

< 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： Ti:Sapphire 励起用パルスグリーンレーザーの開発（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 松岡伸一、中野文彦、吉井健裕、佐藤方俊、玉置善紀、伊山功一、加藤義則

## （1）研究の概要、新規性及び目標

### 研究の概要

フェムト秒レーザー（レーザーA）の開発の中で、Ti:Sapphire レーザー前置増幅器用及び主増幅器用の半導体レーザー励起パルスグリーンレーザーの開発を行っている。レーザー媒質にはNd:YAG ロッドを用いており、また高出力で高ビーム品質を実現する為に、発振器と増幅器から構成されるMOPA方式を採用している。なおこのレーザーは低繰り返し(10Hz)で発振する。

### 研究の独自性・新規性

後述する高繰り返し(1kHz)のTi:Sapphire レーザー励起用半導体レーザー励起パルスグリーンレーザーは、出力・繰り返しとも現在市販されていない研究的要素の高いレーザーである。今回開発を行った低繰り返し(10Hz)のレーザーは、その高繰り返しレーザーに繋がる試験的なレーザーとしての位置づけであり、この開発過程において生じる諸問題を改善することにより、高繰り返しレーザーの開発の成功に繋がった。とりわけ高繰り返しレーザーでは、発熱による諸問題（ビーム品質の劣化等）が予想される為、あらかじめこの段階において問題点の洗い出し・改善方法の模索を行っていくことが重要である。

### 研究の目標

フェーズ：繰り返し 10Hz でパルスエネルギー100mJ 及び 250mJ の Nd:YAG パルスグリーンレーザーの開発。

フェーズ：繰り返し 10Hz でパルスエネルギー100mJ 及び 250mJ の Nd:YAG パルスグリーンレーザーの開発。

## （2）研究の進め方及び進捗状況

### 1. はじめに

ピーク出力 TW を有する Ti:Sapphire レーザーの増幅は、前置増幅器および主増幅器内に設置してある Ti:Sapphire 結晶を Q スイッチ YAG レーザーの第 2 高調波で励起する。各増幅器の励起に必要なエネルギーは 100mJ、500mJ 程度となる。単体の Nd:YAG ロッドから得られるエネルギーは限度があるため、ここでは、MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)方式を採用した。MOPA の概略図を図 1 に示す。発振器から得られたレーザー光を多段の増幅器で増幅することによって、より大きなエネルギーを得ることができる。しかし、パルスのエネルギー密度が大きくなると、Nd:YAG 結晶および構成光学部品に損傷を与える可能性があることから、これを避けるために各増幅器間に適当なビーム拡大器を設置してビーム径を大きくすることにより、エネルギー密度を減少させる。

本項では、MOPA 方式を用いた、LD 励起 Nd:YAG レーザーのシングルパスおよびダブルパスによる増幅特性試験、第 2 高調波への波長変換実験等を記述し、最終的に波長 532nm、1 パルスエネルギー 250mJ 級の励起レーザーを 2 台開発することを目標とする。

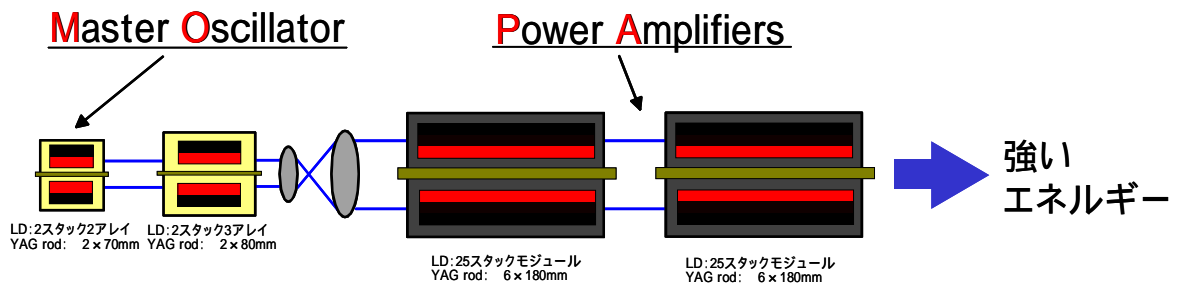


図1 MOPA システムの概略図

## 2. 発振器励起ヘッドの構成

LD から出射する励起光は図2 に示すように、セラミック製の拡散型励起キャビティに設けた3つのスリットからキャビティ内に導入される。ここで、セラミック製の拡散器（リフレクター）の反射率は95%、LD の中心波長は 808nm および Nd:YAG ロッドは 2mm x 70mm (0.6 at.%) である。また、LD 光は固有のビーム発散角を有しているため、スリット部を通過して励起キャビティ内へ導入される割合すなわち伝熱効率はスリット幅に依存し、スリット幅が広いほど伝熱効率は増加する。一方、励起キャビティ内での励起光の閉じ込め効果の観点からは、スリット幅が狭いほど閉じ込め効果は増大し、ロッドでの吸収効率は増加すると考えられる。

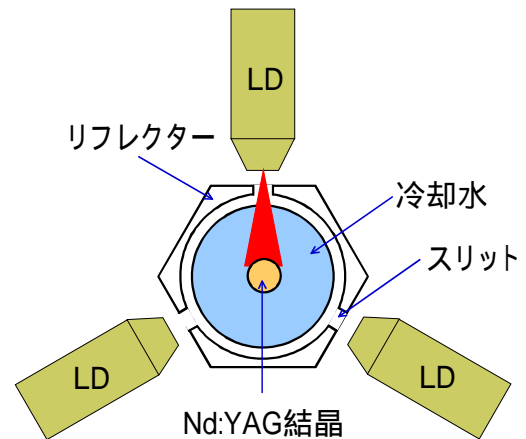


図2 MOPA 発振器のレーザーヘッド

そこで、伝熱効率と吸収効率の相互関係を考慮し、シミュレーションを行い最適なスリット幅を求めたところ、1.5~2.0mm 程度が最適であり、伝熱効率×吸収効率は50 数%程度であった。

## 3. MOPA 発振器の開発

LD および Nd:YAG ロッド、アウトプットカプラー、リアミラー、EOQ スイッチから成る共振器構成を図3 に示す。集光器を挟むように反射率=100%、曲率半径 10m の凸ミラーと透過率=50% の出力鏡を設置して CW 発振の確認を行った。次に、繰り返し周波数 10Hz で動作させるため、EOQ スイッチと  $\lambda/4$  波長板を共振器内に設置し、偏光成分を揃えるためにポラライザーを設置し、発振実験を行った。その結果、表1 に示す性能が得られた。図4 に発振ビームパターン、図5 にビーム品質を表す  $M^2$  の測定結果および図6 にピンフォトダイオードとオシロスコープで取得したパルス波形を示す。

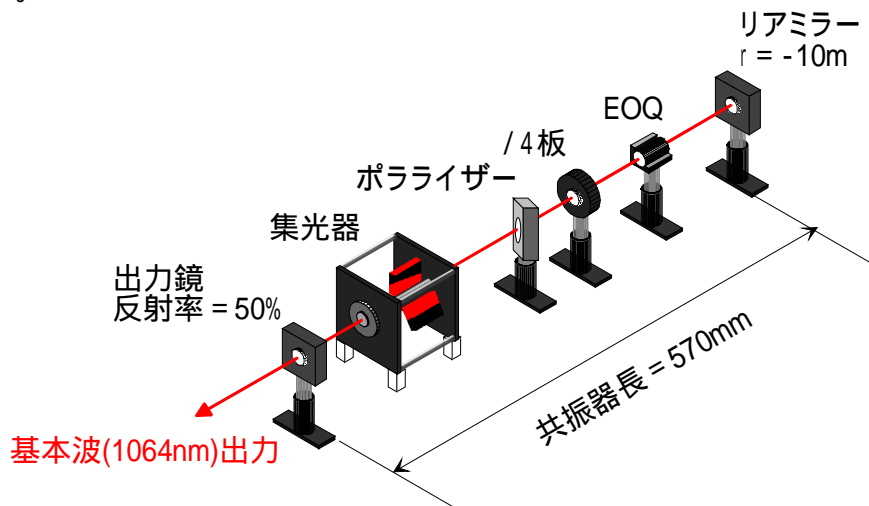


図3 発振器概観図

表 1 MOPA レーザー発振器性能

電流値	90A	
パルスエネルギー	7.1mJ	
パルス幅	15ns	
繰り返し周波数	10Hz	
M <sup>2</sup> 値	X	1.51
	Y	1.38

