

# ペタワット固体レーザーシステム

山 川 考 一

## Petawatt Solid-State Laser Systems

Koichi YAMAKAWA

Recent advances in petawatt peak power laser sources are making intensities approaching  $\sim 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> available for the use in various applications ranging from high energy particle beam generation to medical application. In this article, a design and performance of a petawatt Ti:sapphire laser system based on chirped-pulse amplification (CPA) are presented. Further developments of emerging solid-state CPA lasers towards higher intensities and higher repetition rates are also described.

**Key words:** solid-state lasers, high intensity, ultrafast optics, optical pulse compression, high field science

固体レーザーは、1960年のルビーレーザーの発振により幕を開け、その出力の向上は装置の巨大化とともに着実に進歩してきた。希土類イオンを添加した結晶またはガラスからなる固体レーザーは、有機色素や気体レーザーに比べて飽和フルーエンス<sup>\*1</sup>が高く、大出力動作に適している。最新の代表的な大出力レーザーは、慣性核融合研究を目的として開発された米国ローレンス・リバモア研究所(リバモア研)のネオジウム(Nd)ガラスレーザーシステム National Ignition Facility (NIF) である。容積 350000 m<sup>3</sup> の建家に収容される NIF は、192本のレーザービームを有し、総合出力エネルギー 1.8 MJ (メガジュール)、ピーク出力 500 TW (テラワット、テラは1兆) の紫外光を発する。

一方で、1985年のチャープパルス増幅(CPA)法の発明<sup>1)</sup>とチタンサファイア結晶の登場<sup>2)</sup>によってめざましい発展を遂げてきた超短パルスレーザーは、テーブルサイズの装置から 100 TW ~ 1 PW (ペタワット、ペタは1000兆) 級のピーク強度が得られるまでになり<sup>3-8)</sup>、今日ではこのクラスのレーザーが市販品として販売されるに至っている。このようなペタワット級のレーザーを集光することによって生成される光強度は、容易に  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> 以上に

も達し、これは水素原子内の電子が原子核から受けるクーロン力の 170 倍にも相当し、原子内の電子はその瞬間速度が光速近くまで加速され、相対論効果によって質量変化が起こる。また、ギガガウスに及ぶ磁場や 10 keV の黒体放射に相当するエネルギー密度が物質の振る舞いを支配するようになり、従来不可能であった光と物質との新たな相互作用が可能となった<sup>9)</sup>。

Strickland と Mourou によって提案された CPA 法は、レーザー発振器からの超短パルス光のパルス幅を分散によって引き延ばし(これをチャープパルスとよぶ)、増幅の際のレーザーピーク強度を低く保つ。その後、チャープパルス光に先ほどとは逆の分散を与えることにより、もとのパルス幅に再圧縮するもので、通常のレーザー増幅と比べて 10 万倍以上のピーク出力が得られる。

## 1. ペタワット固体レーザーシステムの特徴

### 1.1 ペタワットガラスレーザーシステム

1998年にリバモア研は NOVA レーザーの 1 ビームを CPA 化し、1.5 PW の世界最高出力を達成した<sup>10)</sup>。また、システム前段部は光パラメトリックチャープパルス増幅器

<sup>\*1</sup> 飽和フルーエンスは誘導放出断面積の逆数に比例しており、飽和フルーエンスが小さいほどレーザーエネルギーの取り出しは楽になるが、逆に大きなエネルギーを媒質中に蓄積することが困難になる。

(OPCPA), 主増幅部はネオジウムガラスレーザー増幅器で構成されるハイブリッドシステムにおいて, 1.1 PW のピーク出力が達成されている<sup>11)</sup>. ネオジウムガラスレーザーはチタンサファイアよりもさらに飽和フルエンスが高く, キロジュール (kJ) 級の高エネルギー増幅に適している. また, 上準位寿命が長いので, フラッシュランプ等で容易に増幅器を励起することが可能である. しかしながら, 増幅媒質にガラスを使用しているため熱伝導率が低く, 繰り返し動作には適していない. また, 利得帯域幅はピコ秒からサブピコ秒程度の発生に適している. 最近, さらなる高エネルギー動作 (~ 10 kJ) が可能なネオジウムガラスレーザーとして, LFEX レーザー (大阪大学) や Omega EP レーザー (米国防立ジョージア工科大学) が稼働を開始した.

