nd:GdVO₄ に対する励起光学口径の大きさを、 $300\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ とした場合における、最適な O.C. の設置位置の違い、すなわち共振器長の変化における基本波横モード半径の違いについて検討を行なった。これは、ビーム品質向上において励起光学口径つまり利得媒質内での利得径と基本波横モード半径の比較は重要なパラメータとなるからである。計算結果を図6に示す。

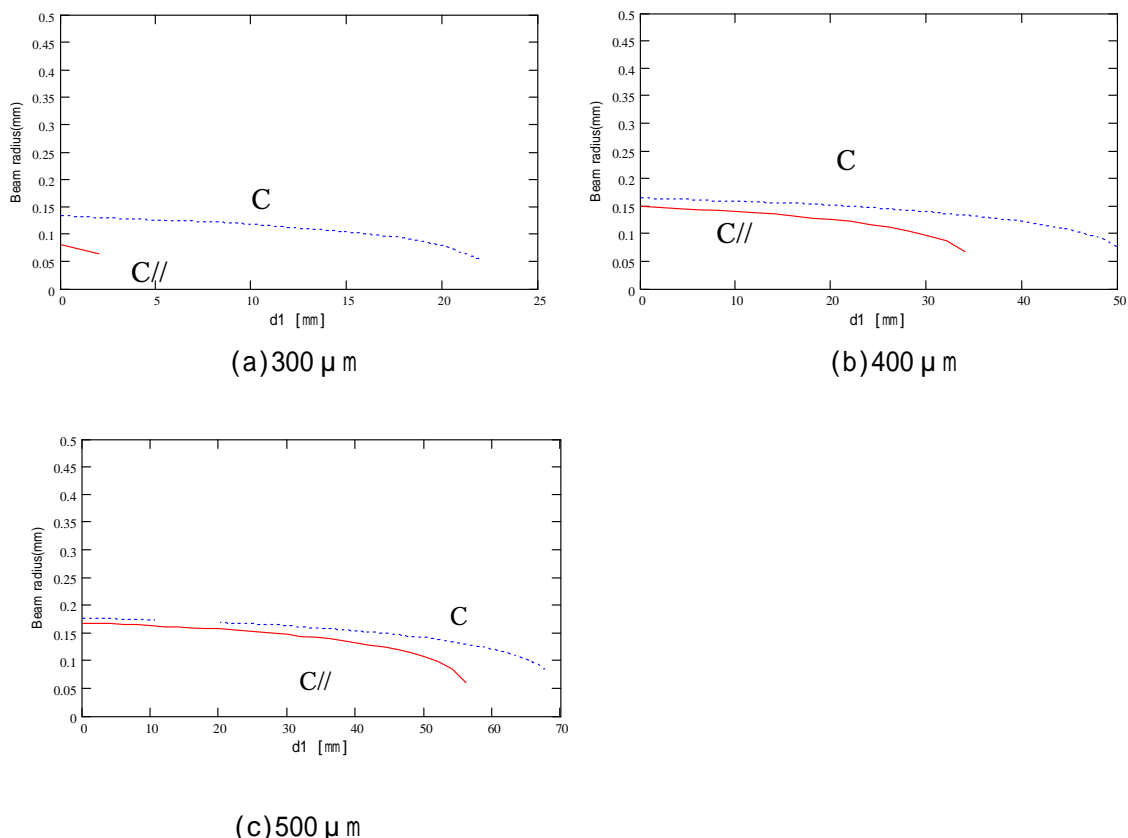


図6 O.C. 励起口径を変化させた時の出射端面での基本横モード半径特性計算結果

この計算結果から、モードマッチング効率及び利得を考慮した場合励起光学口径を $400\ \mu\text{m}$ くらいにすると良いことが分かった。その際には、試作機のマウントの関係上内部波長変換結晶を設置することも含めると $d_1 = 35\text{mm}$ が適当と考えられる。次に、その場合に予想されるビーム品質特性を計算した。計算結果を図7に示す。

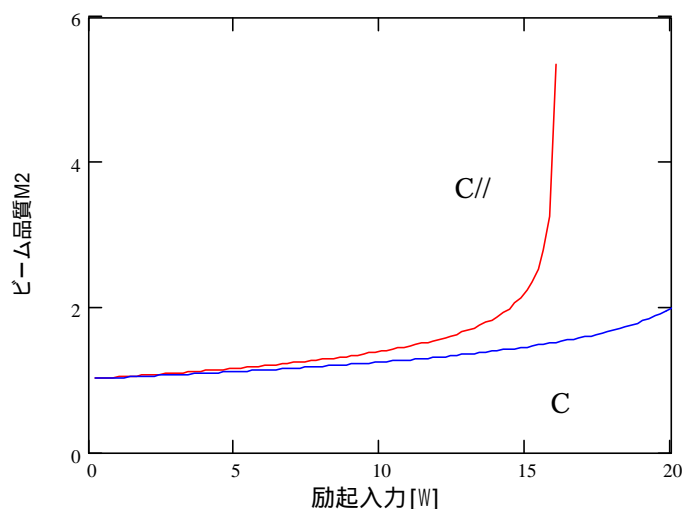


図7 励起出力に対するビーム品質特性の変化計算結果

この結果から、高励起入力時にはビーム品質が劣化することが考えられる。この計算結果を踏まえて、励起光学系のレンズ位置を微調整しながら最適な励起系を見いだす事とする。

3.1 基本波共振器発振実験

前節における計算結果を用いて、ミラーM2 ~ 0.C.の間隔 d_1 を 50mm、40mm、35mm と変化させた場合のビームパターンを表 1 及び出力特性を図 8 に示す。因みに、Nd:GdVO₄ に対する励起光学口径の大きさは計算から 350 μm になるよう励起した。

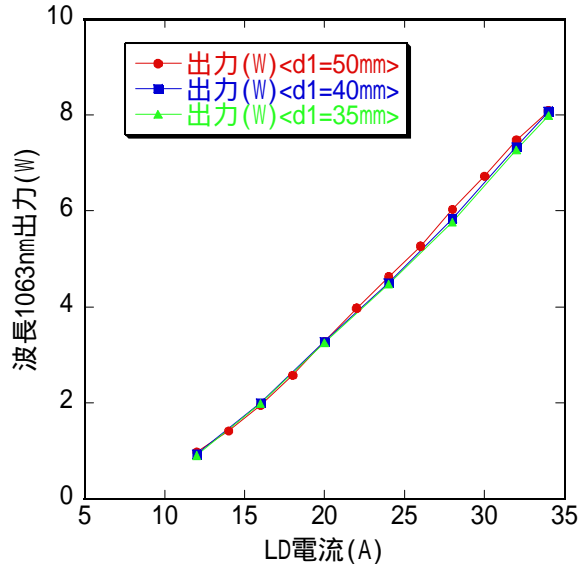


図 8 ミラーM2 ~ 0.C.の間隔変化による出力特性

表 1 励起入力に対するビームパターンの変化

(a) $d_1=50\text{mm}$ でのビームパターン

電流値(A)	12(A)	16(A)	20(A)	24(A)	28(A)	32(A)	34(A)
Beam Pattern							
出力(W)	0.978(W)	1.949(W)	3.28(W)	4.62(W)	6.03(W)	7.47(W)	8.09(W)

(b) $d_1=40\text{mm}$ でのビームパターン

電流値(A)	12(A)	16(A)	20(A)	24(A)	28(A)	32(A)	34(A)
Beam Pattern							
出力(W)	0.928(W)	1.998(W)	3.02(W)	4.5(W)	5.84(W)	7.33(W)	8.07(W)

(c) $d_1=35\text{mm}$ でのビームパターン

電流値(A)	12(A)	16(A)	20(A)	24(A)	28(A)	32(A)	34(A)
Beam Pattern							
出力(W)	0.909(W)	1.989(W)	3.25(W)	4.47(W)	5.77(W)	7.26(W)	7.98(W)

