



#### 4.29 小型高繰り返し・極短パルスフェムト秒増幅システム Compact ultra-short pulse femtosecond amplified system at high repetition rate

高砂 一弥、住吉 哲実、玉木 裕介、為我井 昌司、関田仁志

サイバーレーザー株式会社

〒2223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1 KLL センター 14-505

Kazuya TAKASAGO, Tetusmi SUMIYOSHI, Yusuke TAMAKI,  
Masashi TAMEGAI, Hitoshi SEKITA

Cyber-Laser Inc.

14-505 KLL Center

3-14-1 Hiyoshi Kohoku-ku Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522 Japan

井上 典洋、河仲 準二、青山 誠、山川 考一

日本原子力研究所 関西研究所 光量子化学研究センター

〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

Norihiro INOUE, Junji KAWANAKA, Makoto AOYAMA, Koichi YAMAKAWA

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

8-1 Umemidai Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215 Japan

We started to develop a compact high repetition rate and ultrashort pulse femtosecond amplified system for material processing and scientific applications. Our final goal is 2 mJ, 20 fs laser system at 5kHz. Ti:sapphire crystal in the laser system is cooled to reduce the focal length of the thermal lens in the crystal, which cause instability of the laser output. We demonstrated 3.8 W output power from the amplifier when pumping green power was 23 W. When the efficiency of the compressor is 55%, we can obtain over 2 W.

**Keywords : Ultrashort pulse, material processing, thermal lens**

##### 1. はじめに

フェムト秒レーザーパルスは、照射ターゲット上で極めて高強度電界が得られ従来のレーザー加工にない性能が得られるため、魅力的な応用が期待されていたにもかかわらず、①取り扱いが困難、②安定性が悪い、③寿命が短い等の理由から、フェムト秒レーザーの専門家以外が使用するのには非常に困難であり、広く普及することはなかった。Moultonによって発見されたTi サファイアレーザー結晶を利用したレーザー装置が製品化され、①高安定、②高平均出力なフェムト秒パルスを比較的容易に手に入れられるようになってきた。そのため、フェムト秒パルスを用いた応用も活発に研究されるようになり、幅広く使用されてきている。特に、従来のナノ秒レーザーパルスを用いた場合、実現できなかった産業界における①フェムト秒加工、②理化学分野におけるたんぱく質などの物質解析が注目を集めている。産業界へのフェムト秒レーザー加工の導入が進まない原因の一つに加工レートが低いことがあげられており、パルスエネルギーを維持したまま 1 kHz 以上の高繰り返しにすることに

よって高平均パワーを増大する必要がある。一方、金属加工の高精度化や、理化学分野における物質の構造解析においては、20 fs 以下の短パルスの光の適用が希求されており、高繰り返し・短パルス光源の開発が期待されている。本共同研究では、金属への加工(必要エネルギー2 mJ、繰り返し5 kHz以上)、理化学分野における物質の構造解析・反応制御(20 fs以下の分解能が必要)に応用可能な5 kHz、2 mJ、20 fsのレーザーシステムの構築を行う。

平成15年度よりサイバーレーザー社と日本原子力研究所・関西研究所にて、上記レーザーの開発を目的として、下記スケジュールで共同研究をスタートした。本発表では、平成15年度の間研究成果として、再生増幅器の設計・特性について発表する。各年度の開発目標としては、下記のようになっている。

平成15年度 1 kHz、2 mJ 再生増幅システムの構築

平成16年度 5 kHz、2 mJ 増幅システムの構築

平成17年度 5 kHz、2 mJ、20 fs 増幅システムの構築

## 2. 本開発の特徴

表1：高平均出力フェムト秒レーザーシステムの特徴

	再生増幅器+ マルチパスアンプ	1段再生増幅器 (or マルチパスアンプ)	発振器
繰り返し周波数	単発～100Hz	1kHz～100kHz	1MHz～100MHz
パルスエネルギー	10mJ～100J	10 $\mu$ J～1mJ	～1nJ

世界各所で高平均出力フェムト秒レーザー装置が開発されているが、表1の3つの方向性で行われている。再生増幅器に加え、マルチパスアンプにて増幅させる手法は、日本原子力研究所が世界の最先端を行っており、1998年に10 Hz、3.3 J(圧縮前)、19 fsのシステムが完成しており、現在共同施設として使用されている。発振器から高平均出力フェムト秒を直接得る方法もあるが、繰り返し周波数が100 MHz程度と非常に高いため、パルスエネルギーとしては数 $\mu$ Jと加工・物質の構造解析に使用できるレベル(数10 $\mu$ J以上)と比較して低いため、通信、ガラス材料への導波路書き込みなどの応用に限られる。今回開発する5 kHz、2 mJ、20 fsのレーザーシステムは、いくつかの大きな技術課題があったため、これまで開発されてきていない領域である。これまでの高平均出力フェムト秒レーザーシステムの研究については、表2にまとめた。