## 1.2 ペタワットチタンサファイアレーザーシステム

チタンサファイアはガラスレーザーに比べ利得帯域幅が広いので, 超短パルス光の高出力化に適している. さらに, チタンサファイアはネオジウムガラスなどに比べて熱伝導率が格段に優れ, 高繰り返し動作が容易なため, 繰り返し 10 Hz で 100 TW のピーク出力<sup>3)</sup>, 1 kHz で 1 TW のピーク出力<sup>12)</sup> (平均出力はともに 20 W) が得られている. また, チタンサファイア増幅器の励起には, Nd:YAG あるいは Nd:YLF レーザーの第二高調波が利用可能であり, 市販の励起光源を用いて容易に増幅システムを構築することができる.

1986 年にチタンサファイアレーザーの発振に初めて成功してからわずか数年の後, サブテラワット級の出力が得られ, その後数テラワット級の出力のチタンサファイアレーザーシステムが開発されている. そして, 1990 年代後期にかけては数十テラワット級が登場しはじめ, 1998 年には日本原子力研究所 (原研, 現日本原子力研究開発機構) において, 10 Hz の繰り返しで動作する 100 TW チタンサファイアレーザーシステムが開発された<sup>3)</sup>. また, 1999 年にはリバモア研において, 単発動作ではあるが, 200 TW のチタンサファイアレーザーシステムが開発された<sup>4)</sup>, 2003 年には再び原研において, 0.85 PW の出力を達成した<sup>6)</sup>. その後は, 仏国<sup>7)</sup>, 米国<sup>8)</sup>, 中国, 英国, 韓国などでペタワット級のチタンサファイアレーザーシステムが続々と誕生した.

## 2. ペタワットチタンサファイアレーザーシステムの例

原研が開発したペタワットチタンサファイアレーザーシステムの全景写真を図 1 に示す. 以下に, このレーザーシステムを構成するコンポーネントの役割とその特徴につい



図 1 ペタワットチタンサファイアレーザーシステムの全景.

て解説する.

### 2.1 発振器

まず, 増幅システムの発振器としては, カーレンズモード同期 (あるいは自己モード同期ともよぶ) チタンサファイアレーザー発振器が用いられる. チタンサファイアレーザーの場合, その利得帯域幅が 230 nm にもおよぶ原理的には約 3 fs の光パルスの発生も可能であるが, 10 fs 以下のパルス幅を得るには, 媒質内で生じる高次分散の補償, レーザー出力鏡の帯域等が重要となり, 共振器外でのパルス圧縮なしにチタンサファイア発振器から直接得られる最短パルス幅は約 5 fs である<sup>13)</sup>. われわれが採用した発振器は, レーザー共振器内で生じる分散を補償するためチャープミラー<sup>14)</sup> とよばれる分散補償用誘電体多層膜ミラーを用いたもので, 安定してサブ 10 fs のパルス幅を有するレーザー光を発生する.

### 2.2 パルス伸張器

レーザー発振器からの超短光パルスは, 増幅前にパルス伸張器によってパルス幅を  $10^4$  から  $10^5$  倍に伸張する (100 ps ~ 1 ns 程度). パルス伸張器の一般的な構成は, 非平行に配置した 2 枚の回折格子対と, その間に配置した倍率 1:1 の望遠鏡よりなる. パルス幅 100 fs 以上では望遠鏡には球面レンズを用いることが可能であるが, それ以下のパルス幅では色収差やパルスフロントの歪みを避けるため, 反射型の光学系で構成される. 特にパルス幅 50 fs 以下では, 先の要因とともに高次分散 (特に 4 次分散以上) の補償が不可欠となり, a) パルス伸張器と圧縮器とで異なる溝本数の回折格子を用いて 4 次分散を補償する方式<sup>15)</sup>, われわれが採用している b) 伸張器内の望遠鏡にシリンドリカルミラーを用い, その非点収差を利用して 4 次分散を補償する方式<sup>16)</sup>, 等が代表例である.

