

< 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 - b > フェムト秒レーザーの開発

小テーマ： チタンサファイアレーザー-B 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、王ゆう

( 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 100fs) の開発を行った。目標値を達成する為にパルス伸長器でパルス幅を広げた後、再生増幅器、前置増幅器、主増幅器の 3 台の増幅器を用い増幅を行い、パルス圧縮器を用いてパルスの再圧縮を行った。

研究の独自性・新規性

同クラスの製品との比較では、同程度のパルスエネルギーの場合、繰り返しが 1 桁高く、同程度の繰り返しではパルスエネルギーが 2 倍と高出力である。

研究の目標

ピーク出力 0.1TW、繰り返し周波数 1kHz、パルス幅 100fs のチタンサファイアレーザーシステムの開発。

( 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.b>フェムト秒 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 100fs) の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チタンサファイア結晶励起にグリーンレーザーを用いる。パルス伸長器を用いてパルス幅を 400ps 程度まで広げ、再生増幅器で 1W、前置増幅器、主増幅器を用いて 30W まで増幅、最後にパルス圧縮器を用いて 100fs 程度まで圧縮し、目標ピーク出力 0.1TW を達成する構成となっている(図 1)。各増幅器はそれぞれ 8.5W、15W、35W 程度の励起出力で励起を行う予定である。

本報告書ではチタンサファイアレーザーの開発について報告する。

2.パルス伸長器

本システムの発振器にはチタンサファイア発振器 (パルス幅<40fs、中心波長 793nm、出力 220mW、繰り返し 83MHz) を用いることとした。パルス伸長器には溝本数 1200 本/mm のグレーティングを用い 390ps までパルスを広げるよう構成を行った。パル

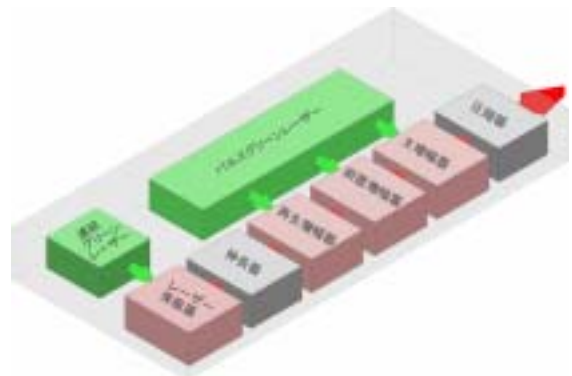


図 1 概略ブロック図

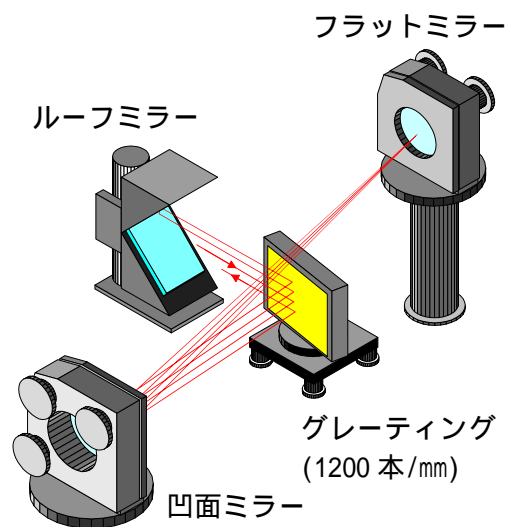


図 2 パルス伸長器構成図

ス伸長器の構成を図 2 に示す。また、チタンサファイア発振器及びパルス伸長器の性能を表 1 に示す。

表 1 パルス伸長器の性能

チタンサファイア発振器	パルス幅:<40fs 中心波長:793nm 出力:220mW 繰り返し周波数:83MHz
パルス伸長器	パルス幅:390ps (計算値) スペクトル幅:20ns 透過率:25.5%