図8の結果から、O.C.の移設に伴う共振器内部のエネルギー密度変化による出力低下や不安定発振が考えられたが、出力は殆ど変わらずスローブ効率 = 47% (ランダム偏光入力に対して)を得た。また、前節では高励起入力時にビーム品質が悪化することが計算から求まっていたが、実験でも高励起入力時にビームパターンが歪んでしまうことが確認できた。しかし、出力に関してはグリーンレーザー出力に必要な基本波出力 8W の目標値を達成することが出来た。表1において示したビームパターンは、O.C.出射端面から 50cm 自由伝搬させた時のビームパターンである。しかし、内部波長変換を行なう際には共振器内部でのモードパターンが実際にはどのようなになっているのか知る必要がある。次に、この基本波 CW 共振器内部の O.C.直後のビームパターンを CCD で測定する事とした。測定光学系は、図9に示す。

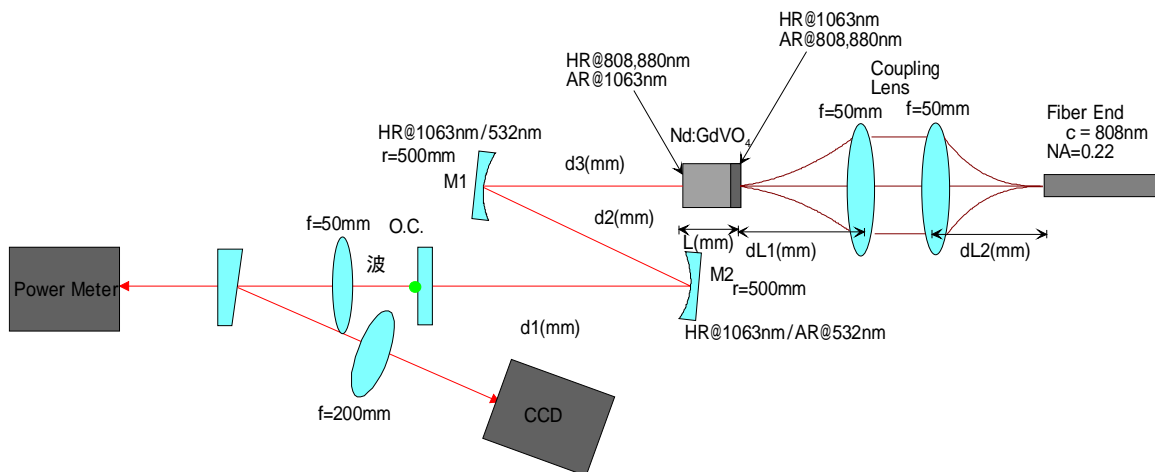


図9 O.C.出射端面直後のビームパターン測定光学系

図9に示すようにビームパターン測定光学系を組む際ここでは、ビームパターンの大きさを考慮して CCD には4倍に拡大したビームパターンが映し出されるように設定した。表2に、ビームパターンを示した。

表 2 O.C. 出射端面直後のビームパターン出力特性

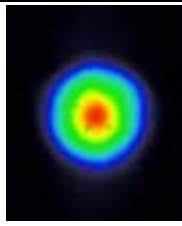
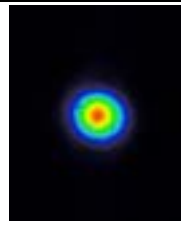
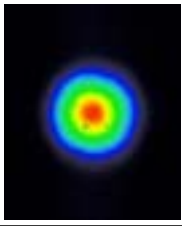
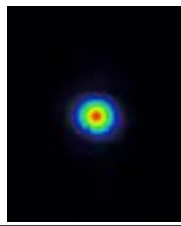
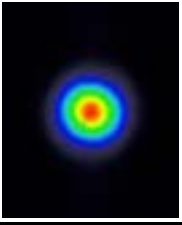
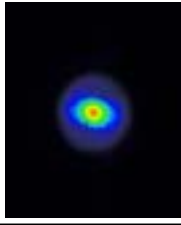
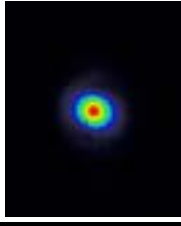
電流値(A)	出力(W)	パターン	電流値(A)	出力(W)	パターン
16A	2.089		28A	5.58	
20A	3.15		32A	7.1	
24A	4.3		34A	7.83	
				7.93	

表 2 に示すように、出射直後のビームパターンは、TEM₀₀ モードと言えるパターンを得ることが出来、内部波長変換を行なう際にはビームパターンとして良好であると言える。34A の投入電流に対して出力が 2 系統存在するのは、励起光学系の Focus Lens 設置位置を 0.1mm 移動させて 7.83W から 7.93W に出力を上昇させたからである。また、ビームパターンの大きさであるが計算では 400 μm にて励起した際、16W(吸収パワー14.4W=16W × 90%)の励起で基本波横モード半径が 120 μm(240 μm)になる。実験では 34A = 20.4W(吸収パワー14.28W=20.4W × 70%)の入力に対して、X:272 μm・Y:229 μm と測定され計算値と実験値の簡単な比較に、開発した計算シミュレーションは有用であることが確認できた。次に、光学定盤上で構築した本システムの規格化ピーク強度安定性を測定した。測定結果を図 10 に示す。

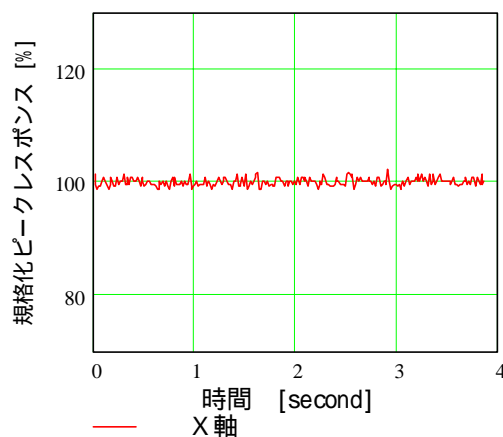


図 10 規格化ピーク強度安定性測定結果

18.8W の LD 励起入力に対して、基本波 CW 規格化ピーク強度安定性は $\pm 0.67\%$ と求まった。CW グリーンによる目標値の規格化ピーク強度安定性は、 $\pm 0.5\%$ 以下であるのでまだ基本波出力としては改善の余地があると言える。しかし、システムを筐体内に組み込むことで周囲の乱流を防いだり、温度制御を行なうことで温度擾乱の影響を小さくすることも出来ることが考えられる。

4. 光学定盤上での端面励起型内部共振器 2 倍波変換

4.1 波長変換結晶の最適設置計算

前節まで報告してきた、計算シミュレーション結果及び実際の基本波発振において得られた実験結果を基に、常温で波長変換を行なうことが出来る結晶 CPM Type LBO ($\theta = 90^\circ$ 、 $\phi = 11.4^\circ$) を用いて図 11 に示す光学素子配置図において CW グリーンレーザー出力実験を行なった。