表2：高平均出力フェムト秒レーザーシステムのこれまでの発表

繰返し周波数 (Hz)	パルスエネルギー (mJ)	平均パワー (W)	1段目の増幅器での出力 (W)	パルス幅 (fs)	段数	研究機関
5000	4	20	20	20	1	理化学のニーズ
1000	4	4	4	-	1	JAERI & Cyber Laser (2003)
10	3300	33	/	19	3	JAERI
50	240	12		0.6	25	2
1000	14	14	0.8	21	3	ISSP
1000	5.4	5.4	5.4	94	1	Quantronix
5000	7.6	38	0.75	22	3	ISSP
10000	1.77	17.7		30		
7000	1.85	13	13	24	1	Michigan Univ.
10000	1	10	10	24	1	Michigan Univ.
10000	1.84	18.4	18.4	200	1	Cyber Laser
10000000	0.007	70			1	Keller, Giesen

### 3. 実験結果

1段の再生増幅器のみで20 Wの出力を得るためには、結晶内での熱のマネージメントを行う必要がある[1]。①共振器を熱の排熱の変化に対して許容を大きくすること、②共振器設計においては、共振器モードボリュームと励起ボリュームのオーバーラップを増大させ、高効率光-光変換による排熱量の抑制が重要となる。また、オプティクス保護の観点から、波長板、偏光板等のオプティクス上でビームサイズを大きくする必要もある。上記、①、②の問題を解決するためには、Ti サファイアレーザー結晶内での熱レンズをできるだけ長くすることが重要な要素である。レーザー結晶内での熱レンズ  $f$  は、下記の式で与えられる。

$$f = K \times A / 2P_a \times (dn/dT)^{-1}$$

ここで、 $K$  は熱伝導率、 $A$  はレーザーの集光面積、 $P_a$  は注入熱量、 $dn/dT$  は、屈折率の温度に対する傾きを表す。この式によると熱レンズを長くするには、熱伝導率が大きく、 $dn/dT$  が小さい方がよいことが分かる。

表3：結晶温度による熱レンズの変化

温度	熱伝導率(W/mm)	dn/dT	熱レンズの焦点距離(mm)
290	0.046	$1.3 \times 10^{-5}$	22
80	0.96	$1.8 \times 10^{-6}$	3280
30	20.7	$1.8 \times 10^{-6}$	70700

Cu	290	0.4		
	80	0.57		
	30	4.3		

サファイアは、冷却を行うことで熱伝導率が大きくなり、 $dn/dT$  が小さくなるため、熱レンズを長くすることが可能である。本システムでは、結晶を冷却することによって、熱レンズを 3000 mm 程度にしており、熱レンズが励起光パワーの変動、結晶の熱接触の変動によって 2000 mm~10000 mm に変化した場合においても励起光とのオーバーラップ効率が 95%以上であるような共振器構成を取っている。図1に熱レンズの焦点距離に対するビームウエストでのビームサイズを書いたグラフを示した。本技術には、サイバーレーザー社製 FS-10 の結晶保持技術、結晶冷却技術、共振器設計技術が採用されている。

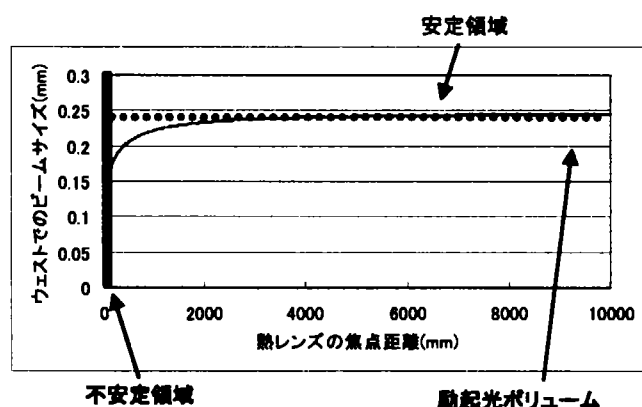


図1：熱レンズに対するビームウエストでのビームサイズ依存性

熱レンズの焦点距離が 100 mm 以上で安定領域にあり、高い安定性を確保できる。励起レーザーには、全固体 Nd:YLF レーザーを用い、最大 23W で励起した際に、圧縮前で 3.8 W の出力を得た。図2に 1 kHz 再生増幅器の圧縮前に入出力特性のグラフを示した。パルス圧縮器の透過率を 55%と仮定すると、本年度の目標である出力エネルギー 2mJ を達成できると考える。

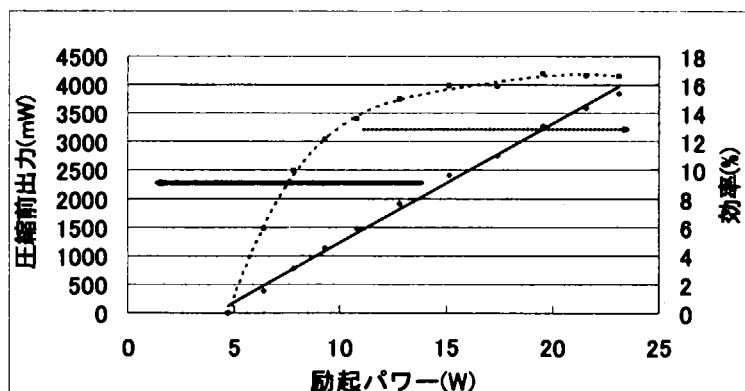


図2：圧縮前入出力特性

参考文献

[1] S. Backus, R. Bartels, S. Thompson, R. Dollinger, H. C. Kapteyn, and M. M. Murnane, Opt. Lett., Vol. 26, pp. 465 (2001)

## 5. ポスター発表「一般発表」

This is a blank page.