### 3.再生増幅器

再生増幅器の構築を行った。再生増幅器はポッケルスセルを用い 83MHz のレーザー光を 1kHz 毎に切り出し再生増幅器内に取り込み増幅を行う構成である。構成を図 3 に示す。入射時の 1 パルス当たりのエネルギーは 0.68nJ (52mW、83MHz) 8.5W のグリーンレーザーで励起を行った際、1.3W (1kHz) の出力が得られた。この時の利得は  $2 \times 10^6$  倍であり、再生増幅器内でのパス回数は 20 回であった。増幅後のビームパターン及びスペクトル波形を図 4 に示す。

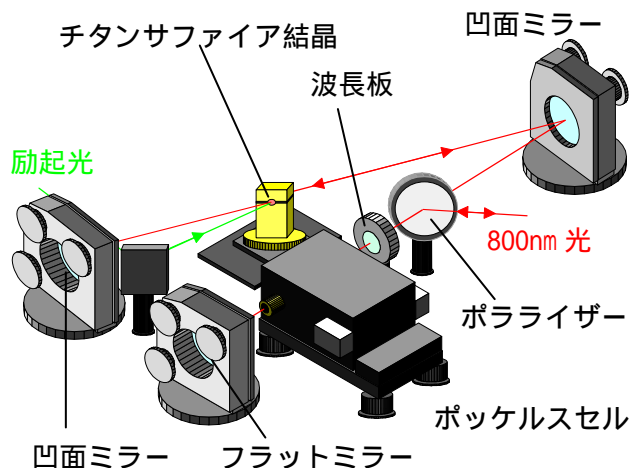


図 3 再生増幅器構成図

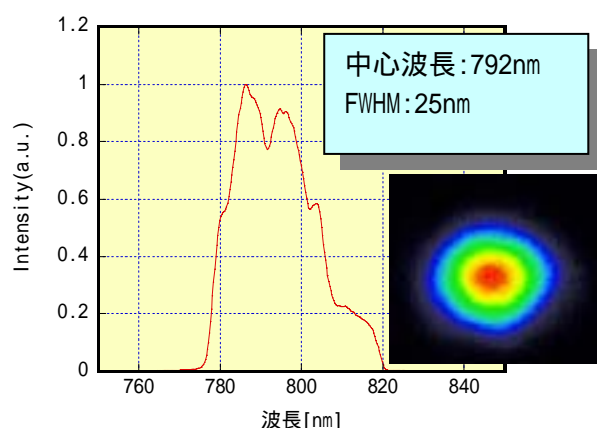


図 4 再生増幅器増幅結果

### 4.前置増幅器の開発

前置増幅器の開発では、チタンサファイア結晶 (6×6×15mm) は増幅過程における熱レンズ効果を考慮し、クライオスタット (仏国 Amplitude 社製) を用い -70 まで冷却した。構成は良好なビームパターンを保つ為、再生増幅器後のビームパターンを平凸レンズ 2 枚を用いて、前置増幅器チタンサファイア結晶付近に像転送する構成とした。前置増幅器の構成及び励起光のチタンサファイア結

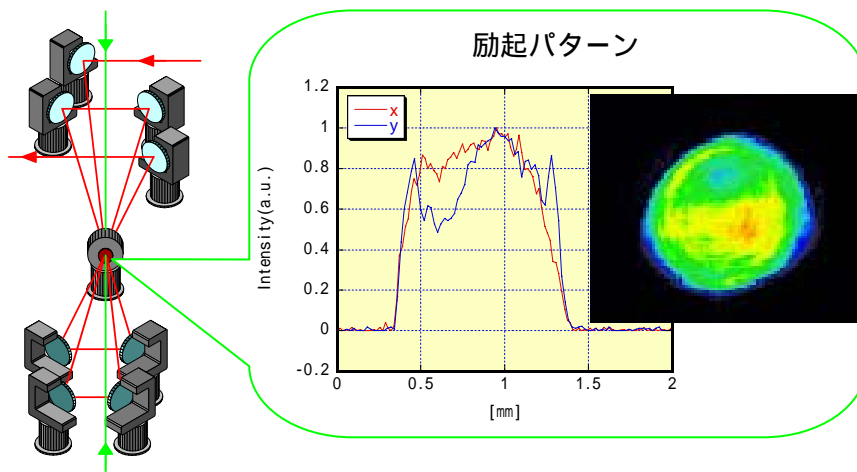


図 5 前置増幅器構成図

晶上のビームパターンを図5に、増幅の結果を図6に示す。なお増幅時のビームパターン悪化を防ぐ為、励起用パルスグリーンレーザーの波長変換部のビームパターンをチタンサファイア結晶表面に像転送して励起に用いた。