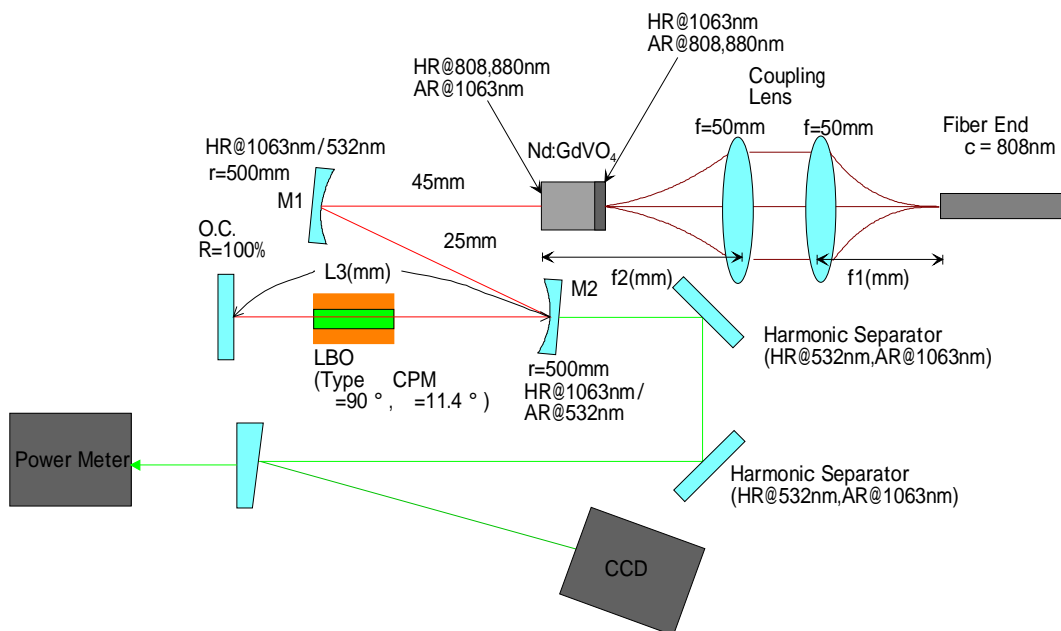


図 11 内部共振器型 2 倍波変換光学素子配置図

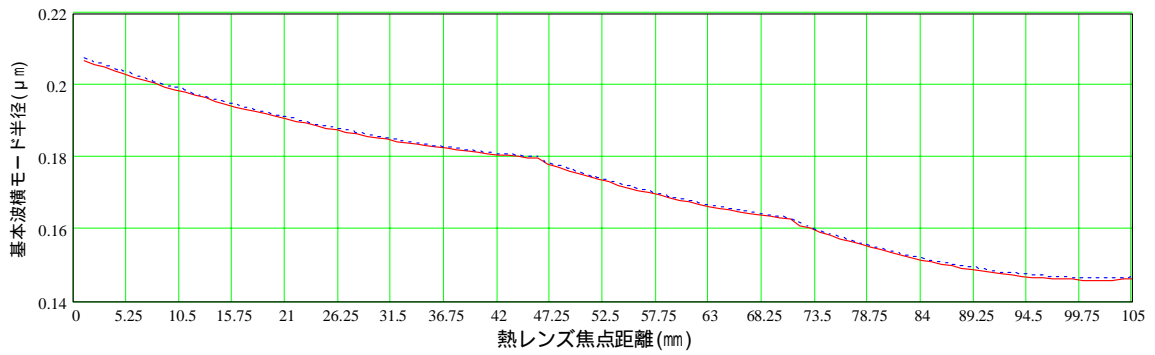
図 11 に示す光学素子配置において実験を行なうには、波長変換結晶である LBO を最適な設置位置つまり、高効率に波長変換を行える位置に設置する必要がある。その際、最も重要であるのは波長変換結晶を共振器内部に存在する基本波横モード半径が最小になる位置を見いだす事である。図 12 に図 11 に示す L3(mm)の間隔を 35mm、40mm、45mm、50mm とした場合の横モード半径の推移を示す。

計算シミュレーション条件：

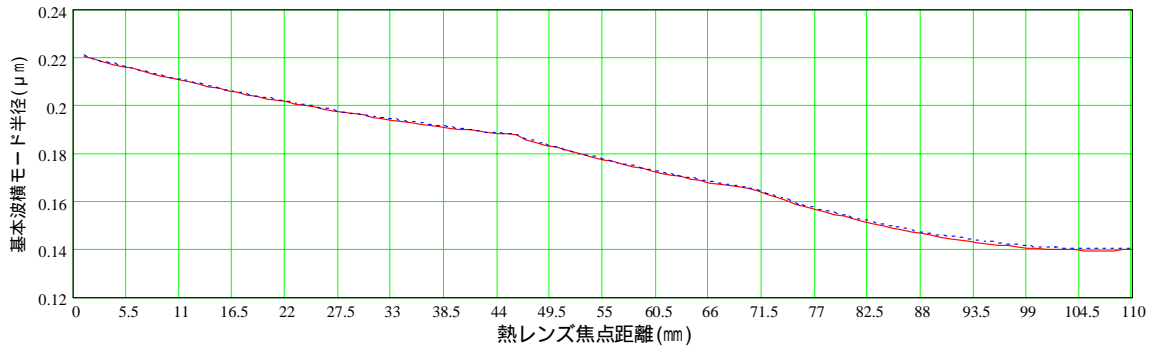
励起光口径 400 μm 、励起出力 18W(現状での最大 LD 出力)、

LBO 設置位置を O.C. から 1mm 離して設置

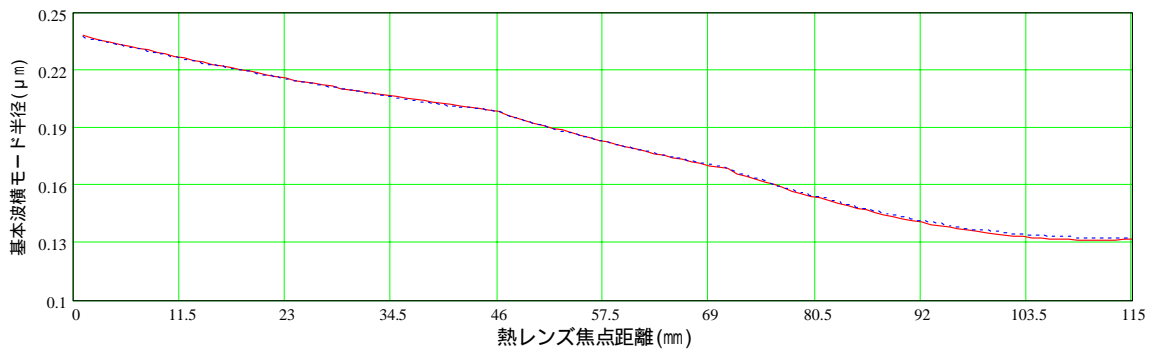
注意：X 軸は、0(mm)が HR@1063nm/AR@808nm 端面を表し、最終値は O.C. 端面を表す。



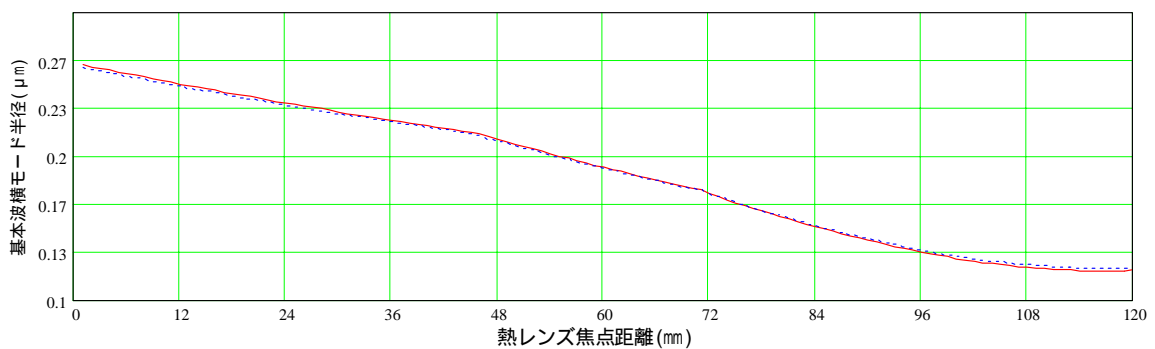
(a) L3=35mm の時の横モード半径推移



(b) L3=40mm の時の横モード半径推移



(c) L3=45mm の時の横モード半径推移



(d) L3=50mm の時の横モード半径推移

図 12 計算シミュレーションによる共振器長変化による基本波横モード半径の変化

この計算結果から分かったことは、L3 の間隔が伸びることで基本波横モード半径が小さくなっていることであり、図 12 に示す O.C. 端面 (Flat ミラー) での大きさは $150\mu\text{m}$ から $120\mu\text{m}$ まで変化することが分かった。また LBO を Flat ミラーに最接近させて設置した場合の計算シミュレーションであるが、その最接近位置から 5mm 程度遠ざけて設置しても基本波横モー

ド半径が大きく変わらないことも分かった。この計算結果を基に実際に、波長変換結晶である LBO を共振器内部に設置し共振器長を伸ばした時の安定出力が得られる電流値 12A(基本波出力では 1 W を確認)において、2 倍波変換(SHG : Second Harmonic Generation)出力の特性を図 13 に示す。