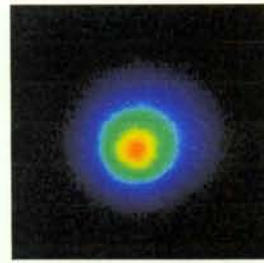


図 4 発振器出力パターン

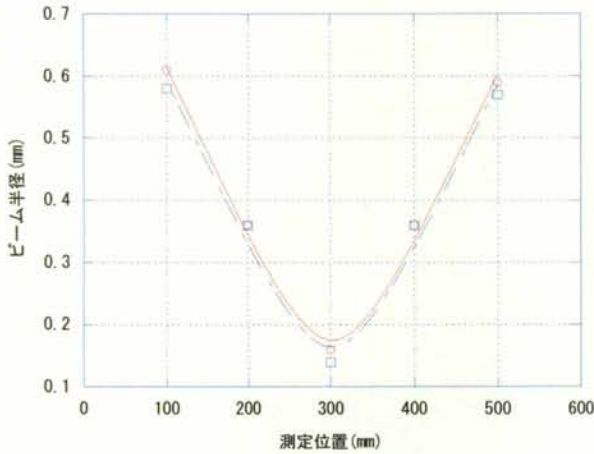


図 5 M<sup>2</sup> 値測定結果

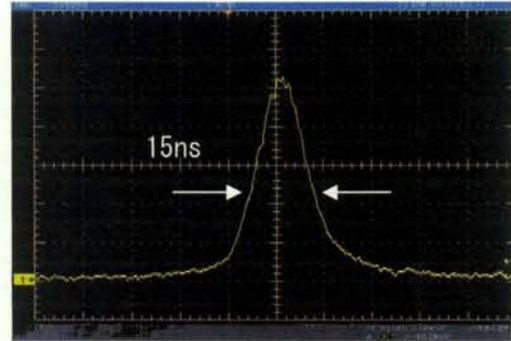


図 6 出力パルス波形

#### 4. 前置増幅器の増幅特性

発振器から発振されるレーザー光の、伝搬距離とビーム径の関係を調査したところ、発振されるレーザー光は拡がり角を有していた。そのため、この結果を考慮し、発振器からの延長線上の 0. C. 直後に前置増幅器の設置を行った。前置増幅器を設置した際の構成を図 7 に示す。前置増幅器の集光器構成は、発振器集光器構成と類似しており、80W-Peak、パルス幅 200  $\mu$ s、3 アレイで構成される LD を 3 方向から励起している。また、結晶は  $\phi$  2mm  $\times$  80mm の Nd:YAG 結晶 (0.6 wt. %) を用いている。

次に、前置増幅器における、電流-基本波出力の増幅特性を測定し利得評価を行った。(図 8) この際、発振器からの出力エネルギーは 6.1mJ である。また、前置増幅器内 LD 電流を 90A 一定にしておき、発振器と前置増幅器の励起タイミングを変化させた際の、増幅特性評価も行った。(図 9)

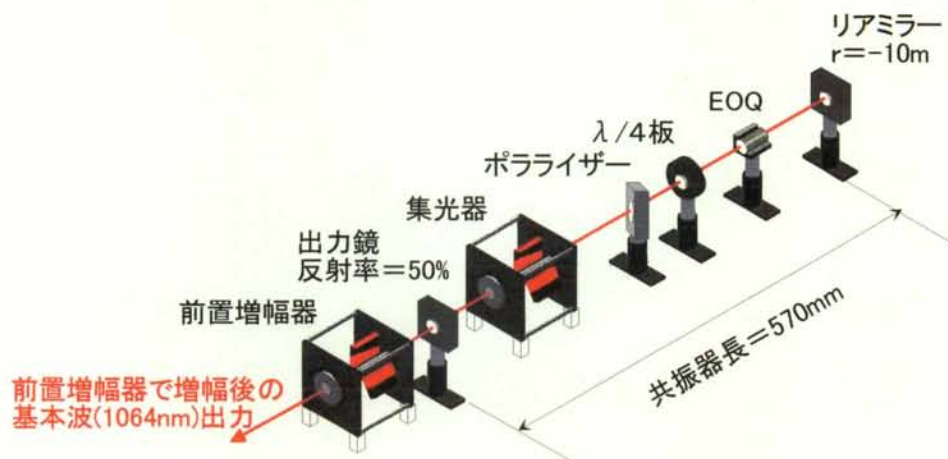


図 7 前置増幅器の配置

これらの結果、前置増幅器において発振器からの出力光を 3.3 倍の 20.4mJ まで増幅することができた。

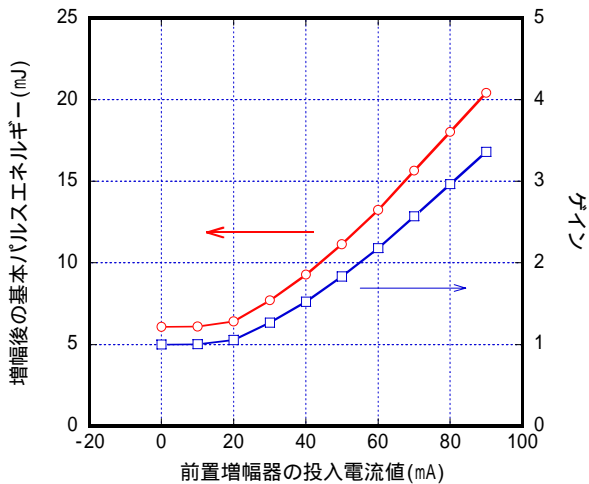


図 8 投入電流と増幅エネルギー

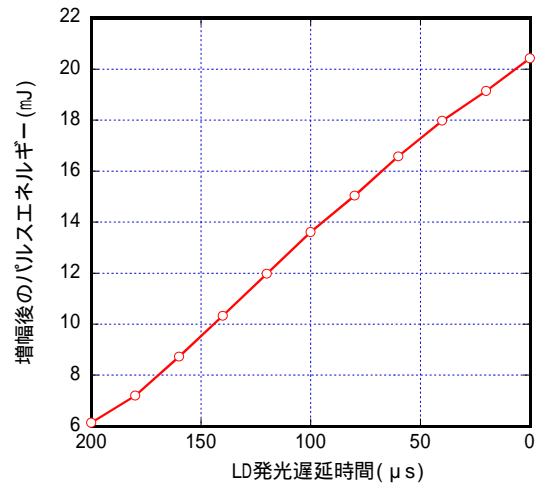


図 9 タイミング変化と増幅エネルギー

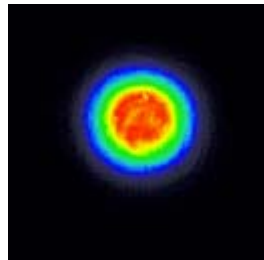


図 10 増幅後のビームパターン

## 5. 増幅器の増幅特性(シングルパス構成)

本節では、前置増幅器で増幅されたレーザー光のビームパターン内空間的不均一強度が、主増幅器で増幅されることにより増長されビーム形状が悪化すると考えられること、また、波長変換を行う上で、変換効率を向上するには、より短いパルスの波形が好ましいことから、発振器構成を変更し、その際の、主増幅器における増幅特性について記述する。

前置増幅器で増幅されたレーザー光は、ビーム拡大器を介して、主増幅器に導かれる。主増幅器の Nd:YAG ロッドを励起する LD(80W-Peak、75bar、25 スタック)を図 11 に示す。主増幅器は、この LD を 3 方向から励起する構造であり、LD に 80A の電流をかけた際の Nd:YAG ロッドでの蛍光分布を図 12 に示す。また、ここでの Nd:YAG ロッドは、6mm × 160mm を設置している。

前置増幅器で増幅されたレーザー光のビームパターン特性は、MOPA レーザーの主増幅器部での増幅特性を大きく左右する。そこで、発振器のリアミラーを曲率半径-10m の凸ミラーから、フラットミラーに変更し、また、共振器長を 31cm にすることにより、横モード TEM<sub>00</sub>、パルスエネルギー-6.3mJ、パルス幅 12.3ns が得られた。また、前置増幅器で増幅試験を行った結果、LD 投入電流 90A 時に出力エネルギー-20mJ が得られたため、曲率ミラーを設置していた際と同等の性能が再現していることを確認した。

そこで、図 13 に示す構成を配置し、発振器から出射するレーザー光を、主増幅器部 2 台の Nd:YAG ロッド中心に通過するように 2 つの折り返しミラーを用いて調節を行った。また、主増幅器部において高効率で増幅する為には、2 台の主増幅器内 Nd:YAG ロッドで回折が起こらないようビーム拡大器レンズ間隔を変化させ、伝搬するビーム径を調整する必要がある。表 2 にビーム拡大器レンズ間隔距離と主増幅器部から 420mm 離れた位置で CCD カメラにて測定したビーム径の関係を示す。