結果、14.4W 励起の時に 7.0 W の出力を得ることができ、この時の利得は 6 倍、抽出効率は 40.5% であった。また増幅後のビームパターンも図6からもわかるように良好なものであった。

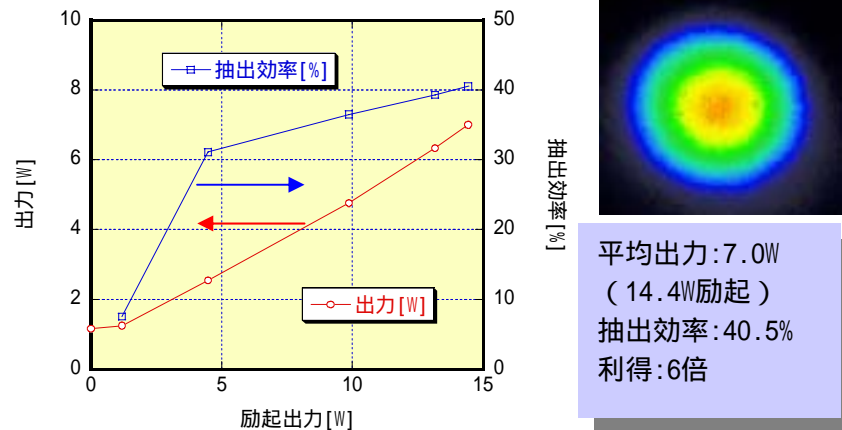


図6 前置増幅器増幅結果

### 5. 主増幅器の開発

主増幅器は、前置増幅器と同様にチタンサファイア結晶(6×6×15mm)は増幅過程における熱レンズ効果を考慮し、クライオスタット(仏国 Amplitude 社製)を用いている。そして、結晶を-70℃まで冷却し、前置増幅器後のビームパターンを平凸レンズ2枚を用いて、主増幅器チタンサファイア結晶付近に像転送している。またこの際、光学素子上でのダメージ発生を防ぐ為像転送は拡大系で構築した。主置増幅器の構成及び励起光のチタンサファイア結晶上のビームパターンを図7に、増幅の結果を図8に示す。なお増幅時のビームパターン悪化を防ぐ為、励起用パルスグリーンレーザーの波長変換部のビームパターンをチタンサファイア結晶表面に像転送して励起に用いた。

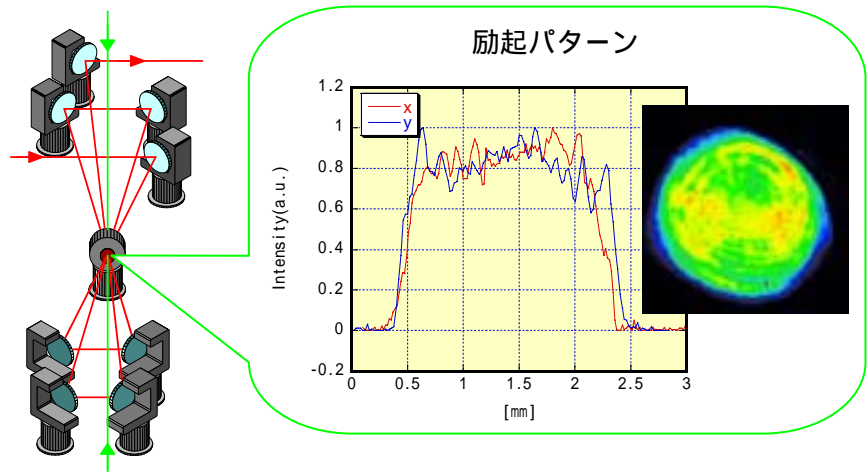


図7 前置増幅器構成図

結果、33.2W 励起の時に 17.3W の出力を得ることができ、この時の利得は 3 倍、抽出効率は 34.2% であった。また増幅後のビームパターンも前置増幅器と比較すると若干悪化したものの良好なものであった。