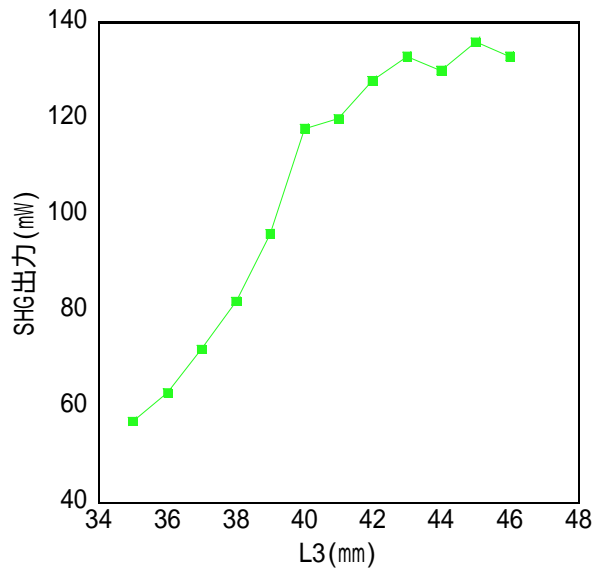


図 13 L3(mm)変化による SHG 出力特性

図 13 に示す実験結果は 14(mm)離れた時のものであるが、計算シミュレーションと同様に L3 の間隔が伸びることにより基本波横モード半径が小さくなる。このことにより、SHG 変換効率が基本波集光強度に比例して出力が上昇したと考えられる。

4.2 励起入力を高めての 2 倍波変換

次に、この結果を受けて 34A 付近での SHG 出力の高出力化を図るために、光学素子への損傷を防止する意味でしなかった微調整を施してみた。その時の遠視野ビームパターンを表 3 に、入出力特性を図 14 に、及びビーム品質を表す M^2 値測定結果を図 15 に示した。

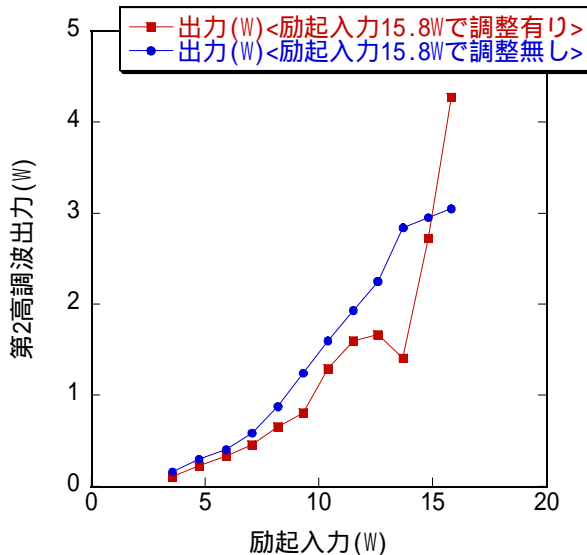


図 14 2 倍波入出力特性

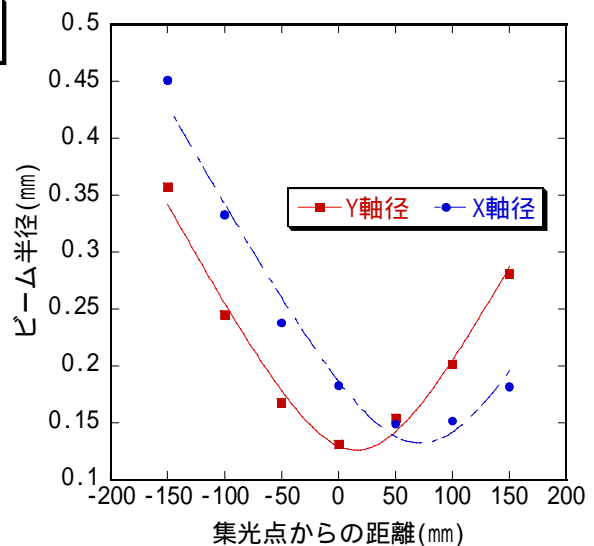


図 15 ビーム品質 M^2 測定結果

表 3 M1 ミラーに平面ミラーを用いた SHG 出力ビームパターン

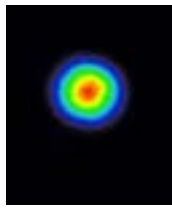
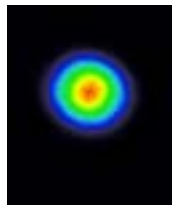
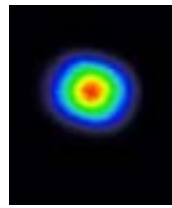
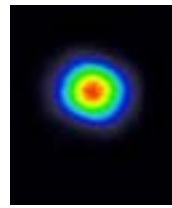
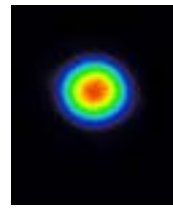
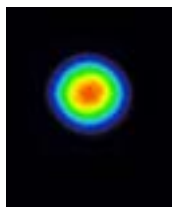
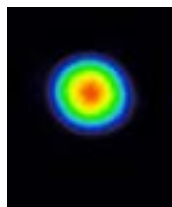
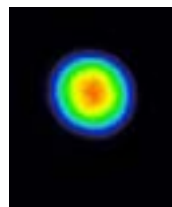
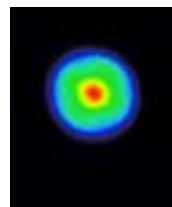
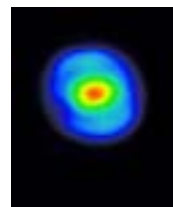
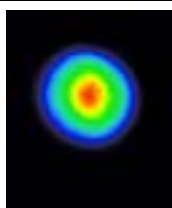
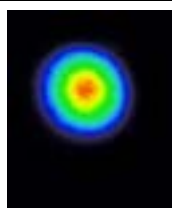
電流値	12A	14A	16A	18A	20A
パターン					
備考	マウント微調整無し				
電流値	22A	24A	26A	28A	30A
パターン					
備考	マウント微調整無し				
電流値	32A	34A			
パターン					
備考	34AのみM1/M2微調整有り				

図 14 から LD 電流 34A(励起入力 15.8W)という高い光入力領域で共振器を構成する光学素子マウント調整すると、2 倍波出力 4.34W を得た。従来では調整した電流値ごとに共振器の光学素子マウントを微調整し出力を得るようにしていたためビームパターンは励起入力領域全域に渡り TEM₀₀ のように見えている。しかし表 3 では、LD 電流 26A 以降の光入力領域でパターンが崩れてしまうがそれをあえて無視して、LD 電流 34A という一つ高い光入力領域で調整することで、Ti:Sapphire 発振器を励起するのに必要とされる 4W 以上の 2 倍波出力を得た。この得た 2 倍波出力の変換効率は、基本波発振出力が 8.13W から考えると 53%と求まり、およそ限界近くの変換効率を得たことになる。またビーム品質は図 15 を見ても分かるように $M^2_x < 1.44$ 、 $M^2_y < 1.43$ を得た。このビーム品質はまだ調整の範囲内であり、更なる高ビーム品質が狙えると考えている。

次に、この光学定盤で得られた SHG 出力の規格化ピーク強度安定性(CCD カメラで捉えたビームパターンを 1 フレームごとにピーク強度を平均化し、その値よりどれだけ各ビームパターンのピーク強度が変動しているかを数値化したもの)を測定した。その測定結果を図 16、またビーム角度安定性及び発散角の測定結果を表 4 に示した。

表 4 ビーム発散角とビーム角度安定性測定結果

ビーム発散角 X 軸(μ rad)	307	ビーム角度安定性 X 軸(μ rad)	4.62
ビーム発散角 Y 軸(μ rad)	276	ビーム角度安定性 Y 軸(μ rad)	11.92

