

< 1 > 超高密度光子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（高繰り返し）（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

レーザーB（ピーク出力 0.1TW、繰り返し周波数 1kHz、パルス幅 150fs 以下）のチタンサファイア結晶を励起する Nd:YAG パルスグリーンレーザー開発を行った。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 方式を採用した。

研究の独自性・新規性

MOPA 方式を用いることによりビーム品質が良好であり、LD 励起のため、寿命の短いフラッシュランプ励起のレーザーでは難しいとされる高繰り返しが実現可能である。

研究の目標

ピーク出力 0.1TW、1kHz のチタンサファイアレーザーシステム内の再生増幅器、前置増幅器、及び主増幅器励起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。

1kHz 動作、基本波出力 250 ~ 300W、及び 2 倍波出力 120W を目安の目標とし開発を進める。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

1. はじめに

本小テーマでは、サブテーマ<1.1.a>YAG レーザーの開発において、レーザーB（ピーク出力 0.1TW、繰り返し周波数 1kHz、パルス幅 150fs 以下）のチタンサファイア結晶を励起する Nd:YAG パルスグリーンレーザー（以下グリーンレーザー）開発について記述する。

レーザーB システムではチタンサファイアレーザーの再生増幅器、前置増幅器および主増幅器の励起にグリーンレーザーを用いる。グリーンレーザーは発振器でパルスエネルギー 1mJ の基本波（波長 1064nm）を出力させ、前置増幅器及び主増幅器用い 250 ~ 300mJ まで増幅させる。その後、波長変換を行い 120mJ の 2 倍波（波長 532nm）を出力させる構成とする予定である（図 1）。グリーンレーザーでの波長変換後、ポライザーを用い分割し再生増幅器、前置増幅器および主増幅器のチタンサファイア結晶を励起する構成とする予定である。

本報告書では、励起用パルスグリーンレーザーの開発について報告する。

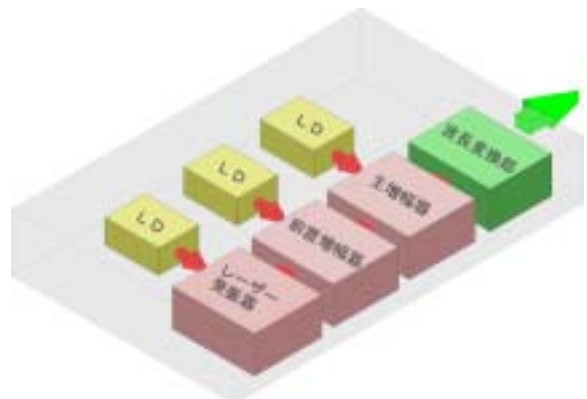


図 1 概略ブロック図

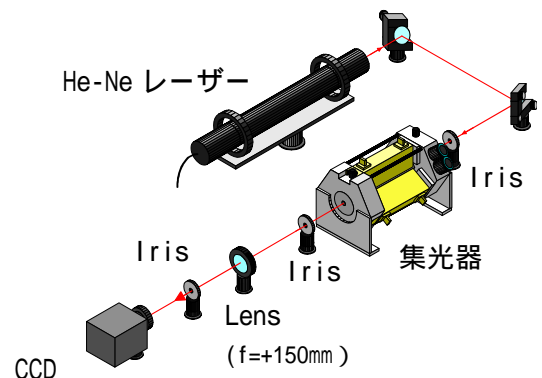


図 2 励起分布の測定配置図

2. 発振器及び前置増幅器用集光器の基本特性測定

Nd:YAG ロッドを中心に LD (1バー当たりピーク出力 80W、6アレイ) で 3 方向から励起する構造の集光器の励起分布測定を行った。冷却水の流量は YAG ロッドに 3l/min、LD に 9l/min (LD 1 台につき 3l/min とし、3 台で 9l/min) とした。実験構成を図 2 に示す。測定は 1kHz、50A 時に観測を行った。測定結果を図 3 に示す。

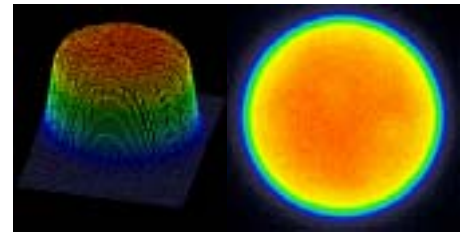


図 3 蛍光分布測定結果

測定の結果、図を見ても分かるように比較的均一な励起分布を示す結果が得られた。

次に Nd:YAG ロッドを励起することで生じる熱レンズの焦点距離を測定した。実験構成を図 4 に示す。He-Ne レーザーの光を $f=+100\text{mm}$ と $f=+350\text{mm}$ のレンズを用い平行光にした後、集光器を通過させ、LD の電流値を 0A ~ 70A まで変化させた。その際の、CCD カメラを用いてロッド端面からの焦点位置を測定した。