また、異なる伝搬ビーム径と増幅特性の関係を図 14 に示す。ここでの LD の投入電流は、発振器 72A、前置増幅器 90A および主増幅器 75A である。





図 11 主増幅器用 25 スタック LD

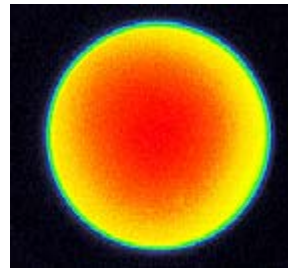


図 12 励起蛍光分布

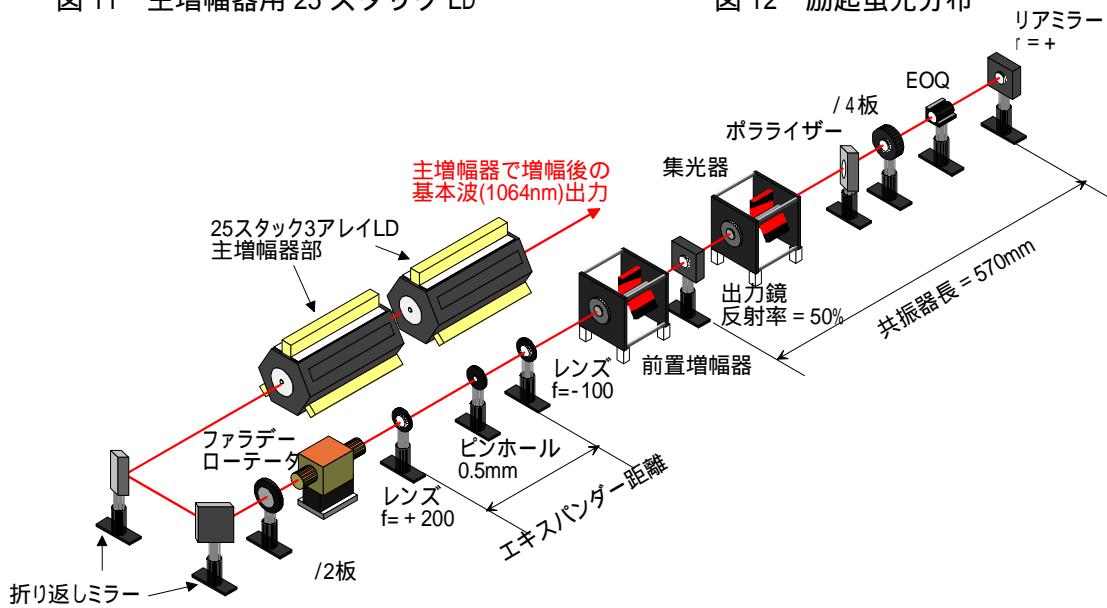


図 13 主増幅器（シングルパス）の構成

表 2 エクスパンダー距離とビーム径の変化

測定条件: 発振器投入電流 = 74A、  
前置増幅器 = 90A、2台の主増幅器 = 各

エクスパンダー距離 (mm)	CCDでのビームサイズ	
	X(mm)	Y(mm)
105	3.03	2.88
103	3.19	2.98
102	3.29	3.05
101	3.44	3.16
100	3.56	3.43
99	3.63	3.39
98	3.75	3.50
97	3.81	3.60
95	3.90	3.79
94	4.00	3.93

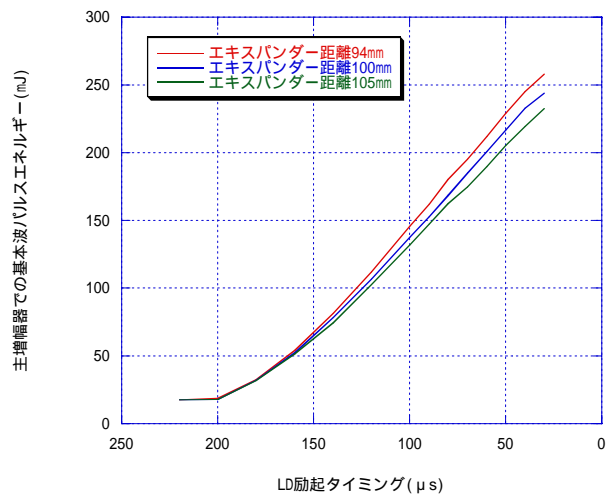


図 14 ビーム径変化によるパルスエネルギーの違い

主増幅器に入射する前のビーム拡大器内レンズ  $f=-100\text{mm}$ 、 $f=+200\text{mm}$  の間隔を変化させた際の増幅試験で、レンズ間隔距離が  $94\text{mm}$  の時にパルスエネルギー  $250\text{mJ}$  以上が得られた。また 2 台目の主増幅器から  $420\text{mm}$  の位置で観測したところビーム径の大きさは  $X:4.00\text{mm} \cdot Y:3.93\text{mm}$  で、増幅後のパルス幅は  $15.2\text{ns}$  そして、ビーム品質を示す  $M^2$  値は、 $X=2.1$ 、 $Y=1.9$  であった。(図 15)

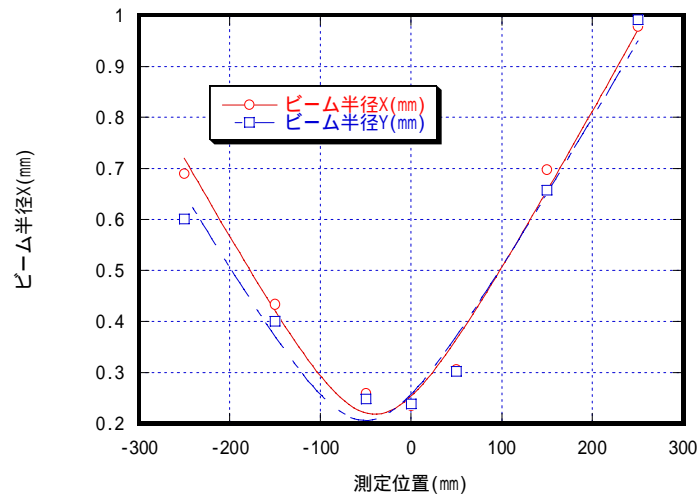


図 15 主増幅後の M<sup>2</sup> 値測定

## 5. 主増幅器ダブルパス時の増幅特性

シングルパスにて主増幅器で増幅されたビームを Flat、0° 反射ミラーで折り返して、再度 2 台の主増幅器に通してダブルパス増幅を行う。ダブルパスの構成を図 16 に示す。ここでの目標値は基本波でパルスエネルギー 500mJ を達成させることである。主増幅器内の 6mm YAG ロッドと折り返しミラーである Flat、0° ミラーとの間で寄生発振が生じる可能性が考えられたので、主増幅器の Nd:YAG ロッドの軸を発振器からの光軸から 1° 変位することで寄生発振の予防を行った。しかし、主増幅器の Nd:YAG ロッド径が 6mm と大きいことが原因と考えられ、寄生発振の防止には至らなかった。寄生発振の防止策として、主増幅器内 Nd:YAG ロッドを更に光軸から変位させることも考えられるが、Nd:YAG の有効径が小さくなること、ビームが縦長になる恐れがあることから、これ以上の変位は現実的には不可能だと考えられる。

次に、寄生発振防止策として、2 台ある主増幅器の間に 90 度ローテータの設置およびダブルパス用の折り返しミラー直後に 1/4 板の設置を行う等の対策を行ったが、寄生発振を防ぐことは出来なかった。そこで、折り返しミラーを主増幅器から 3m 以上離れた位置に設置し、主増幅器と折り返しミラー間に焦点距離  $f=+1m$  のレンズ対を用いたスペシャルフィルター (大気中) を設置した。

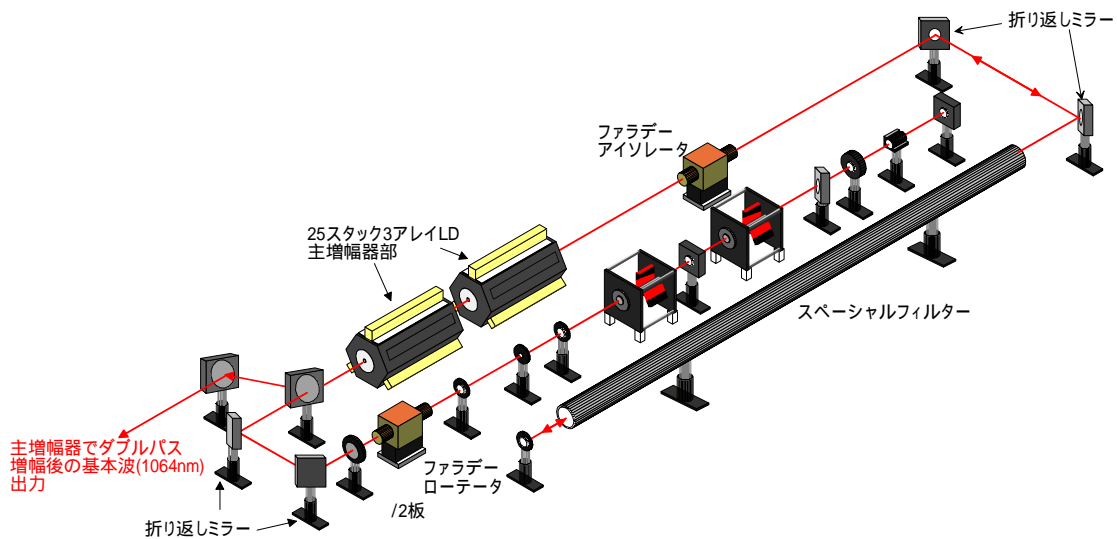


図 16 主増幅器のダブルパス構成

スペシャルフィルター内には、ビームパターンの高周波成分除去のためビーム集光位置に、2mm のピンホールを設置した。上述構成にて、増幅試験を行った。その際の各構成部電流値は、発振器 72A、前置増幅器 90A、主増幅器 80A で行った。増幅手順は以下の通りである。

発振器 LD 電流を 72A にする。  
 前置増幅器 LD 電流を 90A にする。  
 主増幅器と発振器のタイミングを 200 ~ 260  $\mu$ s ずらしておく。  
 主増幅器 LD 電流を 80A にする。  
 主増幅器のタイミングを徐々に 0  $\mu$ s に近づけ、  
 発振器タイミングに合わせる。

実験結果を図 17 に示す。発振器と主増幅器励起用 LD のタイミングが合っていない 190  $\mu$ s の状態で (タイミングを合わせた状態は 0  $\mu$ s) 186mJ の出力が観測され、寄生発振が生じていると考えられる。

寄生発振が発生している原因を調査するために、主増幅器 LD 電流を 80A および励起タイミングを 260  $\mu$ s に設定し、発振器および前置増幅器内 LD の電流値を 0A に設定した。この条件下で寄生発振が生じていることを確認し、寄生発振を共振する光学部品の選定を行ったところ、発振器アウトプットカップラーと折り返し Flat、0° ミラー間で共振されていることが分かった。