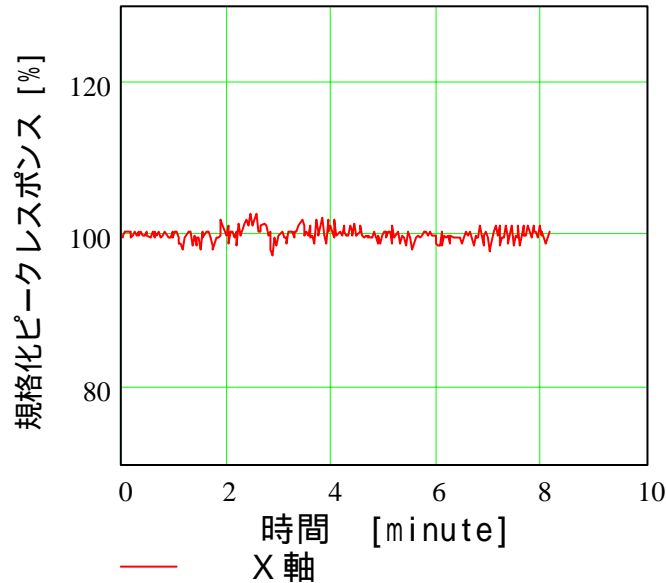


図 16 規格ピーク強度安定性<LD 電流 34A、SHG 出力最大時>

図 16 から得られた規格化ピーク強度安定性測定結果は $\pm 0.87\%$ であった。以前に開発したことのある Nd:YAG 側面励起方式の CW グリーンレーザーの規格化ピークレスポンスが $\pm 3.21\%$ であったので、それを上回る結果であった。また、ビーム角度安定性は目標値としていた $10 \mu\text{rad}$ 近くを達成することが出来た。

4.3 Ti:sapphire 発振器励起

次に、この 2 倍波変換出力を 4W 程度に調整をして、SESAM を用いた Ti:sapphire 発振器に導光して励起を行なった。その際、モード同期光出力は、約 15mW を得て繰り返し周波数は 101MHz を得た。オシロスコープで測定した波形を図 17 に示す。

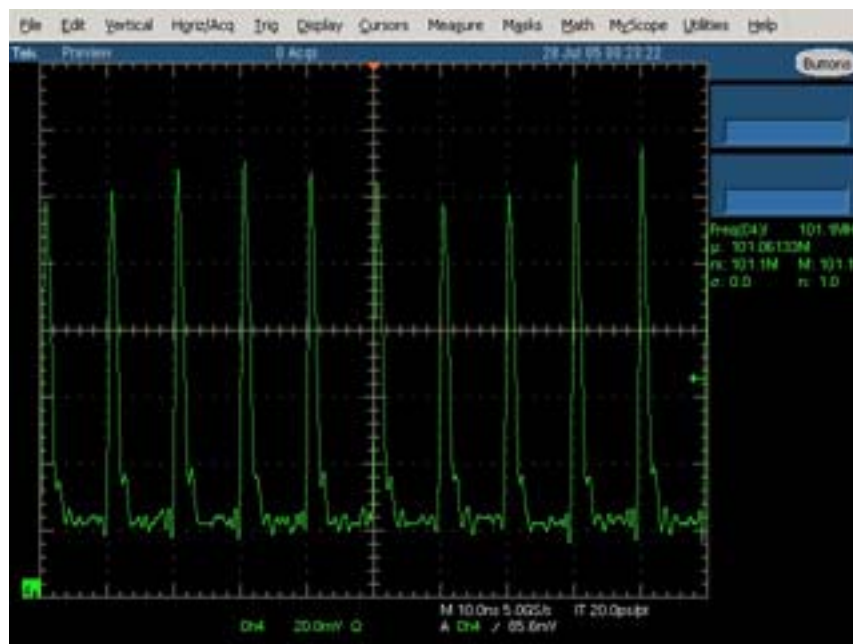


図 17 オシロスコープにて測定したモードロック時間分解波形

5. 小型筐体 CW グリーンレーザー発振に向けて

5.1 励起光学系最適化

光学定盤上に構築された端面励起 CW グリーンレーザーは、図 10 に示すように 2 枚の球面レンズ $f=+50\text{mm}$ を 1:1 の像転送光学系を構築しレーザー媒質である $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ に励起を行なっている。しかしこれでは、レーザー筐体よりも励起光学系筐体のほうが大きくなってしまふことと、励起安定性に欠ける点から、励起口径の大きさを比較的簡便に調整することの出来る非球面レンズを用いて小型筐体端面励起 CW グリーンレーザーを励起する手段としている。図 18 に励起口径の測定光学系を、表 5 に測定結果を示す。

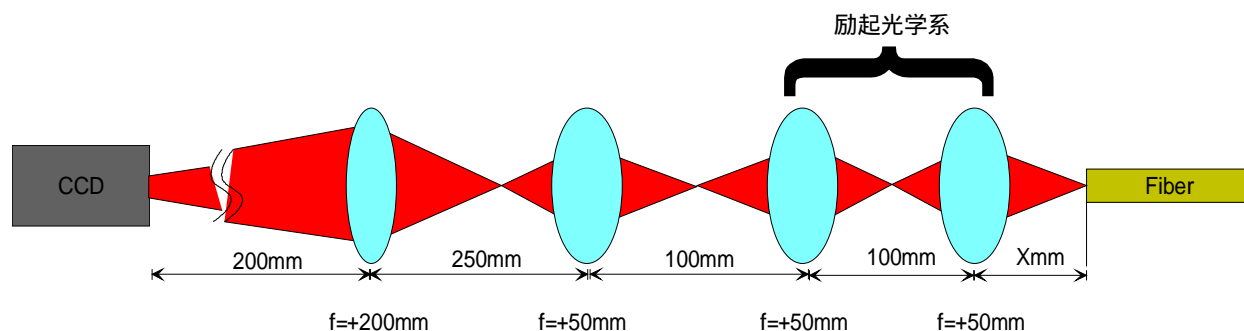


図 18 球面レンズの場合の励起光学系測定系配置図

図 18 に示すような測定光学系を組み立て、励起光学系と示されている部分を非球面レンズに置き換えるなどして、 $X\text{mm}$ を任意に変化させて励起口径を調整できるようにした。

表 5 励起口径

励起光学系種類	励起光学系とファイバー出射端間隔 X	励起口径		パターン
		X軸	Y軸	
$f=+50\text{mm}$ 単レンズ	49.5mm	627 μm	545 μm	
非球面レンズ	4.57mm	330 μm	338 μm	取得パターン無し

表 5 に示す励起口径が得られた。 $f=+50\text{mm}$ の球面レンズにはファイバーコア径 $300\ \mu\text{m}$ を、非球面レンズにはファイバーコア径 $400\ \mu\text{m}$ を用いた。それぞれ開口数 $\text{NA}=0.2$ のファイバーを用いているのであるが、集光径には大きな差が生まれた。

5.2 小型筐体端面励起共振器による基本波発振実験について

次に図 19 に示すような光学素子配置で、試作した小型筐体端面励起基本波発振実験を行なった。用いた励起光学系は、前節で報告した非球面レンズを用いた。光学定盤上で励起した励起口径より小さな $330\ \mu\text{m}$ での励起になるが、ファイバー出射端と励起光学系の間隔を任意に変化させることが可能であるので励起口径の調整は可能である。この時の測定結果のビームパターンを表 6 に、波長 1063nm の出力特性を図 20 に示す。