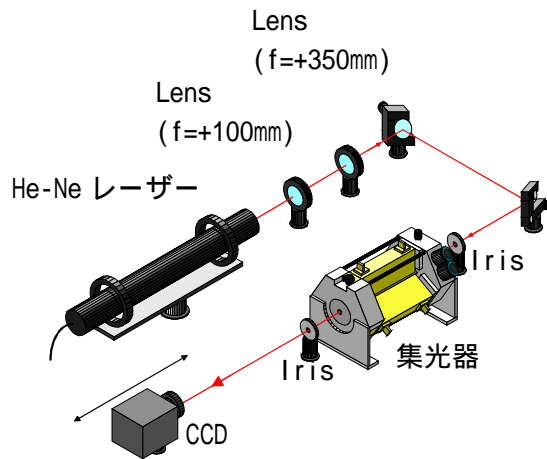


図 4 熱レンズ焦点距離の測定配置図

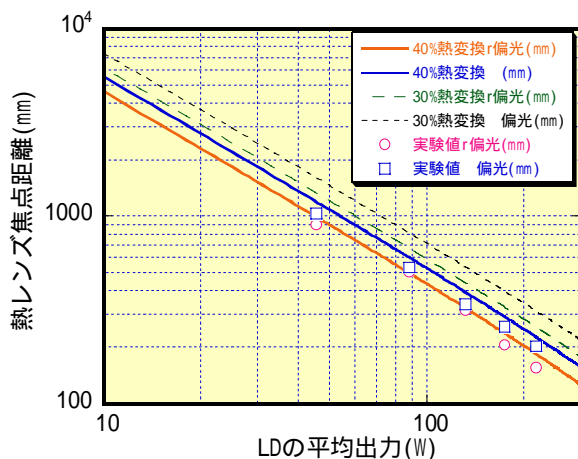


図 5 熱レンズ焦点距離

以上、実験の結果、60A 時 (LD ピーク出力: 873.8W, 平均出力: 174.8W) に r 偏光方向 205.7mm、偏光方向 256.7mm の熱レンズが生じることが分かり、この実験値を考慮し正確な共振器及び増幅器の設計が可能になると考えられる。

LD 電流値に対する小信号利得の測定を行った。実験構成を図 6 に結果を図 7 に示す。測定は集光器 3 台 (No.1 ~ No.3) 全てに対して動作パルス幅 200 μs で LD 電流値、繰り返し回数を変更し測定を行った。

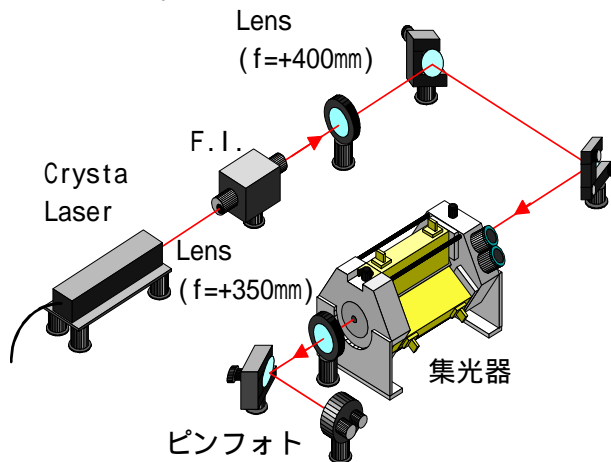


図 6 実験構成図

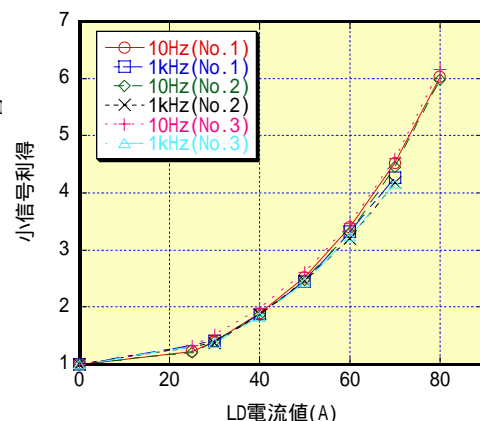


図 7 小信号利得測定結果

測定の結果、計算値 3.8 倍 (LD 電流値 70A、Nd:YAG ロッド吸収効率 65%として計算) に対して、LD 電流値 70A でおよそ 4.5 倍程度と計算値を上回る小信号利得が得られた。

次に熱複屈折効果に伴う損失量の測定を行った。実験構成を図 8 に示す。測定は以下の手順で行った。

f=+400mm のレンズを用い平行ビームに調整した後、 $\lambda/2$ 板、集光器のロッド中心を通過させる。

集光器のロッド中心を通過させた後ポライザーを設置し、P 偏光、S 偏光の出力を測定できるようにパワーメータ、(図 7 中 Power、)を設置。ポライザー反射光の出力が最も高くなるように $\lambda/2$ 板を調整。