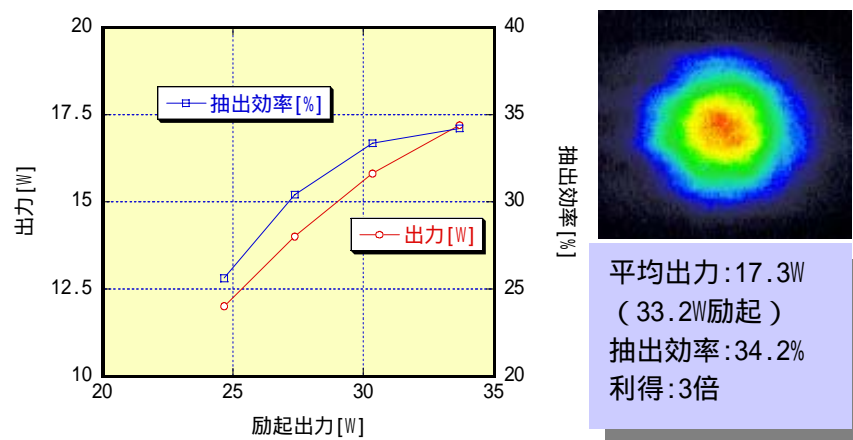


図8 主増幅器増幅結果

## 6. パルス圧縮器の開発

次に、パルス圧縮器を構築し、パルス圧縮試験を行った。グレーティングには格子間隔が1200本/mmのものを用いた。また圧縮後のレーザー光によるダメージ発生を回避する為、凸面ミラーと凹面ミラーを用いパルス圧縮器前にビームを拡大した。パルス圧縮器の構成を図9に示す。パルス幅の測定には自作のオートコリレータ(図10)を用いており、自己相関波形とビームスプリッターによるビーム分割後の透過光と反射光の光路差からパルス幅を算出した。パルス圧縮器後のスペクトル波形を図11にオートコリレータで測定した自己相関波形を図12に示す。