#### (ア) ビーム拡大器の変更

主増幅器に前置増幅器で増幅された基本波レーザー光を入射する前に、光学系の損傷を考慮し  $f=-100\text{mm}$ 、 $f=+200\text{mm}$  でビーム径を 2 倍に拡大している。これを、 $f=+150\text{mm}$ 、 $f=+300\text{mm}$  のレンズに変更し、 $f=+150\text{mm}$  レンズの焦点位置に 0.5mm のピンホールを設置した。ピンホールを設置することにより、寄生発振の抑制に期待ができる。また、余分な高周波成分が除去されビーム品質の改善も期待する。

レンズの配置と、その際のビームパターンを図 18 に示す。

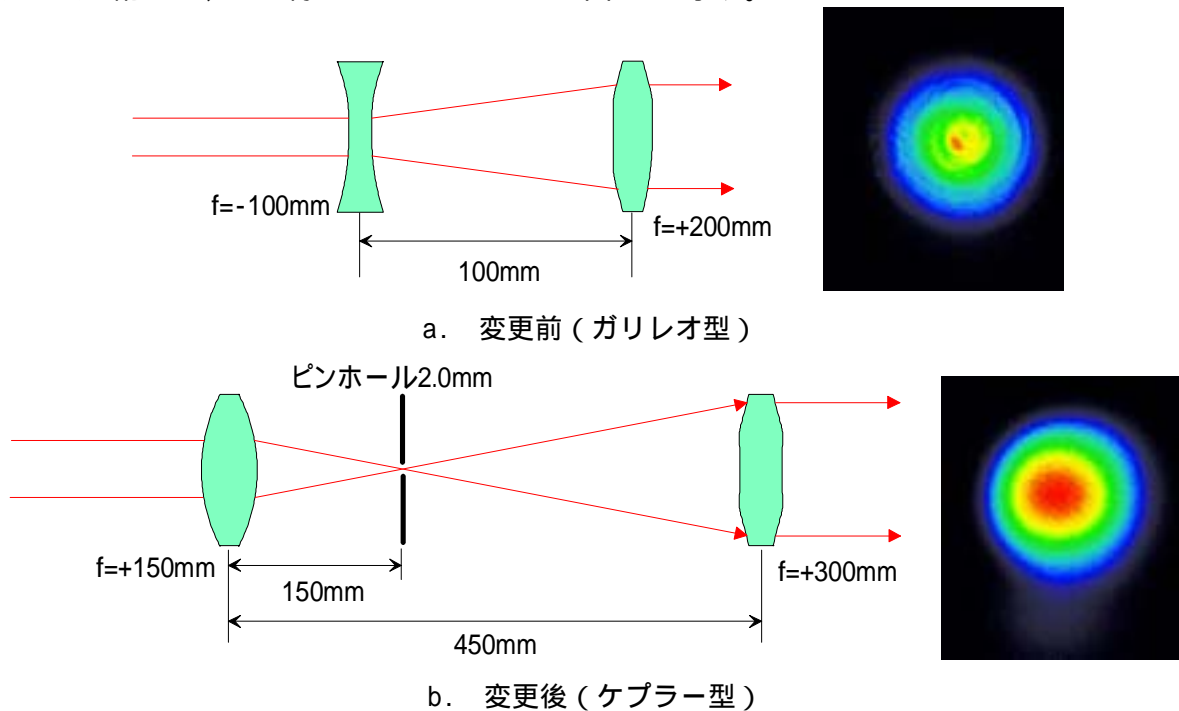


図 18 ビーム拡大器のレンズ変更とビームパターン

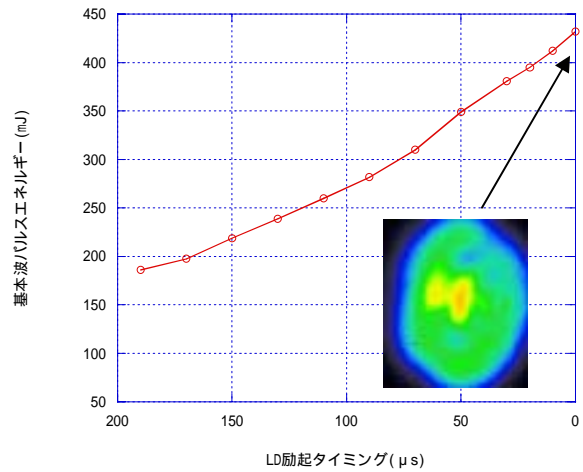


図 17 スペーシャルフィルター (大気中) 設置後の主増幅増幅試験

上図に示す通り、ガリレオ型拡大器から、ケプラー型拡大器にし、セラミック製 2mm ピンホールを設置することにより、ビームパターンの改善が出来た。これは、レーザービームの強度分

布にある不規則な光強度変動分を取り除く効果が作用したと考えられる。また、この状態で再度ダブルパス構成による増幅試験を行った。増幅試験結果を図 19 に示す。増幅試験の各構成部投入電流は、発振器 72A、前置増幅器 90A および主増幅器 85A である。

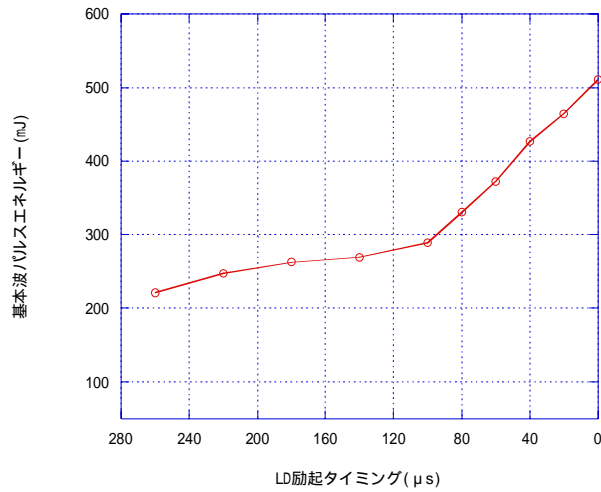


図 19 ケプラー型拡大器後の増幅試験

LD 励起タイミングを 260 μs にしているにも関わらず、200mJ の発振が得られているため、寄生発振が生じていると考えられ、寄生発振防止の手段にはならないことが分かった。

(イ) 寄生発振防止ファラデーアイソレータの設置

図 20 に示すように、前置増幅器直後に折り返しミラーと発振器アウトプットカプラーで生じる寄生発振を防止するために、磁界によって偏光方向が回転するファラデー効果を利用した、ファラデーアイソレータを設置した。この状態で、主増幅器内 LD を 75A にし、寄生発振の有無を確認したところ、パワーメータで測定できないほどの微弱な寄生発振が認められたものの、ほぼ改善することができた。発振器 72A、前置増幅器 90A および主増幅器 75A、主増幅器タイミング 260 μs の条件で、寄生発振の有無におけるビームパターンを図 21 に示す。

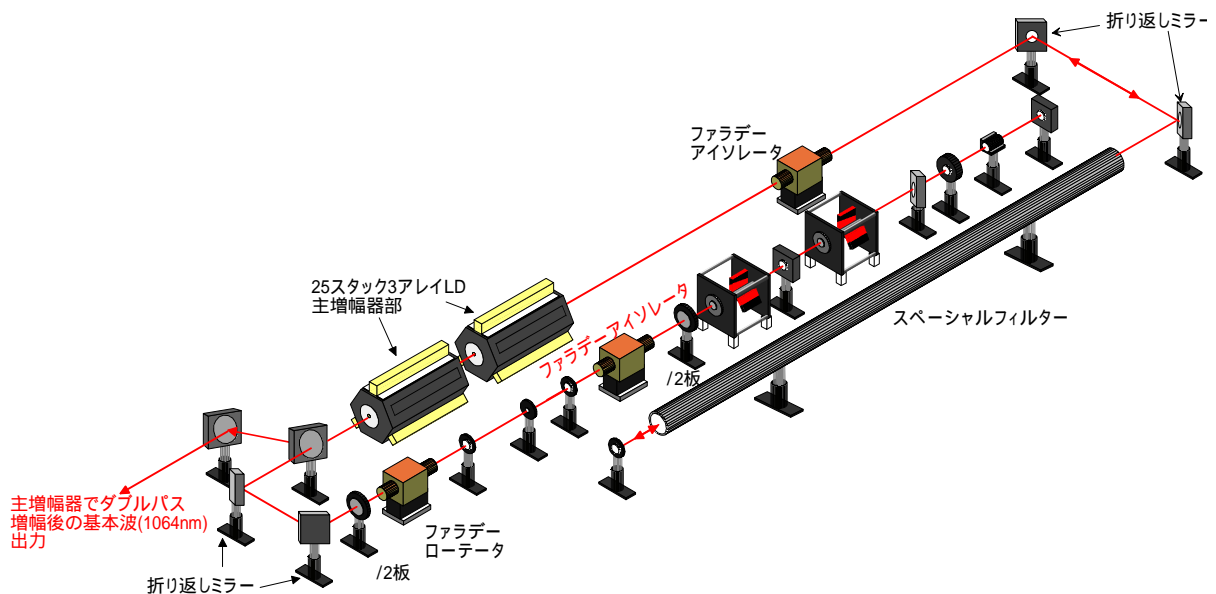
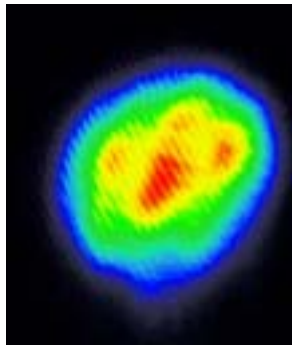
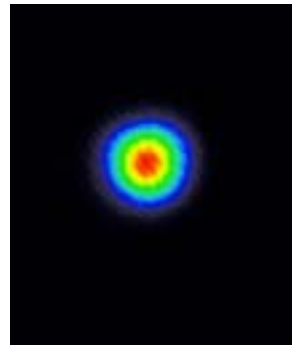