集光器の LD 電流値を 0A から 70A まで変更し、その際の出力をパワーメータ、で測定し、熱複屈折効果に伴う損失量を算出

測定結果を図 9 に示す。

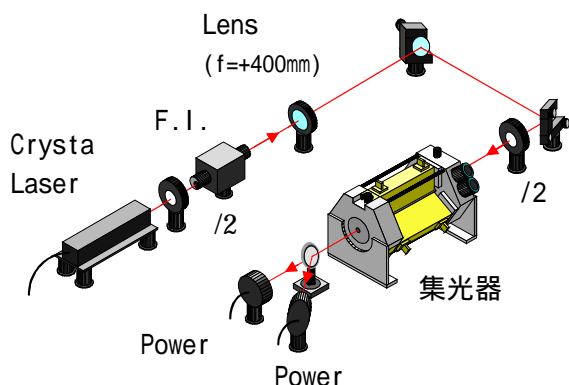


図 8 熱複屈折量測定実験図

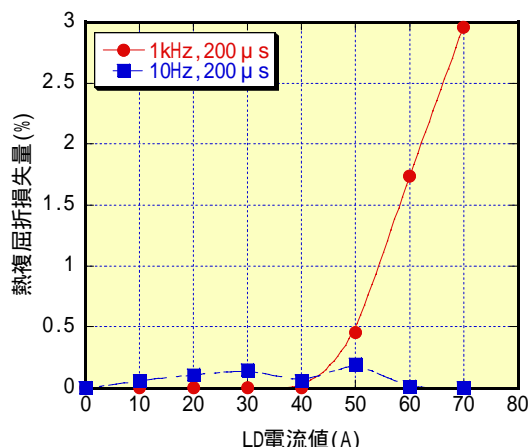


図 9 熱複屈折量測定結果

2. 発振器部構成

当初の予定ではリング型の共振器を用いる予定であったが、共振器長が長くなることによりパルス幅が長くなることから、波長変換効率の低下を考慮し、より光路長の短い直線型を採用した。構成を図 10 に示す。電流値に対する出力及びパルス幅の変化を図 11 に示す。

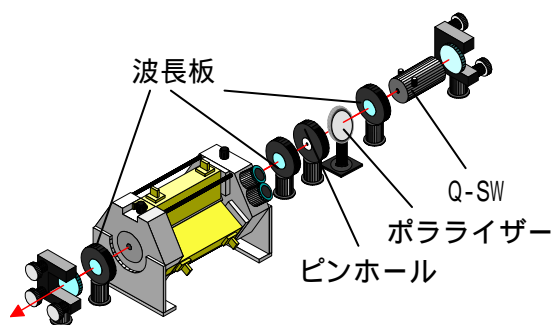


図 10 発振器構成図

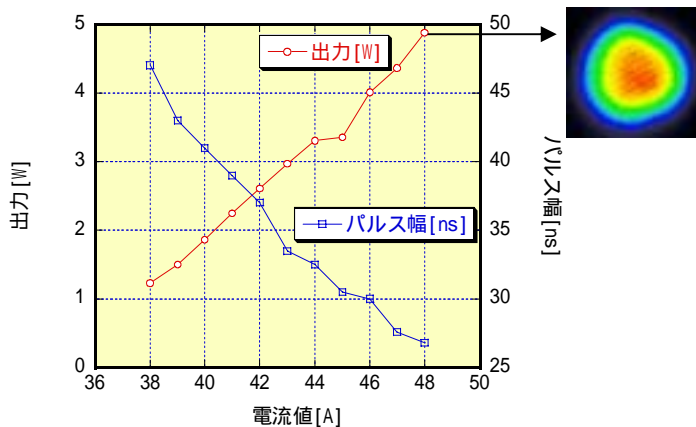


図 11 出力及びパルス幅測定結果

結果、LD 電流値 48A で最大出力 4.88W が得られた。このときのパルス幅は 26.8nm であった。発振器での目標出力約 1W を達成した為、前置増幅器の構築を行う。

3. 前置増幅器部構成

前置増幅器の構築を行い、シングルパス及びダブルパスの増幅試験を行った。前置増幅器までの構成を図 12 に示す。構成は、増幅後のビームパターンを考慮し、発振器後のパターンが前

置増幅器用集光器（図 12 中 PreAMP、PreAMP）にそれぞれ結像するよう像転送を行った。また熱複屈折を補償する為 90°ローテータを設置した。シングルパス及びダブルパスの増幅試験結果をそれぞれ図 13 に示す。増幅は前置増幅器の励起タイミングを徐々に発振器に合わせるという方法で測定した。