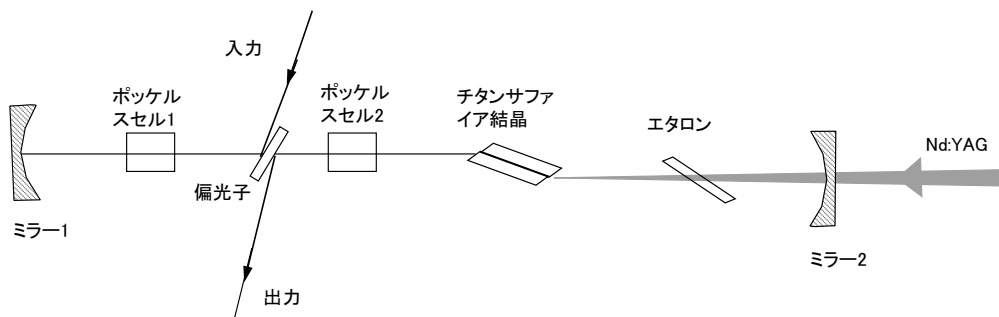


図2 再生増幅器.

### 2.3 前置増幅器

パルス幅 10 fs 程度のチタンサファイア発振器から得られる単一パルスエネルギーは約 2 nJ であり、レーザー増幅によりペタワット級の出力を達成するには 1 億倍以上の利得が前置増幅器に要求される。

図2に示す再生増幅器<sup>17)</sup>は、2枚のミラーによって共振器を構成し、チャープパルス列から種パルスとなる1パルスをポッケルスセルスイッチ等によって共振器内に取り込み、共振器内の同一光路を何度も往復し、飽和増幅に達するまで光の増幅が繰り返されて(再生)再びポッケルスセルスイッチによって増幅光を取り出す方式である<sup>25)</sup>。この増幅方式は共振器によってモードが決まるのでビーム品質がよく、アラインメントも容易で、飽和増幅に達するまで何度も往復することが可能なので無理な強励起を必要とせず、かつ総合効率も高い、等の利点をもつ。

パルス幅 30 fs 以下の極短パルス増幅システムにおいては、波長に依存した増幅器の利得特性により、極短パルス光のスペクトル狭帯域化が生じる。したがって、上述したパルス伸張器、圧縮器によって、レーザーシステムの分散を完全に補償できたとしても、パルス圧縮後の光パルスのパルス幅は発振器出力の2倍以上に広がってしまう。これによって得られる最短パルス幅はせいぜい 50 fs までが限界であり、10 fs 台の増幅パルスを得るのは困難であった。この限界を破る新技術として、再生パルス整形 (regenerative pulse shaping) 法が提案された<sup>18)</sup>。この手法は、図2中に示すような波長によって異なる透過率のフィルター(エタロン等)を用いることで増幅過程において実効的な利得幅を広げ、かつ任意の形状に形成するものである。

図3は再生増幅器での超広帯域光パルスの増幅実験の結果を示し、図3(a)は波長フィルターを用いない場合の増幅スペクトル波形(半値全幅 28 nm)、図3(b)は厚さ 3 μm のエタロン板2枚を用いた場合のスペクトル波形(半値全幅 82 nm)である。(b)の場合、(a)と比べて約3倍のスペクトル幅が得られている。また、再生増幅器の共振

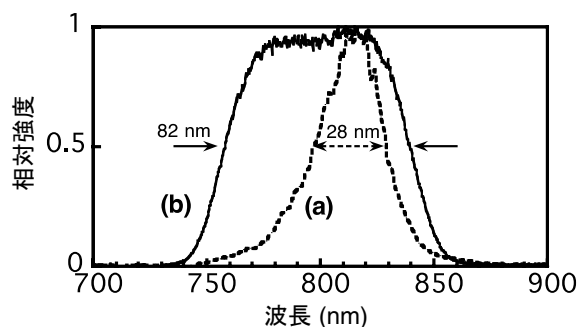


図3 レーザースペクトル整形の実験結果。(a)はスペクトルフィルターを用いない場合、(b)はスペクトルフィルターとして2枚のエタロン板を用いた場合の増幅パルスのスペクトル波形。