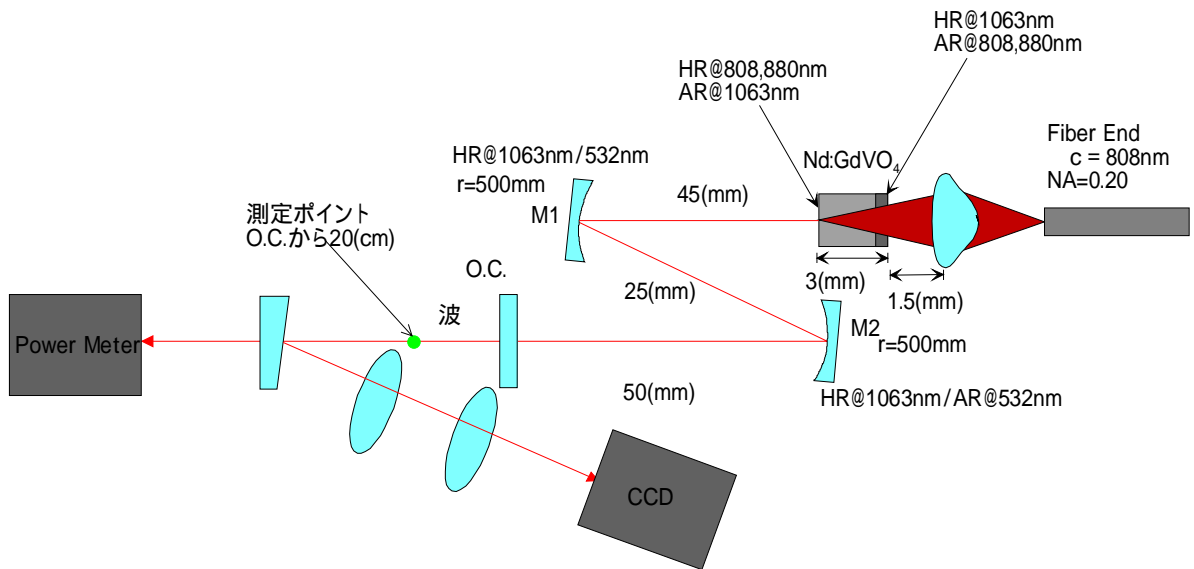


図 19 小型筐体端面励起基本波発振実験光学配置図

表 6 波長 1063nm 出力ビームパターン

電流値	12A	14A	16A	18A	20A
パターン(O.C.より20cm離れたところの像転送)					
備考	励起系=マイクロメータ:13.60mm<12A ~ 28A>				
電流値	22A	24A	26A	28A	30A
パターン(O.C.より20cm離れたところの像転送)					
備考	励起系=マイクロメータ:13.00mm<30A>				
電流値	32A	34A	36A		
パターン(O.C.より20cm離れたところの像転送)					
備考	O.C.と励起系の上下左右微調整				

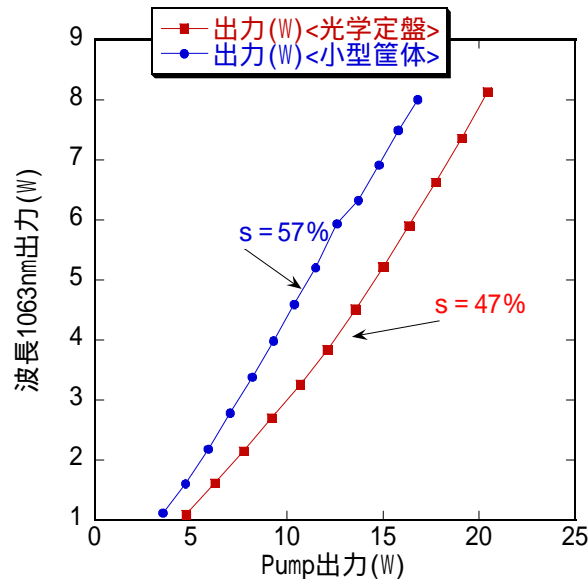


図 20 波長 1063nm 出力特性

非球面レンズを用いた励起光学系では、計算で求めた基本波横モード径 $500\ \mu\text{m}$ 以上に対し $330\ \mu\text{m}$ で励起していることになる。ただ実験では、Nd:GdVO₄ に対して励起光学系を少し前後に微調整して励起することになるので、この数値以上の励起口径で励起していることになると思われる。また、図 20 に示すようにスロープ効率が 47% から 57% に上昇した。これが表すのは、ある程度励起口径を微調整することが簡便になったために、従来の球面レンズを用いた励起光学系よりも励起効率の高い励起口径に調整及び励起できたことを示している。これにより、光学定盤上においてよりも少ない入力で、同等の基本波出力の 8 W を得た。

5.3 小型筐体における 2 倍波出力安定性について

次に、小型筐体において図 21 のような光学素子配置をし、2 倍波変換を行なった。CW グリーン出力の入出力特性を図 22 に示す。

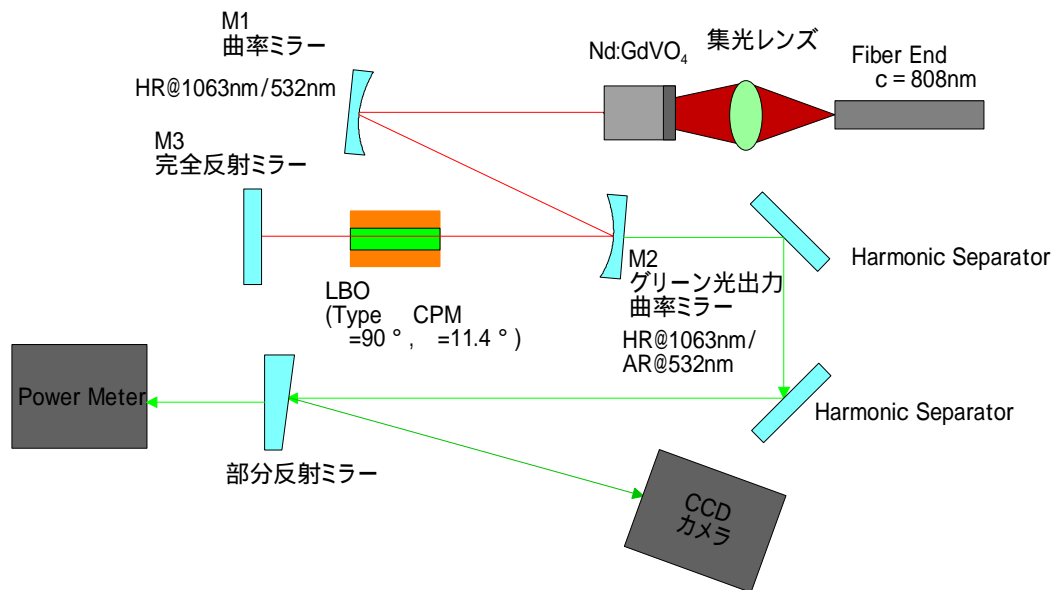


図 21 小型筐体 2 倍波変換時の光学素子配置図

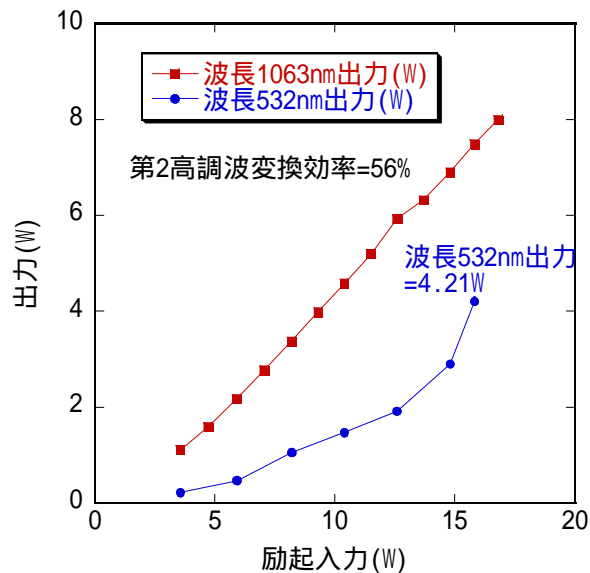


図 22 2倍波変換(波長 532nm)入出力特性

図 21 から見て分かるように、LD 投入電流 34A(励起入力 15.8W)において波長 532nm 出力は、4.21W を得た。この励起入力では基本波(波長 1063nm)出力 7.48W を得ているので、光学定盤上において得られた波長 532nm 出力を 0.52W 低い励起入力でも同等の CW グリーン 出力を得たことになる。この時の基本波から 2 倍波へ変換したときの変換効率は 56% と求まる。

次に、CW グリーン 4W 以上の出力領域での長期安定性を測定した。規格化ピーク強度安定性の測定結果を図 23 に、ビーム角度安定性を図 23 及び出力安定性を図 24 に示し、得られた仕様について表 7 に示す。