図 20 ファラデーアイソレータの設置





a. 寄生発振がある時のパターン



b. 寄生発振が無い時のパターン

図 21 寄生発振の有無によるパターンの比較

(ウ) 寄生発振防止後の増幅特性

前節までに記述した寄生発振を防止した際の増幅特性試験を行った。その結果を図 22 示し、出力 501mJ 時のビームパターンを図 23 に示す。

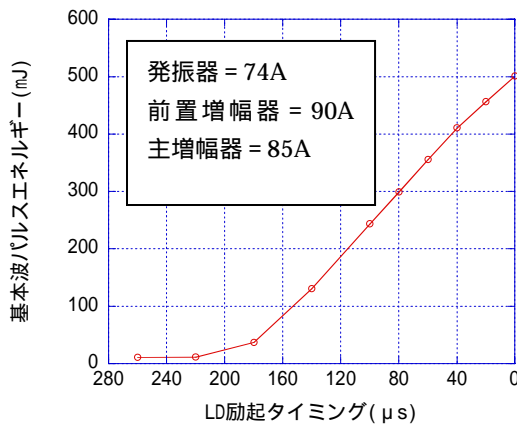


図 22 寄生発振防止後のダブルパスによる基本波増幅特性

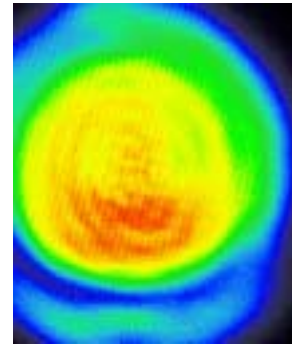


図 23 501mJ 時のビームパターン

ビームパターンの下部に偏りが見られるため、ビームパターンの改善に取り組んだ。方法として、ビームエキスパンダー部のレンズ組み合わせを  $f=+150\text{mm} \cdot f=+300\text{mm}$  から  $f=+150\text{mm} \cdot f=+350\text{mm}$  の組み合わせに交換した。また、ビームパターンの偏りに影響を与えているであろう LD の投入電流を、85A から 75A とし他の LD への投入電流も 82A にした。その際の、増幅特性を図 24、出力 498mJ 時のビームパターンを図 25 に示す。

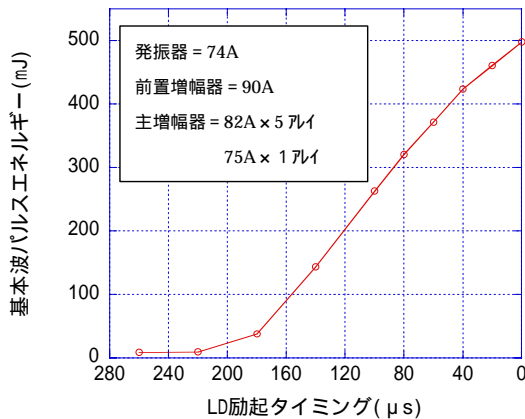


図 24 電流変更後の増幅特性

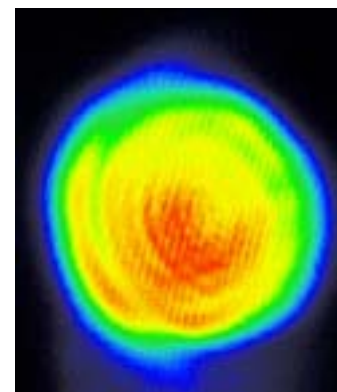


図 25 498mJ 時のビームパターン

ビーム内に回折パターンが確認できるが、下部に生じていたビームの偏りは多少改善すること

が出来た。完全にビーム強度分布の偏りを改善するには、主増幅器内 6mm で生じている回折を抑制するために、主増幅器入射ビームの最適化および主増幅器通過後スペーシャルフィルタレンズ間隔の最適化、主増幅器における励起分布の再調整等が課題となる。

### (エ) 波長変換実験

ダブルパス構成 MOPA レーザーシステムの基本波出力 500mJ を、Ti:Sapphire 前置増幅器、主増幅器内の Ti:Sapphire 結晶を励起するために、第 2 高調波である波長 532nm のグリーン光に波長変換を行う必要がある。波長変換には、非線形光学結晶である CLBO( $C_5L_4B_6O_{10}$ ) 結晶 ( $5 \times 5 \times 13\text{mm}^3$ , Type-) を用い、外部波長変換法で行う。波長変換の構成を図 26 に示す。第 2 高調波変換は、ダブルパス増幅した基本波ビームを CLBO 結晶に入射させ、CLBO 結晶の角度を微調整し位相整合条件を満たす。そこで波長変換したレーザー光は Ti:Sapphire 主増幅器を励起し、変換しきれない残りの基本波出力を 2 個目の CLBO 結晶 ( $5 \times 5 \times 8\text{mm}^3$ , Type-) で波長変換を同様に行う。この際、2 個目の CLBO 結晶は、1 個目の結晶軸と直角に設置した。波長変換を行った第 2 高調波出力特性を図 27 および変換効率を図 28 に示す。