器構成を図2に示す直線型からリング型に改良することにより、より広帯域光パルスの増幅に成功している<sup>19)</sup>。最近では、こうしたフィルターを再生増幅器内に挿入する以外に、ミラー自身に波長によって異なる反射率の多層膜を施すことにより、スペクトル狭帯域化を抑制することに成功している<sup>20)</sup>。

こうした再生パルス整形技術と任意の位相制御が可能な液晶位相変調器や音響学位相変調器などを併用することにより、より短パルス化あるいは任意波形の形成を目指した制御技術開発が継続して進められている<sup>21)</sup>。

### 2.4 主増幅器

例えばパルス幅 20 fs でピーク出力 100 TW を得るには、増幅後に 3 J 以上のエネルギーが必要となる。この増幅器に使用されるチタンサファイア結晶のサイズは、直径 30 mm 以上、長さ 25 mm 程度となる。このクラスの増幅器の励起に必要な Nd:YAG レーザーの出力はグリーン光で 7 J 以上となり、市販の Nd:YAG レーザー(グリーン光出力で最大 1.5 J)では及ばない。そこで、市販の Nd:YAG レーザーを5台以上併用する方式<sup>7)</sup>により、高エネルギーが出力できる Nd:ガラスレーザーを用いる方式<sup>4)</sup>が採用されている。一方、われわれのグループでは、単体で高エネルギーと高繰り返し動作および高ビーム品質を可能にする



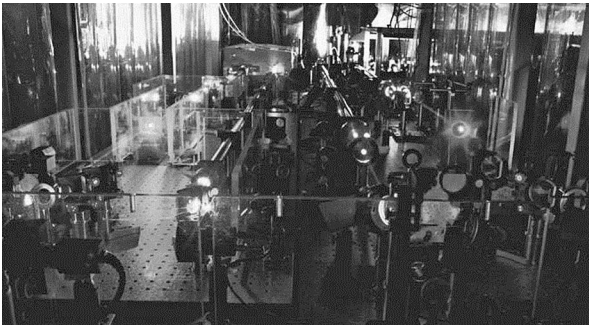


図4 Nd:YAG グリーンレーザーで励起される 100 TW チタンサファイア増幅器。

Nd:YAG レーザーを専用に開発した<sup>22)</sup>。これにより、基本波光 (1064 nm) の出力エネルギー 14 J、波長変換後の二倍高調波光 (532 nm) の出力エネルギーとして 7 J が繰り返し数 10 Hz で得られた。この Nd:YAG レーザーの励起エネルギー 6.4 J のとき、チタンサファイア増幅器を 4 パスした後の出力エネルギーとして 3.3 J が得られている<sup>3)</sup>。これはグリーン光で励起されるチタンサファイア増幅器の量子効率限界の 90% 以上に相当する。図 4 はチタンサファイア結晶にグリーン光が入射し、レーザー増幅が行われている様子を示している。なお、この増幅パルスを実圧縮することにより、ピーク出力 100 TW、パルス幅 20 fs の光パルスが得られている<sup>3, 22)</sup>。

その後ペタワット級の出力を得るには、増幅器のサイズとして、図 5 に示すような直径 80 mm、厚さ 33 mm 程度のチタンサファイア結晶が用いられる。ここでは、結晶の大口径化に伴い発生する寄生発振<sup>\*2</sup>の抑制が大変重要となる。特にチタンサファイアは利得が高く、かつ屈折率がきわめて大きいため、寄生発振が容易に成長する。そのため、チタンサファイア結晶と同等の高屈折率 ( $n = 1.7$ ) を有する熱可塑性プラスチックを結晶の周囲にクラディングとして用いる技術が開発された<sup>6, 23)</sup>。クラディングには光吸収剤として炭素粒子を混入し、これにより励起エネルギー 90 J まで寄生発振が生じないことが増幅モデルによって確認されている。実際の増幅実験では、波長変換したガラスレーザーのグリーン光で増幅器を励起したところ、励起エネルギー 65 J に対し、増幅器を 3 パスした後の出力エネルギーとして 37.4 J が得られた。この増幅器の場合にも、グリーン光からチタンサファイア増幅光への変換効率は 50% 以上に達し、寄生発振を完全に抑制すると