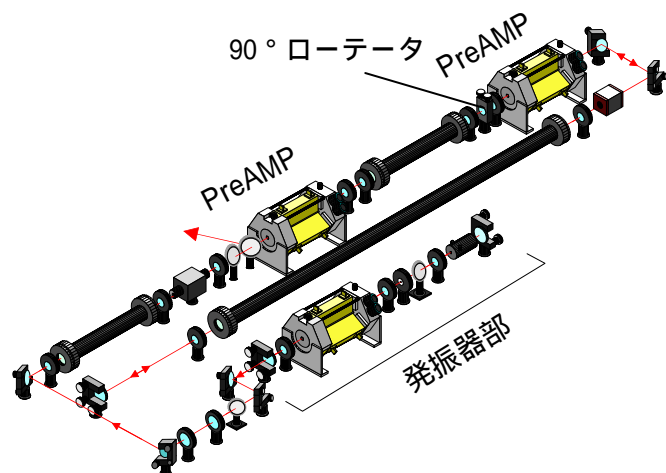


図 12 前置増幅器構成図

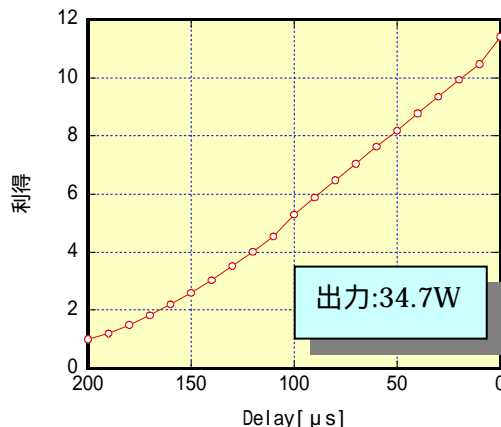
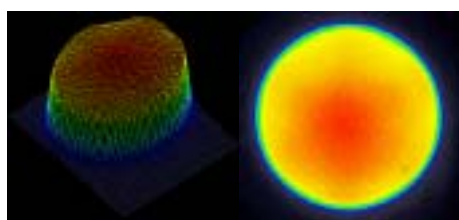


図 13 前置増幅器増幅特性

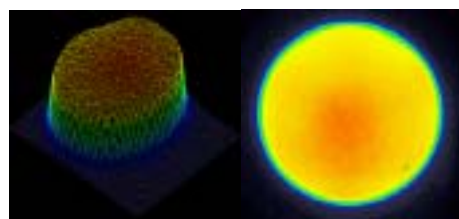
結果、LD 電流値 50A、励起タイミング 0μs 時にダブルパスで最大 34.7 (利得 11.4 倍) まで増幅することができた。前置増幅器での目標出力約 18W を達成した為、主増幅器の構築を行う。

4. 主増幅器用集光器の基本特性測定

当初の計画では主増幅器用集光器にはコンポジット Nd:YAG ロッド (ロッド径 10mm、Nd ドープ径 6mm) を用いる予定であったが、小信号利得を測定した結果、LD 電流値 35A 付近で利得の飽和が見られた。原因を調査したところ、本測定に使用している Crystalaser の中心波長 (1063.93nm) に対し電流値 50A 時の蛍光波長が 0.251nm ずれていることが確認できた。この結果から、ロッド温度の上昇に伴う波長シフトの影響により利得が飽和し、予定の利得を得ることが出来ないと考えられる。この問題に対する具体的な改善策として、現在の循環冷却装置ではポンプの性能がほぼ限界である為、集光器内フローチューブの内径を変更し、冷却水の流速を増す方法を取った。この時、Nd:YAG ロッドは、これまでのコンポジット Nd:YAG ロッドからモノリシック Nd:YAG ロッド (ロッド径 6mm) に交換した。フローチューブ及びロッド交換後の蛍光分布、熱レンズ効果、交換前後の LD 電流値の変化による蛍光波長及び小信号利得の測定結果をそれぞれ図 14 から図 17 に示す。