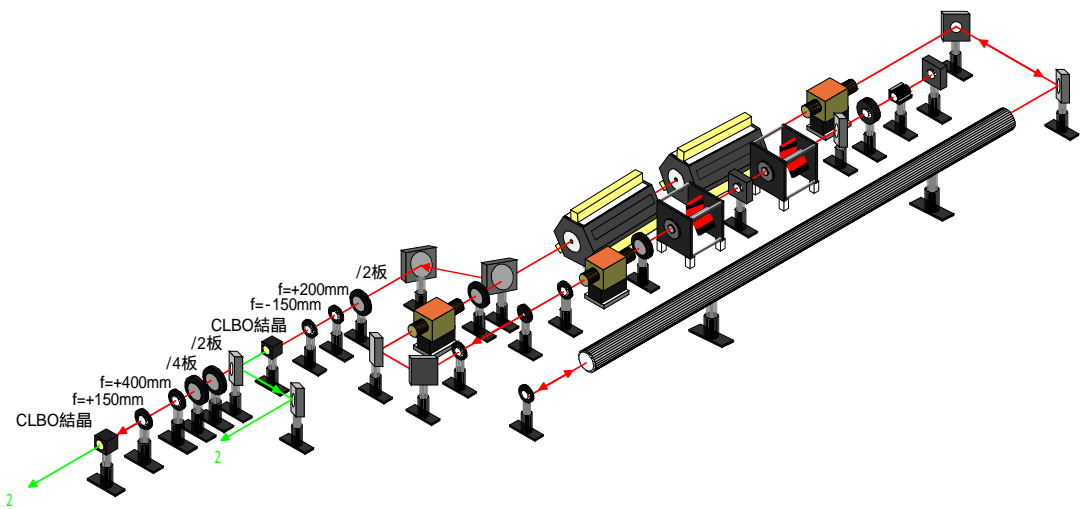


図 26 波長変換の配置図

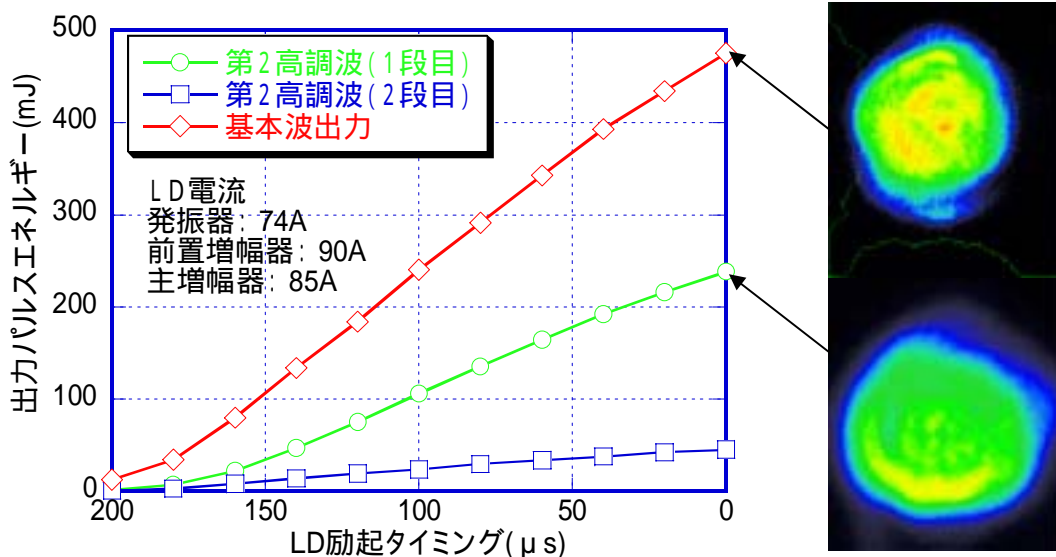


図 27 第 2 高調波出力特性

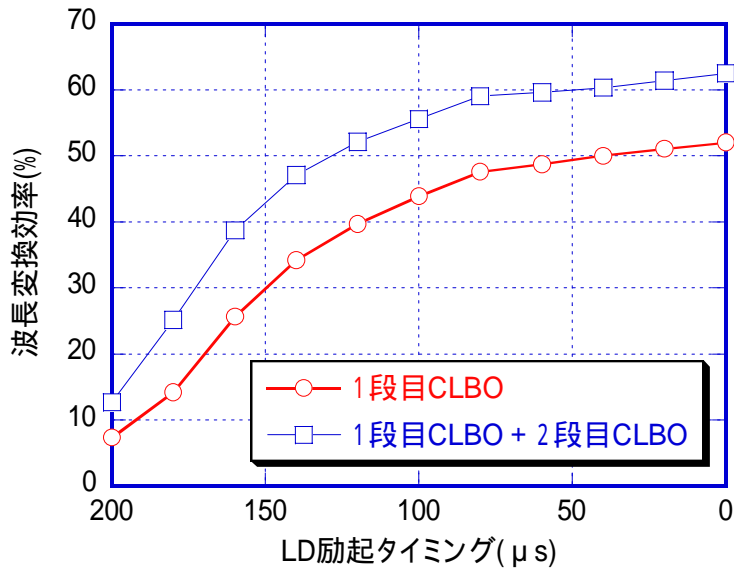


図 28 第 2 高調波(波長 532nm)変換効率

以上のように、ダブルパス構成による MOPA レーザーシステムにおいて、波長変換の実験を行ったところ、Ti:Sapphire 主増幅器を励起する第 2 高調波出力エネルギーが 238.5mJ、前置増幅器を励起する第 2 高調波出力エネルギーが 45.4mJ となり、目標値(250mJ、50mJ)に近い数値を得ることができた。変換効率に関しても、1 段目 + 2 段目の総変換効率が 59.4%であった。

今後の改善としては、2 段目の CLBO 結晶が 1 段目の CLBO 結晶とは異なり、8mm のものを使用しているために変換効率が低いと考えられる。これは、結晶長を長くすることにより、変換効率が向上し改善できると考えられる。しかし、結晶長を長くしすぎると、位相不整合による逆変換が発生するので注意が必要である。また、高調波変換後のビームパターンの均一性に問題があるため、ダブルパス増幅後の基本波ビームパターンをより高品質にする必要がある。

## 6 . Ti:Sapphire 励起用パルスグリーンレーザー改良

Ti:Sapphire レーザー高性能化に伴い MOPA レーザーシステムの改良を行った。これまでは、4 パスの前置増幅器、主増幅器の Ti:Sapphire 結晶をそれぞれ 100mJ、500mJ で励起する構成を取っていたが、4 パスの前置増幅器を再生増幅器に換えたことにより、再生増幅器と主増幅器の Ti:Sapphire 結晶をそれぞれ 50mJ、450mJ で励起する構成に変更した。また MOPA レーザーシステムの構成もこれまで 1 台につき 2 個の CLBO 結晶を用い、2 段階の波長変換を行っていたが、2 段目波長変換におけるビーム品質の悪化を考慮し、1 台目の MOPA レーザーシステムでは、基本波(波長 1064nm)のレーザー光を 500mJ 程度まで出力させ、波長変換を行うことで 250mJ 程度の 2 倍波(波長 532nm)を発生させた後、Ti:Sapphire 主増幅器を励起し、もう 1 台のグリーンレーザーは、波長変換後のグリーン光を分割し、一方を Ti:Sapphire 主増幅器の励起に用い(約 200mJ)、もう一方を Ti:Sapphire 再生増幅器の励起に用いる(約 50mJ)構成へと変更した。また前項で述べたように基本波のビームパターンをより高品質にし、第 2 高調波の励起パターンをフラットトップに近づける為に以下のような対策を順次行った。

寄生発振防止の為にシステム内にポラライザーを設置

正確な像転送を行う為にスペーシャルフィルターのレンズ対を  $f=+1000\text{mm}$  から  $f=+750\text{mm}$  へ変更。これに伴いスペーシャルフィルター内のピンホール設置位置でアブレーションが生じるようになり、改善策としてピンホールを取り外した。

Ti:Sapphire レーザー主増幅器までの光路構築。CLBO 結晶付近のビームパターンが Ti:Sapphire 結晶上に像転送するように配置。

MOPA1 号機 MainAMP の Nd:YAG ロッドのドーピング量を 0.6%から 1.0%のものに交換。

ロッドのドーピング量交換による熱レンズ変化に合わせダブルパス後のビームを平行光化。

波長変換用 CLBO 結晶を極力光路上流部に移動させ、ビームパターンが比較的良好な部分で波長変換を行うために光路を再構成。

2 光ビームパターン改善のため光路中にピンホールを設置。

CLBO 結晶を移動させたことによる Ti:Sapphire レーザー主増幅器までの光路再構築。CLBO 結晶付近のビームパターンが Ti:Sapphire 結晶上に像転送するように配置。

主増幅器 Ti:Sapphire 結晶上でのビームパターンの比較。

システムの改良後の構成及び変更箇所をを図 29 に示す。

まず、寄生発振防止の為、光路上 3 カ所にポラライザーを設置した(項目 )。また MainAMP ダブルパスの像転送をより正確に行う為に  $f=+1000\text{mm}$  のレンズ対を  $f=+750\text{mm}$  のレンズ対に変更した。しかし、このことによりスペシャルフィルター内のピンホール設置位置でアブレーションが生じることとなった。この問題に対する改善策としてスペシャルフィルター内のピンホールを取り外した(項目 )。CLBO 結晶上の第 2 高調波ビームパターンを図 30a に示す。またこの際、第 2 高調波出力 269mJ を得ることができた。

結果、図 27 のビームパターンと比較してもわかるように項目 の作業後ビームパターンを格段に向上することができた。しかし若干強度分布が中心に偏ったビームパターンとなった。

そこで次に、強度分布の均一化を目的に MainAMP の Nd:YAG ロッドのドープ量を 0.6% から 1.0% に変更した(項目 )。この変更に伴い MainAMP の熱レンズが変化した為、主増幅器後のレンズ対( $f=+750$ 、2 枚)のレンズ間隔を調整し、ダブルパス後のビームを平行光化した(項目 )。その後、極力波長変換を光路上流部(結像位置に近くビームパターンが良好であるところ)で行えるように光学素子を再配置した(項目 )。この結果、以前に比べ 160mm 程度上流で波長変換を行うことが可能となった。この時の CLBO 結晶上の第 2 高調波ビームパターンを図 30b に示す(図 30a,b のビームパターン測定位置の差は 10mm 程度)。またロッド交換前後のレーザーの性能を表 3 に示す(発振器出力は前置増幅器用集光器透過後の出力)。

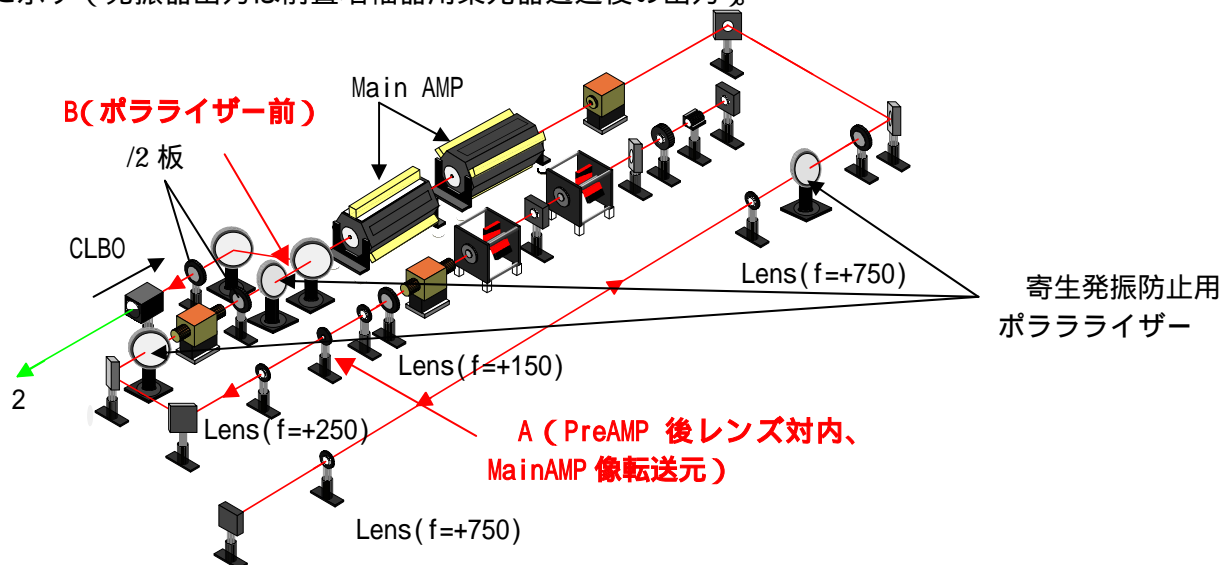
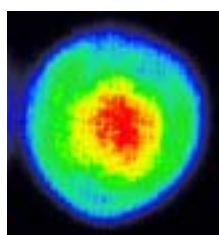
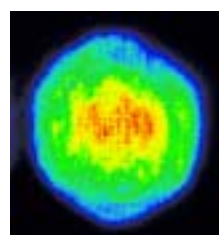


図 29 MOPA2 号機 (再構成図)



a. 項目 作業終了後 (出力 269mJ)



b. 項目 作業終了後 (出力 260mJ)