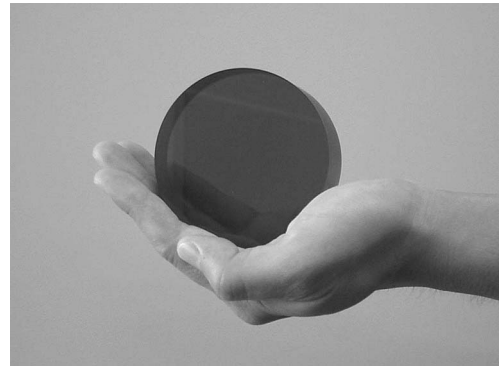


図5 直径 80 mm のペタワットチタンサファイア結晶。

もに、理論限界に近い量子効率でレーザー増幅を行うことに成功している。このペタワット級のチタンサファイアレーザーの繰り返しは 20 分に 1 ショット程度であるが、これは励起レーザーの繰り返し数で制限されている。上述の 100 TW レーザーシステムで達成されている平均出力 20 W を適用すると、ペタワット級のシステムにおいても 1 Hz の繰り返し動作はなんら問題ないはずである。

## 2.5 パルス圧縮器

チャープパルス増幅後のレーザー光は、再び回折格子対によってパルス圧縮され、極短パルス・高ピーク出力レーザー光が得られる。パルス圧縮器は空气中を伝搬する際に生じる非線形効果を抑制するために、図 6 (a) に示すように真空中に配備される。

ペタワット級チタンサファイアレーザーシステムで採用されているパルス圧縮器は、図 6 (b) に示すように真空中に配置された 4 枚の回折格子対 (溝本数 1480 本 /mm、格子サイズ 165 mm × 220 mm および 210 mm × 420 mm) で構成され、ダブルパス構成のパルス圧縮器に比べて格子あたりの面積を半分程度に抑えることができる。この金コート型回折格子は、ホログラフィック方式によって回折格子が製作されるため、最大で直径 1 メートル級のものも製作され、核融合用の大型ネオジウムガラスレーザーのパルス圧縮器としても数多く採用されている<sup>14)</sup>。これらの回折格子は、格子サイズが大きいことと、溝形状の設計によっては回折効率 94% 程度が得られ、CPA 増幅システムにおける最終コンポーネントとしては損失を最大限に抑えられるため、非常に大きな利点である。

使用したパルス圧縮器の全体効率は 75%、パルス圧縮後のパルス幅は 33 fs、最終ピーク出力は 0.85 PW に達す

\*2 レーザー増幅媒質内での励起エネルギー密度が高くなると、本来レーザー光を取り出したい方向とは違う方向に ASE (自然放出光) が発生する。そしてこの ASE が媒質端面等を多重反射して媒質内部で増幅が繰り返され、発振閾値を超えるようになると寄生発振が生じて媒質内部のエネルギーが増幅光として取り出せない状態となり、増幅効率の大幅な低下をもたらす。

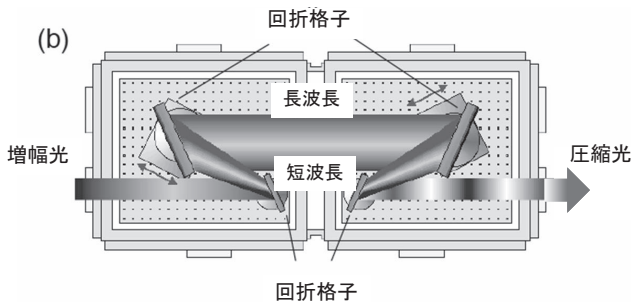


図6 (a) ペタワットレーザー用パルス圧縮器, (b) パルス圧縮器のレイアウト。

る。このレーザー光を短焦点（焦点距離 150 mm）の軸外し放物面鏡を用いて集光することにより、ZW（ゼタワット、ゼタは $10^{21}$ ） $/\text{cm}^2$ 以上の集光強度が得られる。さらに、近年発展が著しい波面補償システムを導入することにより、 $10^{23}/\text{cm}^2$ を超えるレーザー強度も実現可能となるであろう。

