



4.18 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、為我井 昌司、関田仁志

サイバーレーザー株式会社

〒135-8070 江東区青海 2-38 テレコムセンタービル 2階

Kazuya TAKASAGO, Tetusmi SUMIYOSHI, Yusuke TAMAKI,

Masashi TAMEGAI, Hitoshi SEKITA

Cyber-Laser Inc.

Telecom Center Building 2F, 2-38 Aomi Koto-ku, Tokyo 135-8070, Japan

青山 誠、横山 啓一、杉田 明宏、井上 典洋、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. Ti:sapphire crystal in the laser system is cooled to reduce the effects of the thermal lens in the crystal, which cause instability of the laser output. We obtained 7.6 W power in the amplifier with the spectrum width of over 50 nm from the amplifier when pumping green power was 18 W. When the efficiency of the compressor is 55%, we can obtain over 4 W with the pulse duration of sub-25-fs. Our final goal is 2 mJ, 20 fs laser system at 5 kHz (10W) and 1 kHz system is this year's goal (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、従来色素媒質を使用していたことから、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是非常に困難であり、広く普及することはなかった。1985年にMoultonによってTiサファイアレーザー結晶が発明されたことにより大きく進展した。全固体レーザー装置を構成することが可能となり、製品化も進み、高安定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。これにより、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①非熱加工プロセスによる超微細加工、②理化学分野におけるたんぱく質などの時間過渡解析などの研究が近年注目を集めている。しかしながら、光学特性、特にエネルギー、時間幅を30fs以下に維持したまま高繰り返しを実現することが困難であったため、これらの応用の進展

が遅くなっていた。理化学分野における物質の構造解析においては、20fs 以下の短パルス of 光の適用が希求されており、高繰り返しかつ高エネルギーであることも必要条件となっている。理化学界における 20fs 以下のパルスの応用例として、日本原子力研究所・横山らにより、セシウム原子の選択的励起が報告されているが[1]、発振器を用いた実験であり、完全励起するためには、増幅パルスを高繰り返しで使用する必要がある。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 16 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への方策決定

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

	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 μ 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 μ J と加工・物質の構造解析に使用できるレベル(数 10 μ 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 5kHz、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。

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[2]。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、光学系の保護の観点から、波長板、偏光板等の光学系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の焦点距離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焦点距離の変化

温度	熱伝導率(W/mm)	dn/dT	熱レンズの焦点距離(mm)
290	0.046	1.3×10^{-5}	22
80	0.96	1.8×10^{-6}	3280
30	20.7	1.8×10^{-6}	70700
銅	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、熱レンズの焦点距離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伝導性を高め、結果として熱レンズの焦点距離を 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。表3に結晶温度による熱レンズの焦点距離の変化を示す。比較のため金属で最も熱伝導のよい銅の熱伝導率の値も示すが、80K 以下に冷却すると銅よりも熱伝導率がよくなる事が分かる。

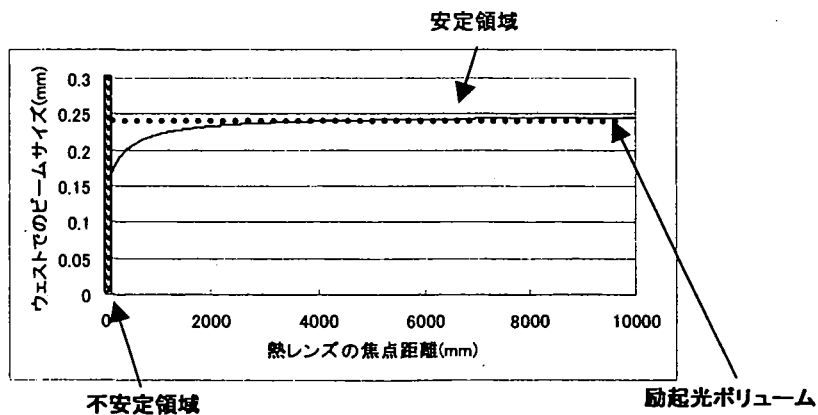


図1: 熱レンズに対するビームウエストでのビームサイズ依存性

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。熱レンズの焦点距離の変化に対するロバスト性が高いため、本構成は、5kHz に繰り返しを上げ、100W 以上の励起光を使用した場合にも適用可能である。また、これらの技術には、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。