a. LD 電流値 50A



b. LD 電流値 60A

図 14 蛍光分布測定結果

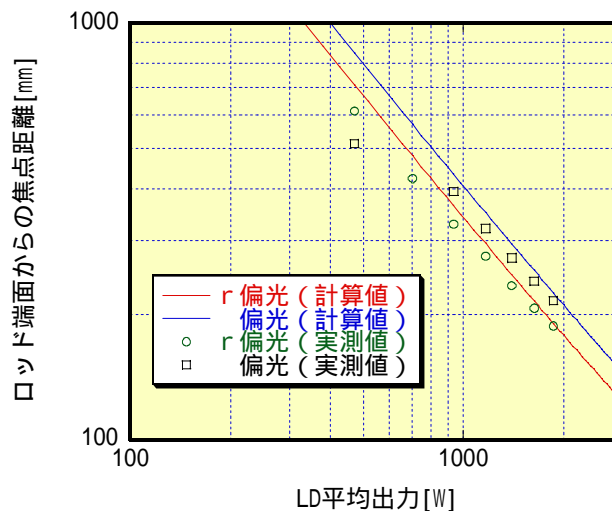


図 15 熱レンズ焦点距離

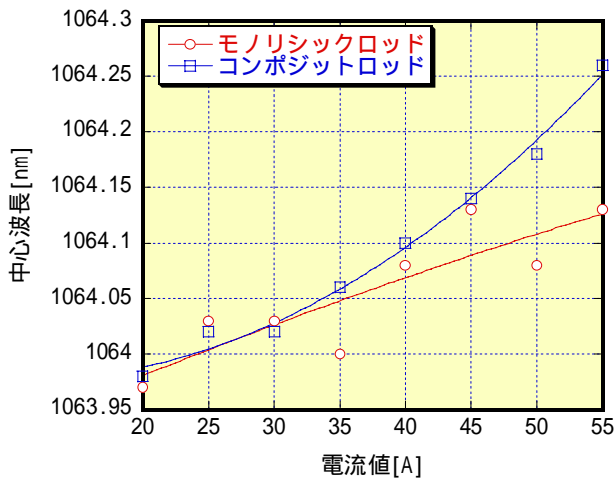


図 16 蛍光波長の変化

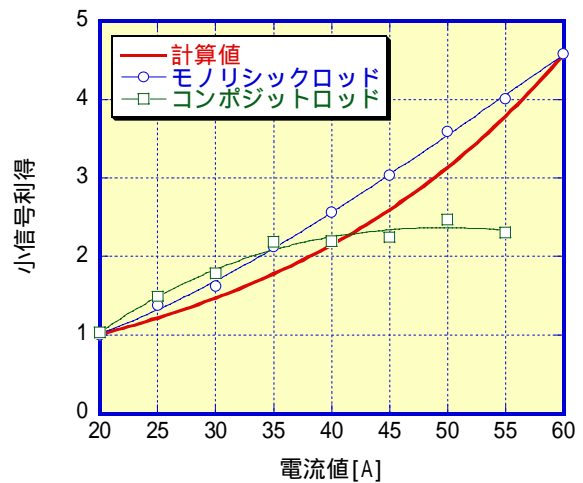


図 17 小信号利得

蛍光分布測定の結果、図からも分かるように比較的均一な励起分布を示す結果が得られた。熱レンズ焦点距離の結果から、LD 電流値 60A (平均出力 1860W) において r 偏光方向 187mm、偏光方向 215mm の熱レンズが生じることがわかり、この実験値を考慮し正確な増幅器の設計が可能になると考えられる。

フローチューブ及びロッド交換により、メインアンプ集光器の波長シフト量が改善され、小信号利得が改善された。

5. 主増幅器部構成

主増幅器の構築を行った。構成を図 18 に示す。構成は前置増幅器と同様に各集光器 (図 18 中 MainAMP、MainAMP) に発振器後のビームパターンが結像するように像転送を行っている。また熱複屈折を補償するために 90°ローテータを設置した。増幅試験結果を図 19 に示す。増幅試験は前置増幅器と同様に主増幅器の発振器とのタイミングを変化させた。この時熱レンズ効果を考慮し、主増幅器の電流値は随時最適値へと調整を行った。

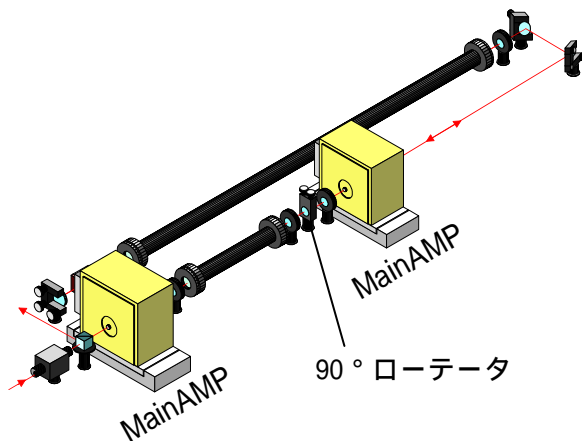


図 18 主増幅器構成図

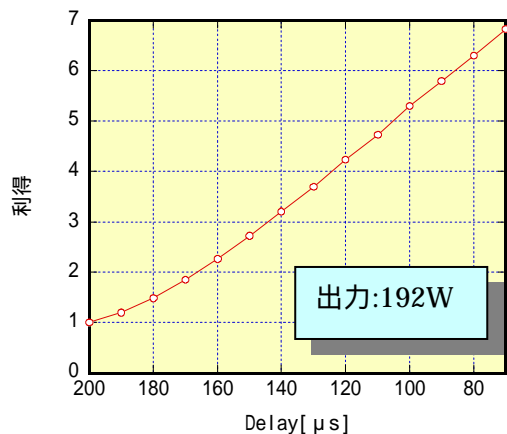


図 19 主増幅器増幅特性

結果 LD 電流値 57.8A、励起タイミング 70 μs 時に 192W の出力が得られた。また LD 電流値 59.2A、励起タイミング 30 μs にした際には 269W の出力を得ることができた。この条件でもまだ発振器と主増幅器の励起タイミングに 30 μs の差を生じさせている為、増幅に若干の余裕があるものと思われるが、光学素子へダメージが生じる危険性等を考慮し、主増幅器に置ける増幅はここまでとした。