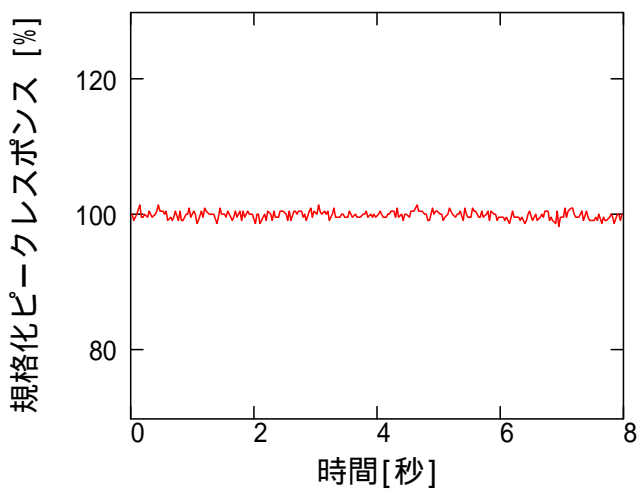


図 23 規格化ピーク強度安定性測定結果

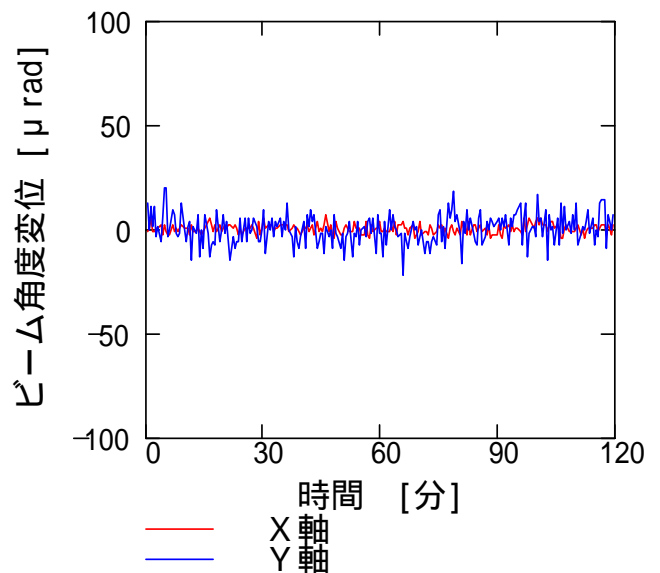


図 24 ビーム角度安定性

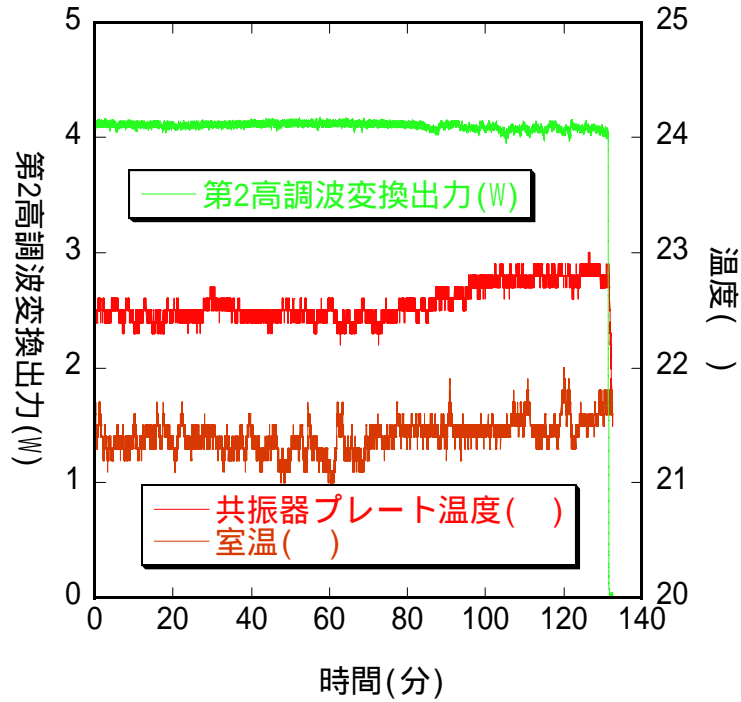


図 25 2 倍波変換出力長期安定性及び温度特性

表 7 CW グリーン小型筐体システム仕様

出力 W	4.3W
波長 nm	532nm
ビーム拡がり角(全角) mrad	<0.3mrad
M ² 値	TEM ₀₀ <1.4
ポインティングスタビリティ μ rad	<8 μ rad/
ピークレスポンス %	< \pm 0.62%rms
出力安定性(> 2h) %	< \pm 0.44%
偏光	単一偏光 > 100:1
ウォームアップ時間 分	< 20
ヘッドサイズ(H×W×L)(mm ³)	56 × 71 × 130

長期出力安定性は、波長 532nm で出力 4.1W の運転において立ち上がり 20 分後から 2 時間以上の測定で \pm 0.44%、短時間での規格化ピーク強度安定性は \pm 0.62% を得た。ビーム角度安定性(ポインティングスタビリティ)は、目標としていた 10 μ rad を上回る安定性の 8 μ rad 以下を得た。本研究において開発した小型筐体の CW グリーン出力時の様子を図 26 に示す。

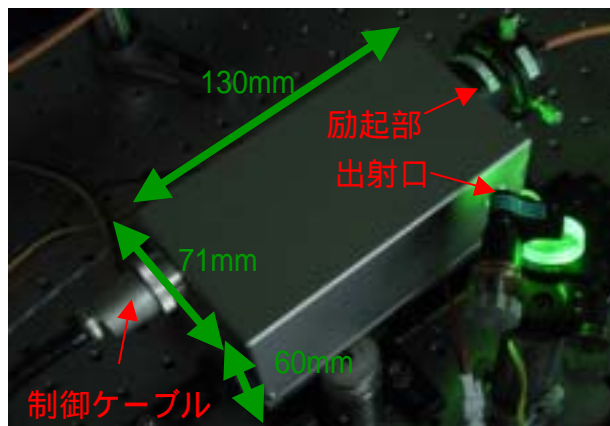


図 26 小型筐体システム写真

6. 光学素子固定に既製品マウントを用いた小型筐体開発について

次に、既製品マウントを用いた小型筐体 CW グリーンレーザー開発を行なった。開発に至る経緯は、ファイバー端からの励起光をレーザー媒質である Nd:GdVO₄ に入射させたり、入射させなかったりすることで出力再現性が取れなくなった。この原因の一つとして共振器プレートの制御温度を確認してみた所、制御温度が 2 近くずれると光学素子マウントが温度歪みにより調整がずれてしまい、共振器調整無しでは出力再現を果たさなくなることが確認できた。その測定結果は図 27 および図 28 に示す。

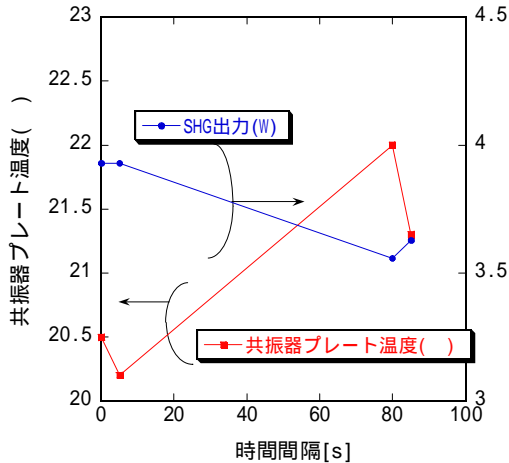


図 27 制御温度を上昇させた時の出力特性

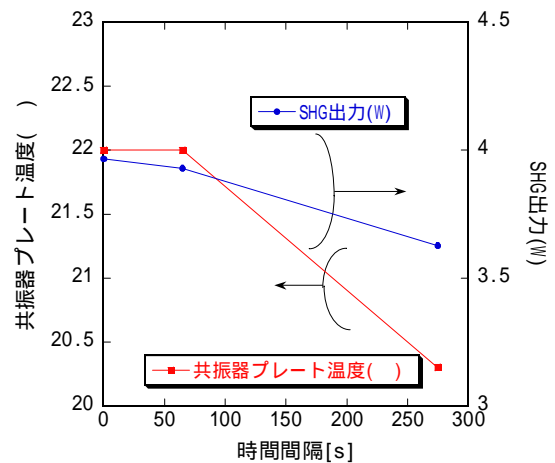


図 28 制御温度を下降させた時の出力特性

この測定結果を受けて、共振器外部の環境温度やプレート制御温度に大きく影響を受けない筐体開発を行なった。本節で開発した小型筐体は、既製品マウントを使用することで微調整を行ないやすくしただけでなく、レーザー出力に大きく影響を与える共振器を支えるプレートの温度制御ふらつきによる伸縮の影響をなるべく防ぐマウント構成を行なった。開発した小型筐体の長期出力安定性測定結果を図 29 に示す。