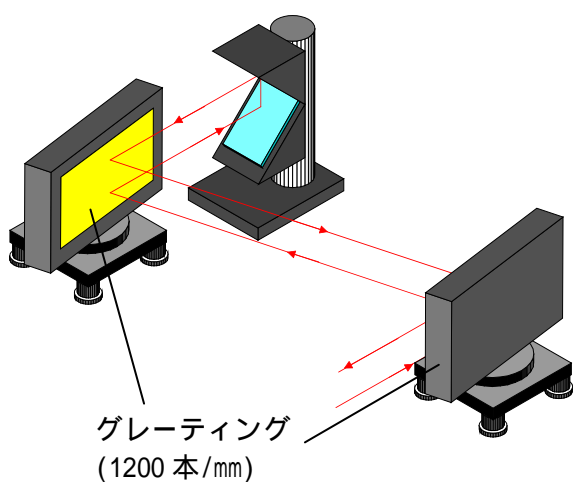


図9 パルス圧縮器構成図

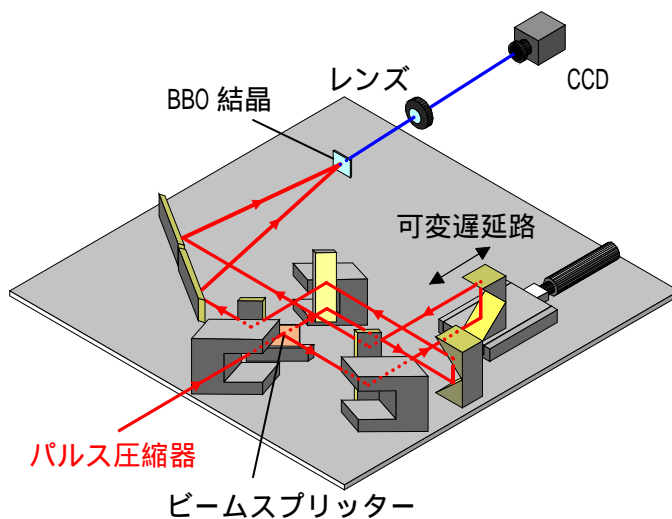


図10 オートコリレータ

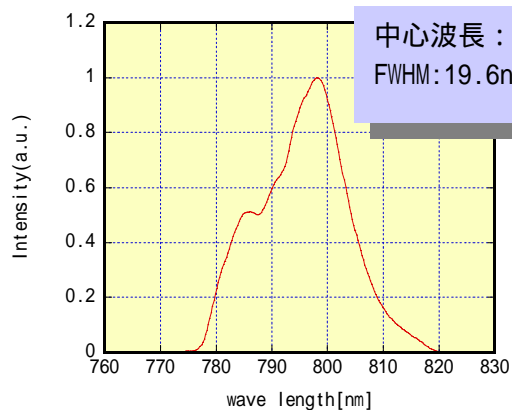


図11 スペクトル波形

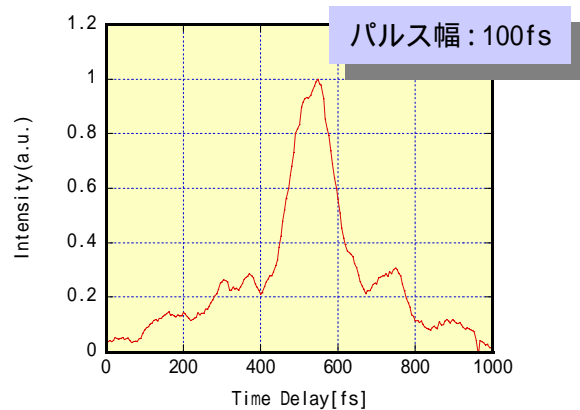


図12 自己相関波形

結果、自己相関波形から算出したパルス幅は100fsであった。また、パルス圧縮器後の平均出力10.1W(透過率58.5%)が得られた。このことから、ピーク出力0.1TWに達し目標値を満たすレーザーシステムの開発に成功した。

## 7. ビーム品質評価

ビームの品質を評価するために  $M^2$  値の測定を行った。測定はパルス圧縮器後のビームを焦点距離 1000mm のアクロマートレンズで集光し、焦点付近のビーム径を数点測定し算出した。測定結果とレンズからの距離におけるビームパターンを図 13 に示す。