6. 波長変換試験

次に波長変換試験を行った。波長変換には LBO 結晶 (サイズ 10×10×15mm³、Type-、NCPM) を用いた。波長変換部では、これまで前置増幅器部、主増幅器部と像転送を行ってきた発振器後

のビームパターンがLBO結晶上にくるように像転送を行った。波長変換試験の結果及びビームパターンを図19に示す。

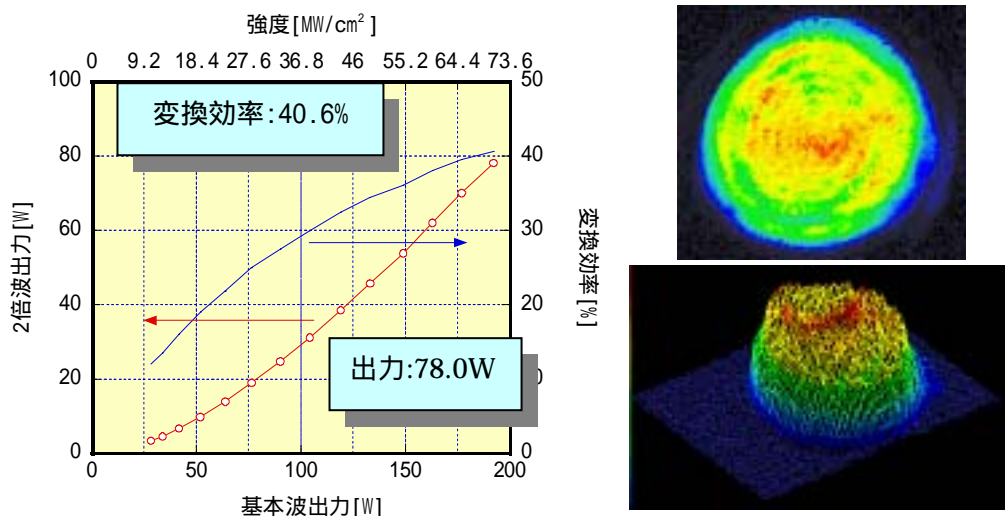


図19 波長変換試験結果

結果、基本波出力192W時に2倍波出力78Wが得られ、この時の波長変換効率は40.6%であった。また、基本波269W時では94.2Wの2倍波出力が得られた。当初の目標では2倍波出力は120W程度を予定していたが、チタンサファイアレーザーでピーク出力0.1TW、1kHzを達成する為には78W程度の出力が得られれば十分であると考えられる為、平均出力78Wのレーザー光をチタンサファイアレーザー部に導き、再生増幅器、前置増幅器、主増幅器にそれぞれ8.5W、20W、35W程度で分割しチタンサファイア結晶の励起を行い0.1TW、1kHzを目標に増幅を行う。

7. ビーム品質測定 (M^2 値測定)

チタンサファイアレーザー増幅器部を励起する為に必要な2倍波の出力が得られた為、ビーム品質を評価する為基本波と2倍波のビーム品質の測定 (M^2 値測定) を行った。測定には基本波、2倍波にそれぞれ焦点距離558mm、224mmのレンズを用いビームを集光し、焦点付近のビームパターンをCCDカメラを用いて測定した。測定は基本波及び2倍波の出力はそれぞれ192W、78W (主増幅器と発振器のタイミングが70 μ sずらした状態)で行った。基本波及び2倍波の測定結果を図20に、レンズからの距離の変化によるビームパターン変化を表1、2に示す。

測定の結果、基本波では M^2 値が X 軸方向で 3.0、Y 軸方向で 3.3、2倍波では焦点位置が複数存在し X 軸方向、Y 軸方向共に焦点位置が正確に判明せず算出不可能であった。

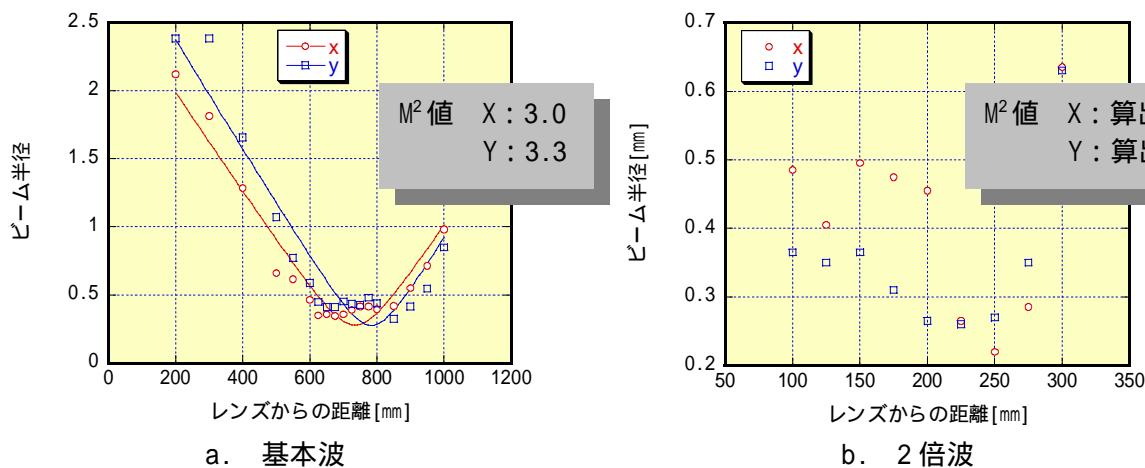


図20 M^2 値測定結果

表1 レンズからの距離におけるビームパターンの変化(基本波)