図 30 2 光ビームパターン

表 3 ロッド交換による性能変化

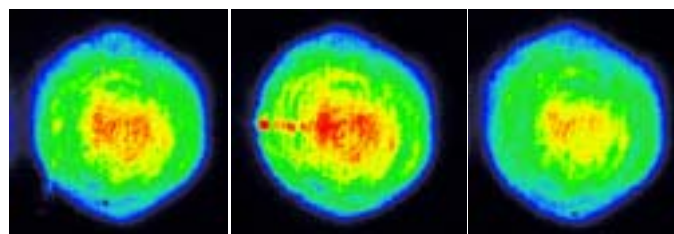
	交換前	交換後
発振器 (前置増幅器集光器後)	5.6mJ(LD 電流値 72A)	
前置増幅器	18.1mJ(LD 電流値 90A)	
主増幅器	LD 電流値 80A	
シングルパス	279mJ	-
ダブルパス	542mJ	516mJ
第 2 高調波	269mJ	260mJ



図 30 からわかるように 2 光ビームパターンは強度分布の中心部への偏りが少ないが、パターン上下に強度分布の低い部分がみられるため光路上にピンホールを設置しパターンの改善を試みた(項目 )。ピンホール設置位置は図 6 上 A 地点、B 地点であり、設置条件、設置後のビームパターンを表 4、図 31 に示す。

表 4 ピンホールによるパターン改善

	ピンホール 設置条件		2 光 パターン
	A 地点	B 地点	
(1)	無し	無し	図 30(b)
(2)	1.5	無し	図 31(a)
(3)	無し	5	図 31(b)
(4)	1.5	5	図 31(c)

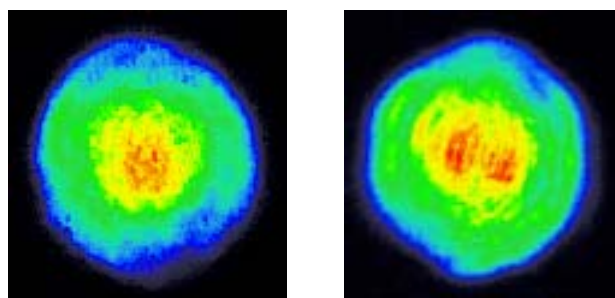


(a) (b) (c)

図 31 2 光ビームパターン

結果、条件(4)の状態での波長変換が最もパターンが良好だと考えられるため、この条件を採用する。

次に、波長変換した 2 光を Ti:Sapphire レーザー主増幅器 Ti:Sapphire 結晶上に像転送を行い結晶上のビームパターンを測定し、ロッド交換前(項目 作業終了後)のパターンとの比較を行った。Ti:Sapphire 結晶上のパターンを図 32 に、ロッド交換前後のパターンの比較を図 33 に示す。またロッド変更前後の再生増幅器 Ti:Sapphire 結晶上のビームパターンを図 34a,b に示す。



a. ロッド交換前 b. ロッド交換後

図 32 結晶上ビームパターン

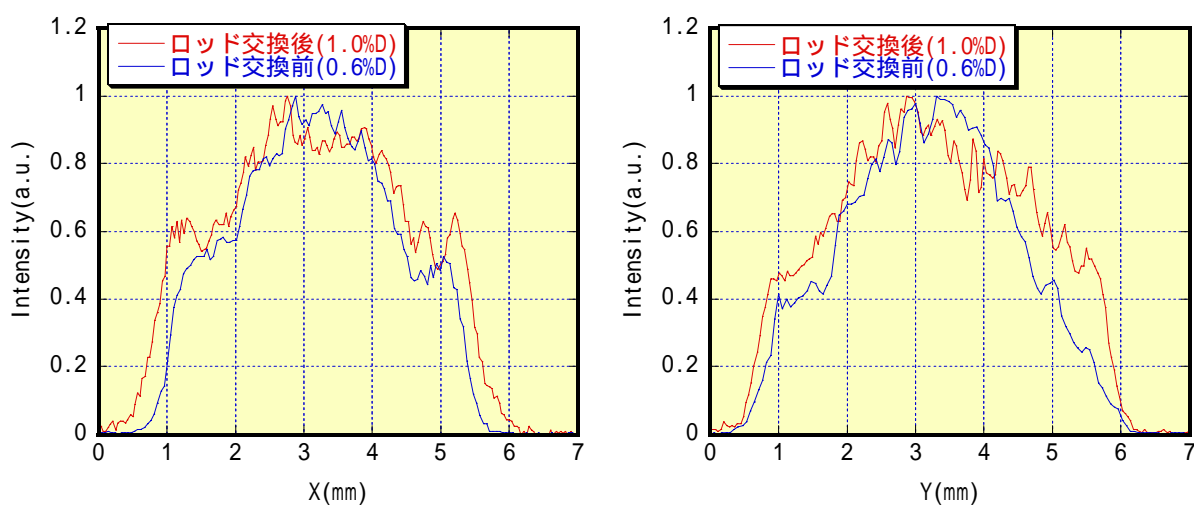


図 33 ロッド交換前後のパターン比較

結果、図 33 からわかるようにビームパターンの裾の部分の強度が高くなり、ロッド交換前に比べ若干強度分布がフラットトップに近づいた。



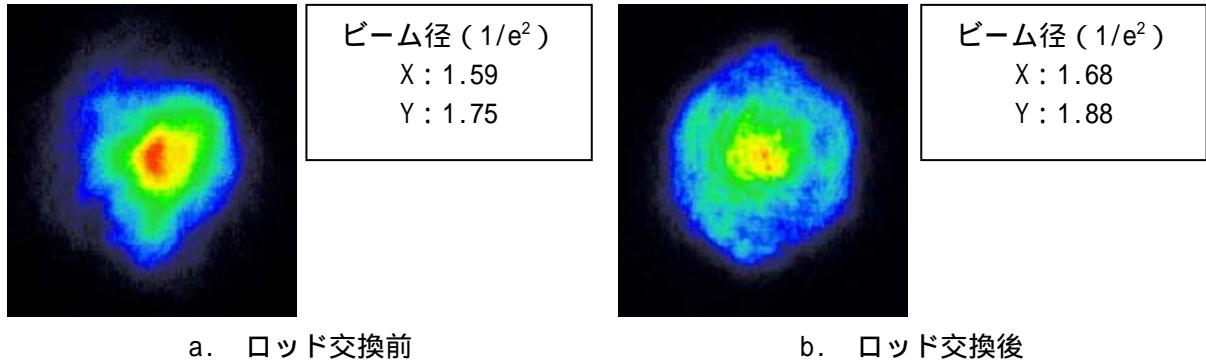


図 34 再生増幅器励起用ビームパターン変更前・後

再生増幅器上のビームパターンも図 34 から改善されたことがわかる。

MOPA レーザーシステムの再構成及び第 2 高調波ビームパターンの改善に成功した。しかし、現状のビーム径では Ti:Sapphire レーザー主増幅器の Ti:Sapphire 結晶にダメージが入る可能性がある為、CLB0 結晶後の像転送を 1:1 から 1:1.48 の拡大系に変更し Ti:Sapphire レーザー主増幅器の Ti:Sapphire 結晶を励起することとした。この時の Ti:Sapphire 結晶上でのビームパターンを図 35 に示し、この時の第 2 高調波の出力特性を図 36 に示す。

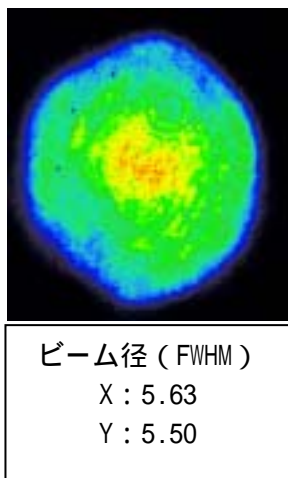


図 35 結晶上ビームパターン

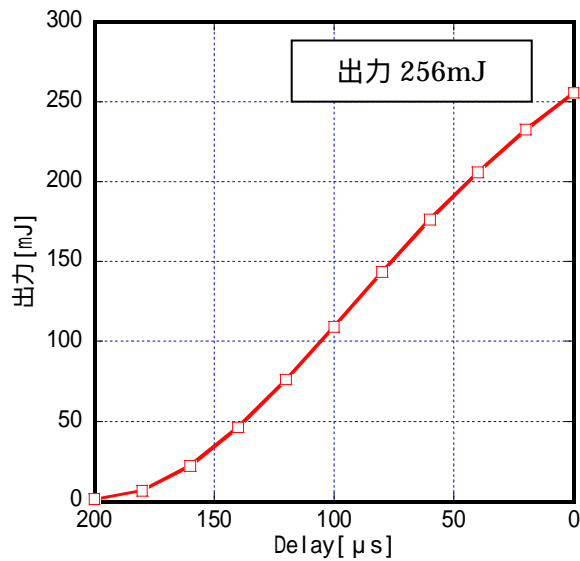


図 36 第 2 高調波出力特性

## 7. 安定性測定

ビームパターンの改善が完了した為、安定性の測定を行った。MOPA レーザーシステムの第 2 高調波を Ti:Sapphire レーザー増幅器部（再生増幅器部、主増幅器部）まで導き各増幅器部での出力安定性及びポインティング安定性の測定を行った。実験の構成を図 37 に示す。出力測定は 1 時間連続で行い、ポインティング安定性の測定については 15 秒間隔で 1 時間測定した。

図 38 に Ti:Sapphire 主増幅器部における出力安定性の測定結果を示し、Ti:Sapphire 主増幅器部のポインティング安定性、ピーク強度安定性を図 39 に再生増幅器における種々安定性を図 40 に示す。