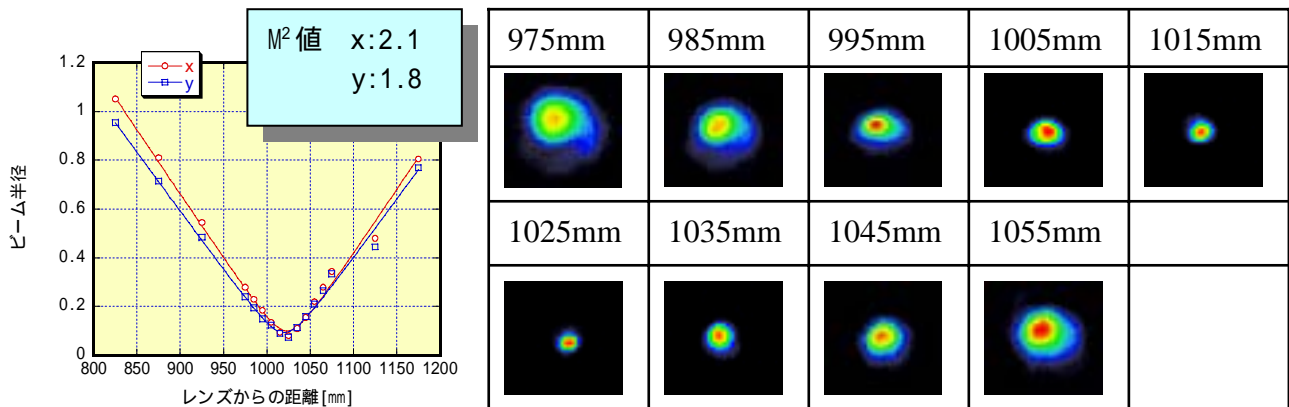


図 13  $M^2$  値測定結果

結果、 $M^2$  値は X 軸方向に 2.1、Y 軸方向に 1.8 という結果が得られた。

## 8. 小型化

装置の小型化を目的に発振器をファイバーレーザー（パルス幅 88fs、中心波長 785nm、出力 20mW、繰り返し 47.7MHz）に交換した。この際、装置の小型化の為、パルス伸長器及びパルス圧縮器に用いているグレーティングを格子間隔 2000 本/mm に変更した。構成を図 14 に示す。

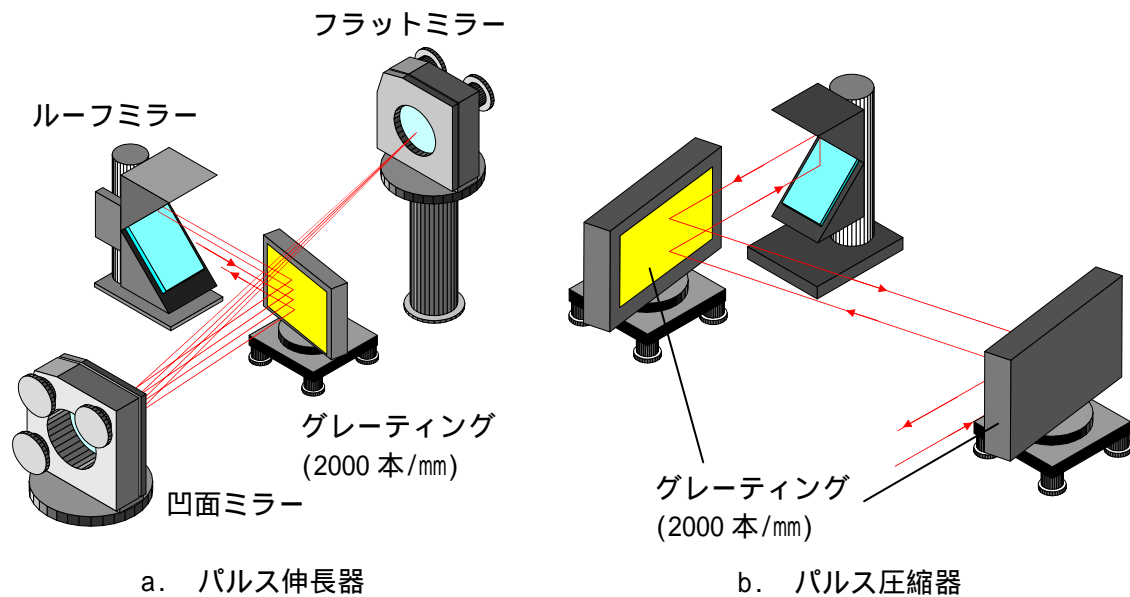
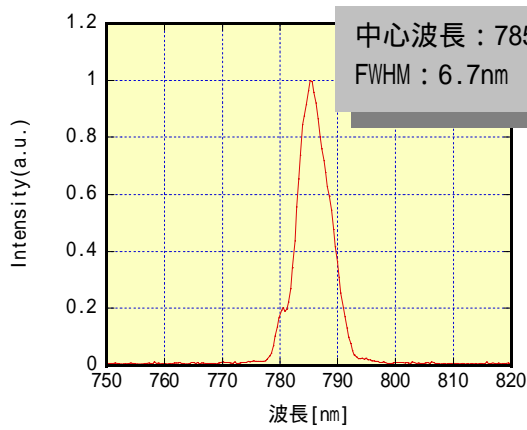
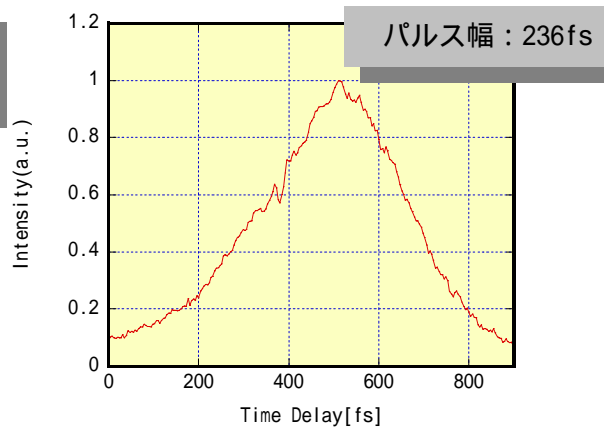