400mm	500mm	600mm	650mm	700mm	750mm
800mm	850mm	900mm			

表2 レンズからの距離におけるビームパターンの変化(2倍波)

100mm	125mm	150mm	175mm	200mm	225mm
250mm	275mm	300mm			

焦点位置が複数存在する原因として前置増幅器及び主増幅器の熱複屈折補償が最適化されていない可能性が考えられる。そこで各増幅器の熱複屈折補償の最適化を行った。構成を図21に示す。図21では主増幅器の構成を示しているが、前置増幅器の場合もこれと同様の構成を用い、行った作業内容も同様である。

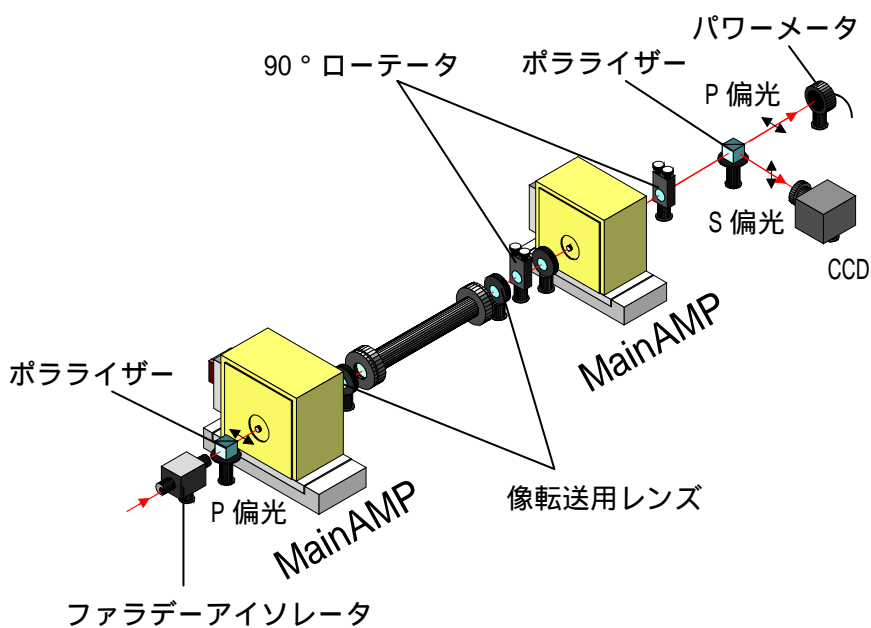


図21 熱複屈折補償最適化調整

熱複屈折補償最適化調整の作業手順を以下に示す。

集光器の電流値のみ上昇させ、発振器とのタイミングをずらせておく（熱負荷のみを集光器に与え、増幅は行われたい状態）。前置増幅器の場合、LD 電流値 48A、Delay200 μ s、主増幅器の場合 LD 電流値 53A、Delay200 μ s。

MainAMP のロッド中心を透過するように光軸を調整。

MainAMP を左右にスライドさせ CCD で測定している S 偏光成分（熱複屈折により偏光が回転した成分）が最弱になるように調整。

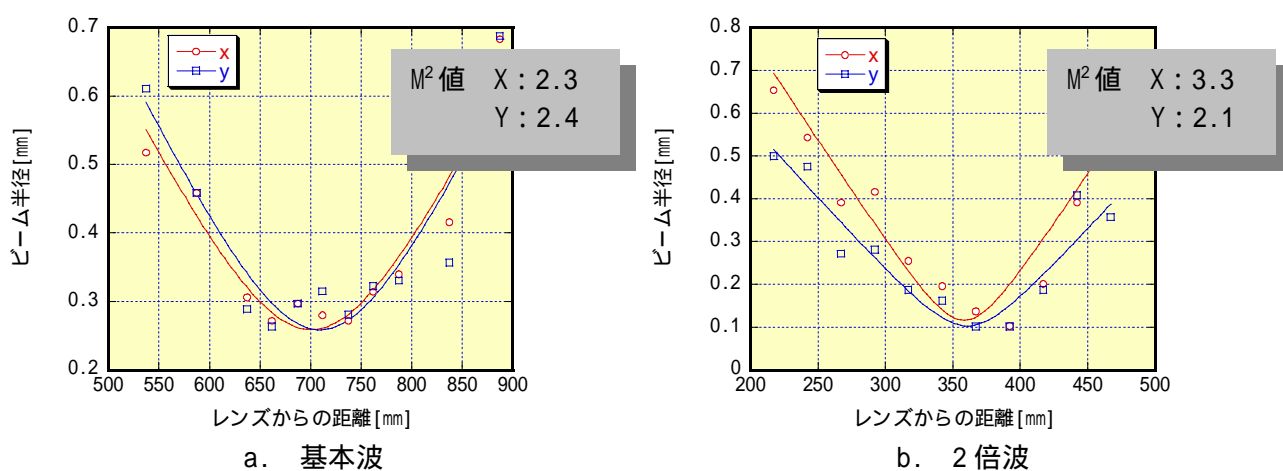
像転送用レンズ出射側（MainAMP 側）を上下左右に調整し、S 偏光成分が最弱になるように調整