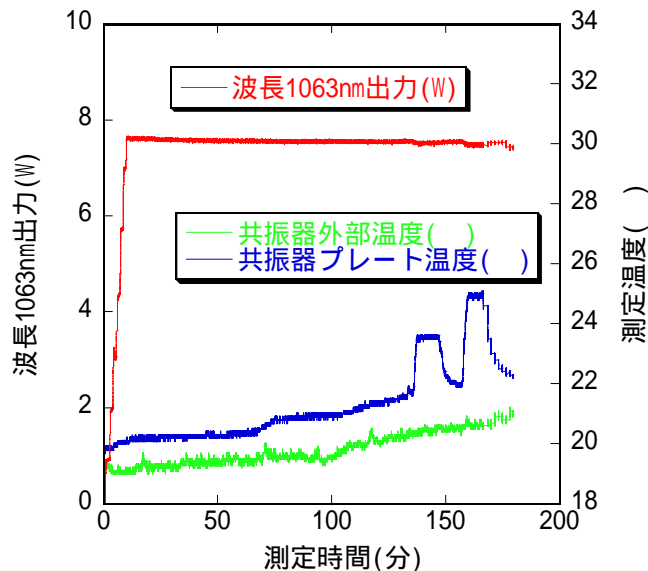


図 29 制御温度に対する長期出力安定性

図 29 に示すように、基本波出力を 7.6W に調整後、環境温度を約 1.7 変化させ且つ、プレート制御温度を 3.5 上下させても長期出力安定性は、波長 1063nm 出力において立ち上げ 10 分後から測定終了の 3 時間後までで $\pm 0.469\%$ rms を得た。これにより、2 倍波出力開発においても改善が図られることになる。

7. まとめ

・ファイバーカップリング空冷制御LDについて

Nd:GdVO₄の吸収帯域の808nm(吸収係数 $14.96\text{cm}^{-1}<C$ 軸成分)もつ吸収帯域が808nmを中心としてC軸でもa軸でも4nm以上もある。どの波長を中心とし励起を行なうと効率良く励起エネルギーが吸収されるか計算を行なった。結果、励起の中心波長が808nmから-2nmずれると吸収割合は70%にまで落ち込んでしまう事が分かった。また吸収波長に合致する波長域では90%以上の吸収割合を保てる。ファイバーカップリングペルチェ冷却型空冷LDの仕様は、中心波長を806nm~808nmにて調節が可能となっている。また、レーザー媒質を励起する際重要なパラメータであるスペクトル幅は、1.0nm~2.1nmにて発振していることを確認。また、出力はLD運転電流推奨値内では1.27W~17.8Wまで出力を確認した。これは、レーザー媒質のNd:GdVO₄を励起する上で効率良く励起することの出来る値であることが、確認できた。

・共振器設計の最適化

ABCD行列計算を用いることで共振器の安定性や基本波による横モード半径の特性を評価した。まず、Nd:GdVO₄に対する励起口径の大きさを、変化させた場合における、最適なO.C.の設置位置の違いすなわち、共振器長の変化における基本波横モード半径の違いについて検討を行なった。モードマッチング効率及び利得を考慮した場合励起光学口径を400 μm くらいにすると良いことが分かった。その際には、試作機のマウントの関係上内部波長変換結晶を設置することも含めると最短では $d_1 = 35\text{mm}$ が適当と考えられる。

・基本波共振器発振実験

図5に示すようにミラーM2~O.C.の間隔 d_1 を50mm、40mm、35mmと変化させた場合のビームパターンを表1及び出力特性を図8に示した。結果は、出力は殆ど変わらずスロープ効率=47%(ランダム偏光入力に対して)を得た。また、前節では高励起入力時にビーム品質が悪化することが計算から求まっていたが、実験でも高励起入力時にビームパターンが歪んでしまうことが確認できた。しかし、出力に関してはグリーンレーザー出力に必要なとされる基本波出力8Wの目標値を達成することが出来た。またビームパターンは表2に示すように、出射直後のビームパターンは、TEM₀₀モードと言えるパターンを得ることが出来、内部波長変換を行なう際にはビームパターンとして良好であると言える。短時間測定におけるビーム出力安定性を示す、規格化ピーク強度安定性は $\pm 0.67\%$ であった。

・光学定盤上での端面励起型内部共振器2倍波変換

2倍波変換出力において4.34Wを得た。これは、LD電流34Aという高い光入力領域で共振器を調整することでTi:Sapphire発振器を励起するのに必要とされる4W以上の2倍波変換出力を得たことになる。この2倍波変換出力を4W程度に調整をして、SESAMをもちいたTi:sapphire発振器に導光して励起を行なった。その際、モード同期光出力は、約15mWを得て繰り返し周波数は101MHzを得た。

・小型筐体CWグリーンレーザー発振に向けて

光学定盤上では球面レンズを用いて励起をしていたが、小型筐体には大きな励起光学筐体となり安定性に欠けるので、非球面レンズを用いた励起光学系を励起手段として採用した。これにより、光学定盤上においてよりも少ない光入力で、同等の基本波出力8Wを得た。(スロープ効率47%から57%に上昇。)Type CPM LBOを用いて内部波長変換を行ない、LD入力15.8Wおよび基本波出力(波長1063nm)8Wの状態において2倍波変換出力(波長532nmの出力)4.21Wを得た。これにより、励起光から2倍波変換出力への変換効率は27%、基本波から2倍波変換出力への変換効率は56%を得た。また、Ti:sapphire発振器を励起する際、重要な指標となるビーム角度安定性は $< 8\mu\text{rad}$ (目標値 $< 10\mu\text{rad}$)・短時間ビーム強度安定性 $\pm 0.62\%$ (目標値 $< \pm 1\%$)・電源投入20分後の長時間出力安定性 $\pm 0.44\%$ (目標値 $< \pm 0.5\%$)という測定結果を得た。(2倍波変換出力4.1Wにて)

・光学素子固定に既製品マウントを用いた小型筐体開発について

次に、既製品マウントを用いた小型筐体CWグリーン開発を行なった。本開発により、ファイバー端からの励起光入力を入射させたり、入射させなかったりすることでプレート温度が2 $^{\circ}\text{C}$ 近くずれると共振器調整無しでは再現を果たさなくなる。この現象を考慮した温度擾乱に大きく影響を受けない小型筐体を開発した。開発の結果、環境温度を約1.7 $^{\circ}\text{C}$ 変化させ且つ、

プレート制御温度を 3.5 上下させても長期出力安定性は、波長 1063nm 出力において立ち上げ 10 分後から測定終了の 3 時間後までで $\pm 0.469\%$ rms を得た。

(3) 主な成果

・光学定盤上にて 4.34W の出力を達成！Ti:sapphire 発振器を励起、モードロックを確認。繰り返し周波数 101MHz を測定。

・試作した小型筐体(レーザーヘッドサイズ 130mm × 71mm × 56mm)にて波長 532nm での出力において 4W 以上・ビーム角度安定性は $< 8 \mu\text{rad}$ (目標値 $< 10 \mu\text{rad}$)・長時間ビーム強度安定性 $\pm 1.1\%$ (目標値 $< \pm 1\%$)・電源投入 20 分後の長時間出力安定性 $\pm 0.44\%$ (目標値 $< \pm 0.5\%$) という測定結果を得た。

・試作した既製品マウントを使用した小型筐体にて波長 1063nm での出力安定性を $\pm 0.469\%$ rms 達成。またこの結果、プレート温度の影響を受けにくい筐体構造であることが確認できた。

論文件数： 1 プレス発表件数： 1

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

同じクラスの出力の市販品と比較して、開発した CW グリーンレーザー小型筐体のレーザーヘッド体積は約 10 分の 1 を実現。

実用化に向けた波及効果

Ti:sapphire 発振器の励起光源に限らず、各種欠陥計測や次世代ディスプレイ光源への応用が考えられる。

(5) 残された課題と対応方針について

製品化をするべく、更なる長時間安定性や高性能化を果たすべく、励起光源の最適化や制御部の高精度化を計ることを検討中である。