近年、より損傷閾値の高い誘電体多層膜回折格子も開発されており、おもに核融合用の大型 Nd: ガラスレーザーのピコ秒パルスの圧縮器に使用されはじめています。より短パルス光（50 fs 以下）のパルス圧縮では、回折格子の損傷閾値はエネルギーフルエンスではなくピーク強度に依存した多光子吸収機構によって決まるので、新たな損傷閾値の評価法が必要となる。

以上紹介したように、小型でかつ安定したサブ 10 fs チタンサファイアレーザー発振器の開発、高次の分散を高精度に補償するパルス拡張・圧縮技術、スペクトル狭帯化を制御するパルス整形技術、寄生発振を抑制し、高エネルギー増幅を可能にする高効率レーザー増幅技術などの開発により、ペタワット級のチタンサファイアレーザーシステムの開発が可能となった。

現在も欧米を中心としてさまざまなペタワットあるいはそれ以上の出力のレーザー開発が進行しており、米国リバモア研では、E23 プロジェクト<sup>24)</sup>とよばれる半導体レー

ザー励起高出力固体レーザー Mercury を励起光源として 10 Hz 動作するペタワットチタンサファイアレーザーの開発を進めている。レーザー集光強度は波面補償鏡の併用により  $10^{23} \text{ W}/\text{cm}^2$  以上を目指し、陽子が直接光速近くまで加速される超相対論領域に迫る計画である。また欧州では、ELI (Extreme Light Infrastructure, <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>) とよばれる世界最高出力を目指したレーザーシステムの開発を進めており、フェムト秒パルスでサブエキサワット ( $\text{EW} = 10^{18} \text{ W}$ ) のピーク出力を達成し、超高強度場光科学・相対論光科学、アト秒レーザー科学、レーザー核科学などの開拓を目指している。さらに、欧州では高速点火核融合研究をはじめとする超高強度場を利用した多様な研究を目的に、HiPER (High Power Laser Energy Research Facility, <http://www.hiper-laser.org/index.asp>) 計画が提案されている。200 kJ の爆縮用レーザー (40 ビーム, パルス幅 5 ns) と 70 kJ の点火用レーザー (1 ビームバンドル, パルス幅 10 ps) を 2020 年に完成させることを目指している。

このように、今後さらに小型で高繰り返しペタワット級レーザーが普及し、また基幹装置としてエキサワット級の装置が完成すれば、極限的な光電場を利用した新しい光科学分野とテラヘルツからガンマ線にいたる広範囲の高輝度電磁波やアト秒コヒーレント X 線の発生、高エネルギー小型電子加速器の開発、高エネルギー粒子線発生によるがん治療研究など、多種多様な応用分野がひらかれていくものと期待される。

## 文 献

- 1) D. Strickland and G. Mourou: "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219-221.
- 2) P. F. Moulton: "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ," *J. Opt. Soc. Am. B*, **3** (1986) 125-133.
- 3) K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka, T. Kase, Y. Akahane and H. Takuma: "100-TW sub-20-fs Ti:sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1468-1470.
- 4) J. D. Bonlie, F. Patterson, D. Price, B. White and P. Springer: "Production of  $>10^{21} \text{ W}/\text{cm}^2$  from a large-aperture Ti:sapphire laser system," *Appl. Phys. B*, **70** (2000) S155-S160.
- 5) M. Pittman, S. Ferre, J. P. Rousseau, L. Notebaert, J. P. Chambaret and G. Cheriaux: "Design and characterization of a near-diffraction-limited femtosecond 100-TW 10-Hz high-intensity laser system," *Appl. Phys. B*, **74** (2002) 529-535.
- 6) M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda and H. Kiriya: "0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1594-1596.
- 7) F. Ple, M. Pittman, G. Jamelot and J.-P. Chambaret: "Design and demonstration of a high-energy booster amplifier for a high-repetition rate petawatt class laser system," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 238-240.
- 8) V. Yanovsky, V. Chvykov, G. Kalinchenko, P. Rousseau, T.