90°ローテータ（MainAMP 前）の入射角を調整し、S 偏光成分が最弱になるように調整。

上記の手順で作業を行うことにより熱複屈折により偏光が回転した成分が減少した（目視による確認）。主増幅器最適化後の偏光成分の出力比を測定したところ P 偏光と S 偏光の成分比は 133:4.33 であった。このことから熱複屈折による影響が全体の約 3%まで低減した。最適化前の影響は測定を行っていない為不明であるが、目視で明らかに偏光が回転した成分が減少したことから、熱複屈折による影響は改善されたものと考えられる。

熱複屈折の最適化が完了した為再度、基本波及び 2 倍波の M^2 値を測定した。測定は資本波及び 2 倍波の出力はそれぞれ 137W、56.7W（主増幅器と発振器のタイミングが 100 μ s ずらした状態）で行い、基本波及び 2 倍波にはそれぞれ焦点距離 573mm、347mm のレンズを用いた。測定の結果を図 22 に、レンズからの距離の変化によるビームパターン変化を表 3、4 に示す。

結果、集光後のビームパターンの歪みについては改善されなかったが、 M^2 値については基本波は X 軸方向で 2.3、Y 軸方向で 2.4、2 倍波については X 軸方向で 3.3、Y 軸方向で 2.1 と共に改善することに成功した。

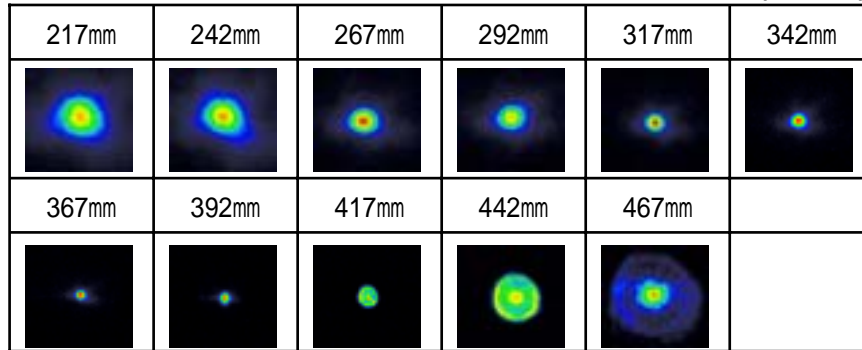


M^2 値測定結果（熱複屈折補償最適化後）

表 3 レンズからの距離におけるビームパターンの変化（基本波）

537mm	587mm	637mm	662mm	687mm	712mm
737mm	762mm	787mm	837mm	887mm	

表4 レンズからの距離におけるビームパターンの変化(2倍波)



8. まとめ

レーザーB(ピーク出力0.1TW、繰り返し周波数1kHz、パルス幅150fs、パルスエネルギー15mJ)のチタンサファイア結晶を励起するグリーンレーザーの開発を行った。グリーンレーザーの性能を表3に示す。

表3 グリーンレーザーの性能

発振器	出力:4.68W(LD 電流値 48A) パルス幅:26.8ns
前置増幅器	出力:35.5W
主増幅器	出力:192W(Max269W)
波長変換部	2倍波出力:78W(Max94.2W) 変換効率:40.6%

(3) 主な成果

具体的な成果内容:1kHzで動作する励起用パルスグリーンレーザーの開発に置いてレーザーB(繰り返し周波数1kHz、ピーク出力0.1TW)増幅部(再生増幅器、前置増幅器、主増幅器)のチタンサファイア結晶を励起する為に十分な出力(2倍波出力78W)を得ることに成功。

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

市販の励起用パルスグリーンレーザーとの比較を以下に示す。

	現状	COHERENT 社	(株)片岡製作所
		Evolution-30	KLY-QG70
繰り返し周波数	1kHz	1kHz	1kHz~50kHz
パルス幅	約20ns	<200ns	~100ns
出力	78W(Max94.2W)	>30W@5kHz	70W@10kHz

実用化に向けた波及効果

本開発を通して得られた光増幅技術をはじめ熱除去技術・熱レンズ補償技術・熱複屈折補償技術をもとに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つながっていくものと考えられる。

(5) 残された課題と対応方針について

特になし