図 14 パルス伸長器及び圧縮器の構成

上記の変更を行った後、パルス伸長器で 495ps までパルス幅を広げ、再度各増幅器における増幅試験及びパルス圧縮試験を行った。この結果、各増幅器での平均出力は再生増幅器で 1.2 W、前置増幅器で 7W、主増幅器で 17.7W まで増幅でき、パルス圧縮器後で 11.3W であった。しかし、パルス圧縮を行ったがファイバーレーザーを用いた場合、最短で 236fs までしか圧縮できず、最終的なピーク強度は 0.05TW までしか得られなかった。この時のパルス圧縮器後のスペクトル波形及び、自己相関波形を図 15 に示す。



a. スペクトル波形



b. 自己相関波形

図 15 パルス圧縮結果

### 9. 加工実験

フェムト秒レーザー（発振器はファイバーレーザーを使用）を用いて金属の穴加工実験を行った。f=500mm アクロマートレンズを用いて、金属薄板の表面にレーザービームを  $47\mu\text{m} \times 73\mu\text{m}$ （楕円状分布、図 16）に集光した。レーザーの平均出力は 730mW、繰り返し率は 1kHz（中心波長 785 nm）、パルス幅は 236fs、1 パルス当たりのエネルギーは  $730\mu\text{J}$ 、ピークパワーは 3.1GW、焦点位置でのピークパワー密度は  $45.8\text{TW}/\text{cm}^2$ 。露光時間は 0.5 秒、1.0 秒、2.0 秒、そして 5.0 秒とした。金属薄板は 4 種類、全てのサンプルの厚みは 0.3mm であった。

加工した穴の表側と裏側の直径を表 2 に示す。露光時間は長くなると、穴の「壁」に吸収されるレーザーのエネルギーが増加するため、穴の壁が溶け始めた。そして、露光時間の増長と共に穴径が小さくなる傾向が確認できた。また、レーザーアブレーション特性により穴の深さ方向での加工穴形状はテーパ状になった。

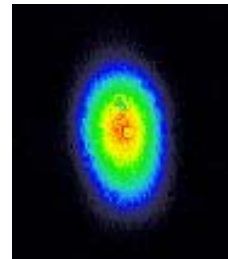


図 16 集光パターン

表 2 加工した穴のサイズ ( $\mu\text{m}$ )

材質	露光時間	0.5秒		1秒		2秒		5秒	
		表側	裏側	表側	裏側	表側	裏側	表側	裏側
SUS304 (t=0.3mm)		94 × 135	不貫通	100 × 129	48 × 51	102 × 124	57 × 51	104 × 135	54 × 52
アルミニウム (t=0.3mm)		105 × 126	40 × 38	108 × 129	42 × 62	113 × 132	61 × 50	81 × 97	55 × 50
銅 (t=0.3mm)		94 × 108	不貫通	94 × 102	不貫通	88 × 88	40 × 39	81 × 89	46 × 44
真鍮 (t=0.3mm)		106 × 110	不貫通	105 × 126	20 × 16	94 × 129	46 × 44	101 × 124	51 × 44