- Planchon, T. Matsuoka, A. Maksimchuk, J. Nees, G. Cheriaux, G. Mourou and K. Krushelnick: "Ultra-high intensity- 300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate," *Opt. Express*, **16** (2008) 2109–2114.
- 9) C. H. Keitel: "Relativistic quantum optics," *Contemp. Phys.*, **42** (2001) 353–363.
  - 10) M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart, G. Tietbohl, J. A. Britten, C. Brown, S. Harman, B. Golick, M. Kartz, J. Miller, H. T. Powell, M. Vergino and V. Yanovsky: "Petawatt laser pulses," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 160–162.
  - 11) E. W. Gaul, M. Martinez, J. Blakeney, A. Jochmann, M. Ringuette, D. Hammond, S. Marijanovic, R. Escamilla and T. Ditmire: "Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier," *Appl. Opt.*, **49** (2010) 1676–1681.
  - 12) V. Bagnoud and F. Salin: "Amplifying laser pulses to the terawatt level at a 1-kilohertz repetition rate," *Appl. Phys. B*, **70** (2000) S165–S170.
  - 13) R. Ell, U. Morgner, F. X. Krtner, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, M. J. Lederer, A. Boiko and B. Luther-Davies: "Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **26** (2001) 373–375.
  - 14) R. Szipocs, K. Ferencz, Ch. Spielmann and F. Krausz: "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 201–203.
  - 15) J. Squier, C. P. J. Barty, F. Salin, C. Le Blanc and S. Kane: "Use of mismatched grating pairs in chirped-pulse amplification systems," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 1638–1641.
  - 16) B. E. Lemoff and C. P. J. Barty: "Quintic-phase-limited, spatially uniform expansion and recompression of ultrashort optical pulses," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1651–1653.
  - 17) K. Yamakawa, A. Magana, P. H. Chiu and J. D. Kmetec: "Generation of high peak and average power femtosecond pulses at a 10 Hz repetition rate in a titanium-doped sapphire laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-30** (1994) 2698–2706.
  - 18) C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksi, C. Rose-Petruck, J. Squier, A.-C. Tien, K. R. Wilson, V. V. Yakovlev and K. Yamakawa: "Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 219–221.
  - 19) K. Yamakawa and C. P. J. Barty: "Two-color chirped-pulse amplification in an ultrabroadband Ti:sapphire ring regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 2402–2404.
  - 20) H. Takada, M. Kakehata and K. Torizuka: "High-repetition-rate 12 fs pulse amplification by a Ti:sapphire regenerative amplifier system," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 1145–1147.
  - 21) Y. Nabekawa, Y. Shimizu and K. Midorikawa: "Sub-20-fs terawatt-class laser system with a mirrorless regenerative amplifier and an adaptive phase controller," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1265–1267.
  - 22) K. Yamakawa and C. P. J. Barty: "Ultrafast, ultrahigh-peak, and high-average power Ti:sapphire laser system and its applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 658–675.
  - 23) F. G. Patterson, J. Bonlie, D. Price and B. White: "Suppression of parasitic lasing in large-aperture Ti:sapphire laser amplifiers," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 963–965.
  - 24) A. Bayramian, J. Armstrong, G. Beer, R. Campbell, B. Chai, R. Cross, A. Erlandson, Y. Fei, B. Freitas, R. Kent, J. Menapae, W. Molander, K. Schaffers, C. Siders, S. Sutton, J. Tassano, S. Telford, C. Ebberts, J. Caird and C. Barty: "High-average-power femto-petawatt laser pumped by the Mercury laser facility," *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (2008) B57-B61.

(2012年7月9日受理)