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 18W で励起した際に、内部蓄積パワー7.6 Wを得た。図2に 1 kHz 再生増幅器の励起パワーに対する内部蓄積パワー特性のグラフを示した。また、図3にスペクトル制御を行った結果のスペクトルを示した。本スペクトルのフーリエ限界パルスは、21fs であり、パルス圧縮器の透過率を 55%と仮定すると、ポッケルスセルでの切り出しを最適化することで、目標である出力エネルギー \sim 2mJ、パルス幅 \sim 20fs を達成できると考える。図4に現在得られている自己相関波形を示す。現在は、初期実験データが得られたばかりの段階であり、52 fs とフーリエ限界のパルス幅よりは広がっているが、ストレッチャー、コンプレッサー、再生増幅器の更なる最適化(ストレッチャー構成、コンプレッサー構成、調整、ラウンドトリップ数などの最適化)により、短パルス化が可能であると考えられる。

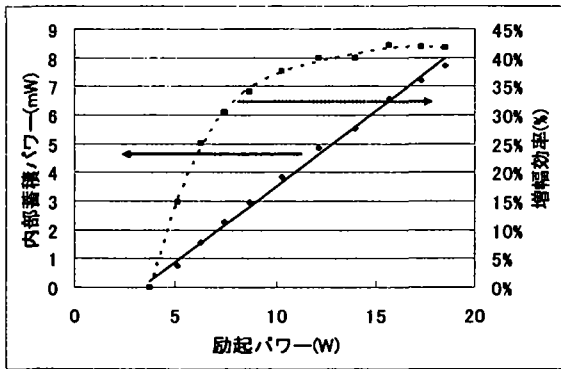


図2：増幅器の励起パワーに対する内部蓄積パワー及び増幅効率特性

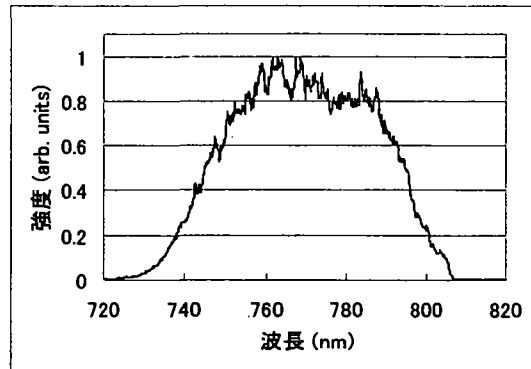


図3：増幅後のスペクトル (半値幅：58nm)

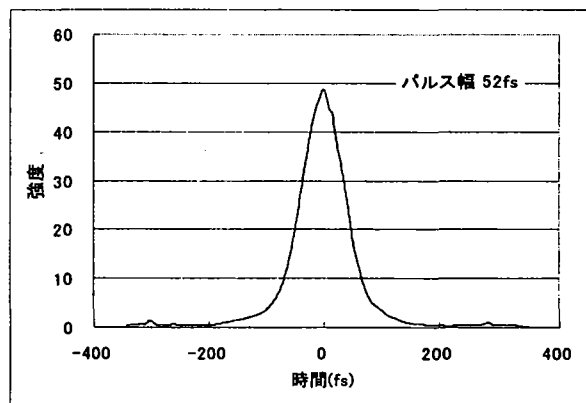


図4：自己相関波形 (パルス幅 52 fs)

参考文献

[1] K. Yokoyama, et.al, J. Chem. Phys., 120, 9446 (2004)
 [2] S. Backus, R. Bartels, S. Thompson, R. Dollinger, H. C. Kapteyn, and M. M. Murnane, Opt. Lett., Vol. 26, pp. 465 (2001)