図 17 に加工した 4 種類金属穴の表側と裏側の加工状態を示す。これらの結果を観測すると、フェムト秒レーザーで開けた穴周辺の盛り上がりは、ナノ秒レーザーのそれらより小さいことを確認できた。なお、加工穴の隣に二つの「寄生」穴が見られた。これらの穴は、金属表面で反射した折り返しレーザー光によって加工したものと考えられる。

材質	0.5秒		1秒		2秒		5秒	
	表側	裏側	表側	裏側	表側	裏側	表側	裏側
SUS304 (t=0.3mm)		不貫通						
アルミニウム (t=0.3mm)								
銅 (t=0.3mm)		不貫通		不貫通				
真鍮 (t=0.3mm)		不貫通						

図 17 フェムト秒チタンサファイアレーザーによる金属穴加工結果

## 10.まとめ

フェムト秒 YAG レーザーの開発において、レーザーBの開発を行い、繰り返し周波数 1kHz、ピーク出力 0.1TW を達成した。チタンサファイア発振器及びファイバーレーザーを用いた際のレーザーシステムの性能を表 3 に示す。

表 3 チタンサファイアレーザーの性能表

	チタンサファイア発振器	ファイバーレーザー
発振器	パルス幅：<math><40\text{fs}</math>, 中心波長：793nm, 平均出力：220mW, 繰り返し：83MHz	パルス幅：88fs 中心波長：784nm 平均出力：20mW 繰り返し：47.7MHz
パルス伸長器	パルス幅：390ps (計算値) スペクトル幅：20nm 透過率：25.5%	パルス幅：495ps (計算値) スペクトル幅：8.22nm 透過率：63%
再生増幅器	出力：1.3W at 8.5W-pump 繰り返し：1kHz, 利得： $2 \times 10^6$ 倍	出力：1.2W at 8.5W-pump 繰り返し：1kHz, 利得： $4.5 \times 10^6$ 倍
前置増幅器	出力：7.0W at 14.4W-pump 繰り返し：1kHz, 利得：6.0 倍	出力：6.6W at 13.8W-pump 繰り返し：1kHz, 利得：7.5 倍
主増幅器	出力：17.3W at 33.2W-pump 繰り返し：1kHz 利得：3.0 倍	出力：17.3 at 31.6W-pump 繰り返し：1kHz 利得：3.2 倍
パルス圧縮器	透過率：58.5%	透過率：65.3%
全体性能	ピーク出力：0.1TW パルス幅：100fs 平均出力：10W at 1kHz	ピーク出力：0.05TW パルス幅：236fs 平均出力：11.3W at 1kHz
ビーム品質 ( $M^2$ 値)	x:2.1, y:1.8	-

(3) 主な成果

具体的な成果内容：レーザーB（繰り返し周波数 1kHz、ピーク出力 0.1TW、パルス幅 100fs）の開発に成功した。目標達成時の性能はピーク出力 0.1TW、パルス幅 100fs、平均出力 10.1W であり、ビーム品質を評価した結果、 $M^2$  値は X 軸方向に 2.1、Y 軸方向に 1.8 であった。

プレス発表件数：2

(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 Ti:Sapphire レーザーとの比較を以下に示す。表からもわかるように同程度の繰り返しのレーザーシステムと比較するとパルスエネルギーが 4 倍程度と高出力である。

	目標値	現状	Spectra-Physics 社	COHERENT 社
			Spitfire 40F-HPR	Legend-USP 高エネルギー
繰り返し周波数	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz
パルス幅	100	100fs	<40fs	<40fs
パルス出力	10mJ	10mJ	>2.0mJ	>2.5mJ
ピーク出力	0.1TW	0.1TW	>0.05TW	>0.06TW
$M^2$ 値	-	2.0	<1.5	<1.5

実用化に向けた波及効果

本システムの開発によって確立された設計および開発技術を用いることにより、より多くの応用分野に対応できるレーザーシステムが開発できる。このことが産業界に対し新しい技術開発及び産業開発のきっかけになると考えられる。

(5) 残された課題と対応方針について

特になし。