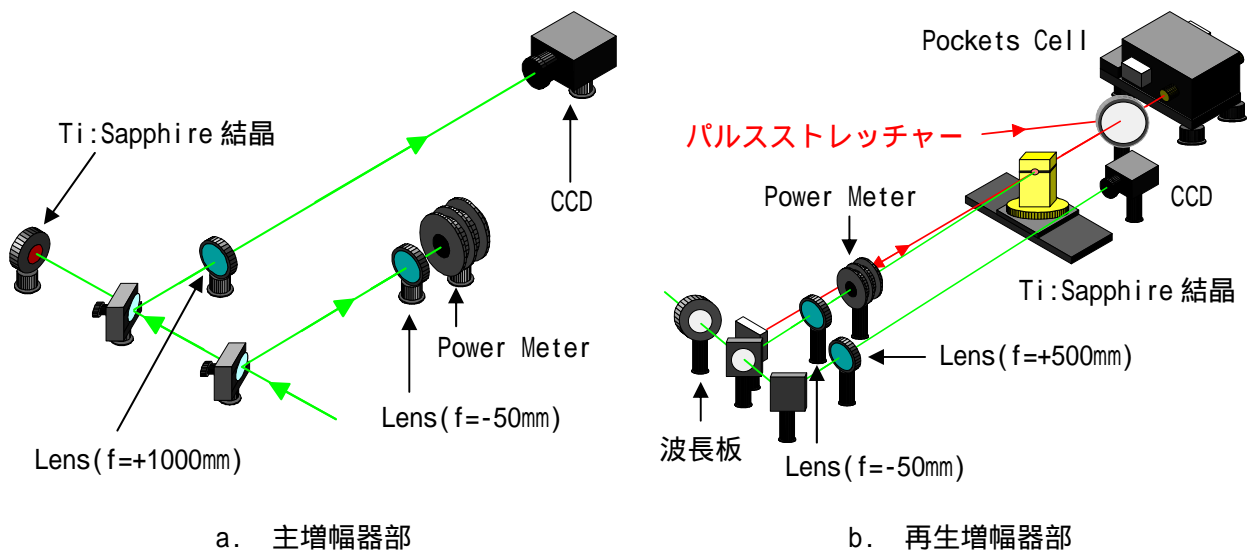


図 37 安定性測定実験構成図

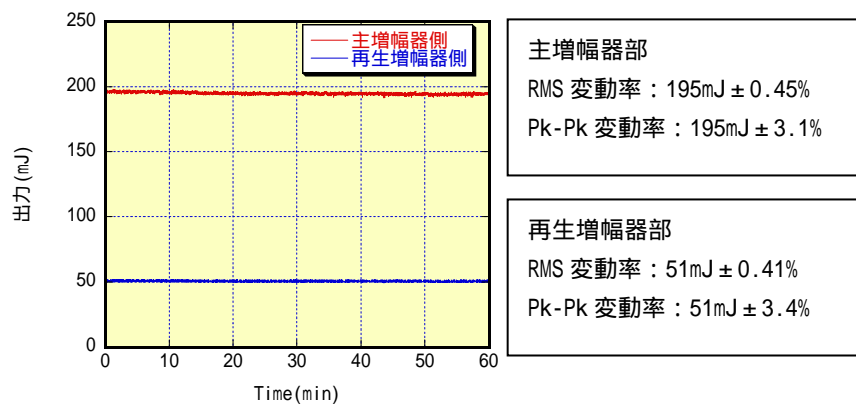


図 38 出力安定性測定結果

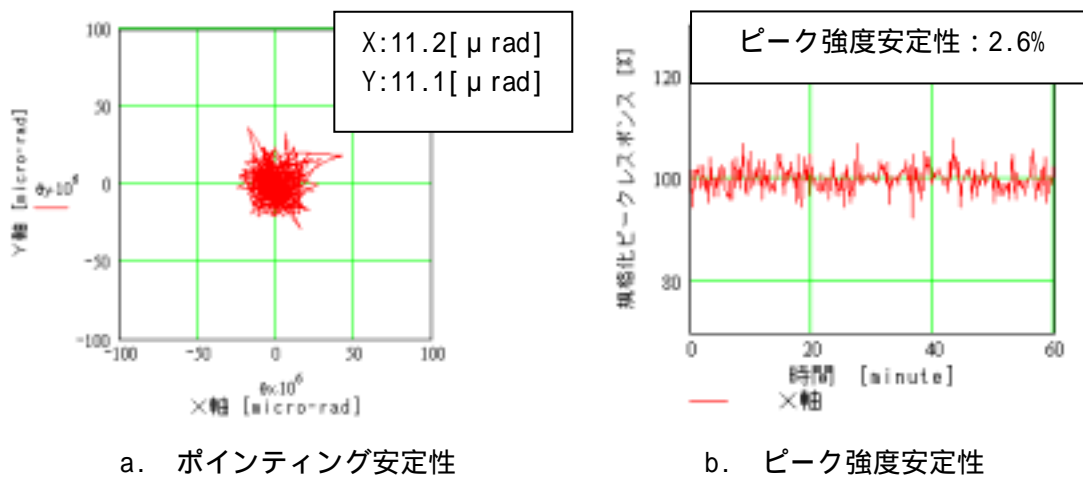


図 39 主増幅器部安定性測定結果

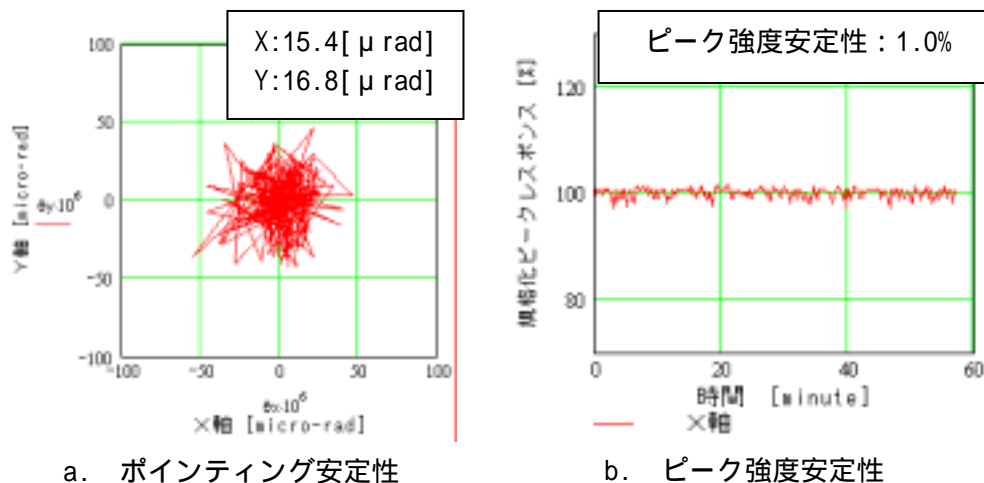


図 40 再生増幅器部安定性測定結果

結果、出力安定性については RMS 変動率  $\pm 0.45\%$ 、Pk-Pk 変動率  $\pm 3.4\%$ 、ポインティング安定性については X 軸方向に  $15.4 \mu\text{rad}$ 、Y 軸方向に  $16.8 \mu\text{rad}$ 、そしてピーク強度安定性については  $2.6\%$  程度に収まる事が確認できた。

## 8. まとめ

Ti:Sapphire レーザー増幅器部の Ti:Sapphire 結晶を励起する為のパルスグリーンレーザーの開発を行った。結果、第 2 高調波出力  $256\text{mJ}$  でビーム品質の良好なレーザーシステムを完成させることに成功した。本レーザーシステムを用い Ti:Sapphire レーザー増幅器部の Ti:Sapphire 結晶を励起する際の安定性を表 6 に示す。

表 6 各増幅器部における安定性

		主増幅器部	再生増幅器部
平均出力[mJ]		195	51
出力安定性 [mJ]	RMS 変動率[%]	$\pm 0.45$	$\pm 0.41$
	Pk-Pk 変動率[%]	$\pm 3.1$	$\pm 3.4$
ポインティング安定性 [μ rad]	X	11.2	15.4
	Y	11.1	16.8
ピーク強度安定性[%]		2.6	1.0

### (3) 主な成果

Ti:Sapphire レーザー増幅器部の Ti:Sapphire 結晶を励起する  $10\text{Hz}$  で動作するパルスエネルギー  $250\text{mJ}$  のパルスグリーンレーザーの開発に成功。このパルスグリーンレーザーを 2 台用い Ti:Sapphire レーザーの再生増幅器、主増幅器内 Ti:Sapphire 結晶をそれぞれ  $50\text{mJ}$ 、 $450\text{mJ}$  で励起する。

特許件数 : 2      論文数 : 1      口頭発表件数 : 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

このレーザー開発は後述する高繰り返しパルスグリーンレーザー開発の試験的要素が大きいため、達成仕様レベルのレーザーはすでに市販されている。ただし半導体レーザー励起では市販されていない。

#### 実用化に向けた波及効果

低繰り返しレーザーの開発技術を生かし、後述する LD 励起による MOPA 方式高繰り返し・高出力レーザーが実現する途上には、光増幅技術をはじめ熱除去技術・熱レンズ補償技術・熱複屈折補償技術等が蓄積され、さらにこれらは YAG レーザー及びグリーンレーザーのいっそうの高出力化に向けた新技術開発に繋がっていく物と考えられる。

#### (5) 残された課題と対応方針について

特になし