

■ 超高出力を生み出すテーブルトップレーザー

関西研究所 光量子科学センター ■ 山 川 考 一 ■

Table-Top Laser Creates Ultrahigh Peak Powers

Koichi YAMAKAWA

Advanced Photon Research Center, KANSAI Research Establishment

The application of the chirped-pulse amplification (CPA) technique to broadband solid-state materials makes possible the development of table-top terawatt (T^3) femtosecond lasers. Techniques for the production of multiterawatt, sub-20 fs, optical pulses are discussed. A 100 TW, 20 fs, 10 Hz laser system based on titanium-doped sapphire which is currently under construction at the Advanced Photon Research Center is described. An extension to peak powers approaching 1 PW is also outlined.

1. はじめに

最近、小型で、繰り返し動作が可能な極短パルス・超高ピーク出力レーザーが注目されている。これらのレーザーは出力エネルギーは小さいが (<1 ジュール [J]), ピーク出力がテラワット級 (1 TW = 1×10^{12} W) にも達する。テーブル・トップ (Table-Top) サイズのレーザーでテラワット (Terawatt) 級の出力が得られるため、これらのレーザーは一般に T^3 (T キューブ) レーザーと総称される。もし、10 兆分の 1 秒 (10 フェムト秒 [fs]) の短時間に 10 J (3 カロリーにも満たないエネルギー) のレーザー光を放出することができれば、これまで実現できなかった 100 兆ワット (1 ペタワット [PW]) にもおよぶとてつもないパワーを、テーブルトップサイズのレーザーで生み出すことができる。ここで生成されるピーク出力は世界中の供給可能な総電力の約 300 倍にも達し、さらにレーザーの持つ良好な集光性能によって、空間的にも極めて小さい領域にエネルギーを集中させることが可能になる。このため、これまで核融合開発用の巨大なレーザー (一般的な体育館の数倍以上の大きさ) を必要とし

た X 線レーザー開発や粒子加速等の研究が実験室規模のサイズで可能となるばかりでなく、極めて高い光電場による新しい物理領域での研究が開かれるものと期待されている¹⁾。1985 年、Strickland と Mourou によって提案された新しい極短パルス増幅法：チャープパルス増幅 (CPA: Chirped Pulse Amplification)²⁾ 法が T^3 レーザー開発の原点であり、現在世界中の研究機関で凌ぎを削って開発が進められている。特にフランスの ENSTA では、繰り返し動作する (10 Hz) レーザーシステムとしては世界最大のピーク出力 25 TW、パルス幅 32 fs のチタンサファイアレーザーがすでに稼働し始めた。

レーザー光のパルス幅が短くなるほどピーク出力が高くなるため、パルス幅の短縮がより大きなピーク出力を得るための鍵となっている。CPA 法は、レーザー発振器からの極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呼ぶ)、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ある。このような極短パルスレーザーの発生を可能にするには、第

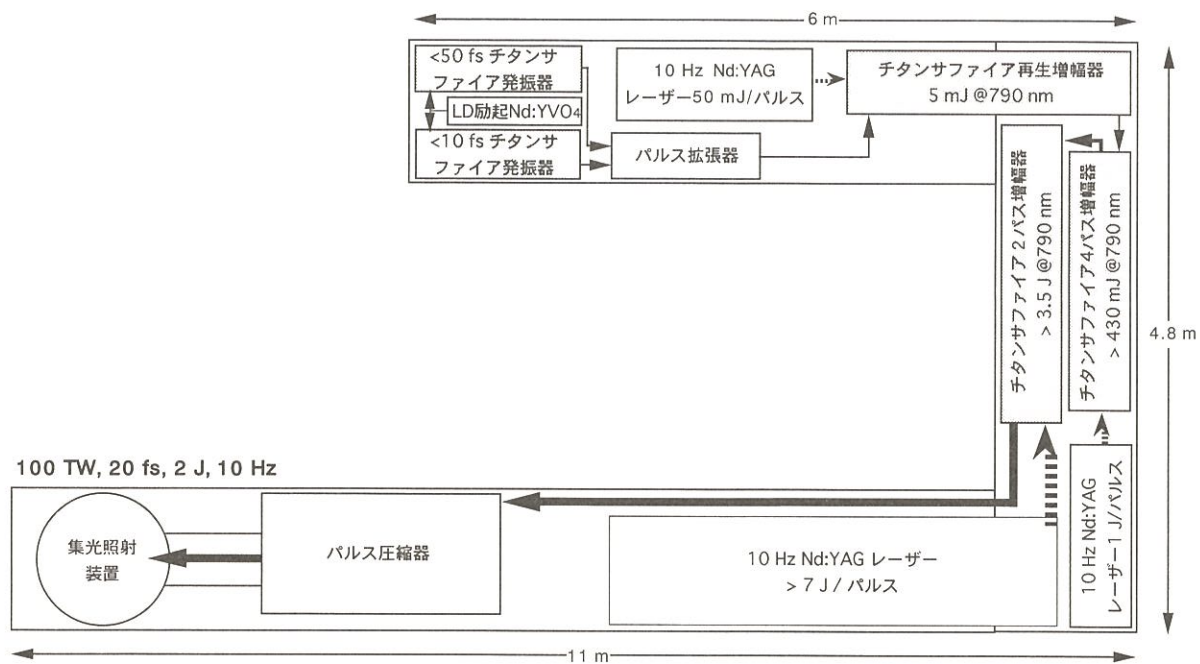


図1 極短パルス・超高出力T³レーザーシステム

1に、パルスの増幅過程において生ずる媒質分散による高次の位相歪みを高精度に制御すること、第2に、パルス圧縮後のパルス幅の拡がりを抑えるために増幅器の中に増幅利得の波形を制御するスペクトルフィルタを用いること、などの工夫が必要となる。

関西研究所（関西研）では、‘High Field Physics’と呼ばれる新しい光量子科学分野における様々な基礎・応用研究を目的に、極短パルス・超高出力T³レーザーの開発を進めている。ここでは、現在関西研で開発中の世界最大級のピーク出力100 TW (0.1 PW)、パルス幅20 fs、繰り返し数10 Hzのチタンサファイアレーザーシステムを中心に、本T³レーザー開発において最も重要となる極短パルス（パルス幅~10 fs）レーザー光の発生とその増幅過程におけるレーザー制御技術の現状について簡単に紹介したい。

2. 100 TW, 20 fs, 10 Hz, チタンサファイアレーザーシステムの開発

図1は、関西研で開発中の100 TWチタンサファイアレーザーシステムのレイアウト図である。本システムは、パルス幅10 fs及び50 fsの光パルスを発生する2台の全固体化自己モード同期チタンサファイアレーザー発振器、本発振器からの光パルスのパルス幅を約10万倍に拡張するパルス拡張器、3台のチタンサファイアレーザー増幅器およびパルス圧縮器より構成されている。3台の増幅器によって光パルスのエネルギー

を10億倍まで増幅し、最後にパルス圧縮器を用いてレーザーパルスの時間幅を短くする。このようにして、ピーク出力100 TW、単一パルスエネルギー2 J、パルス幅20 fsの極短パルス・超高出力レーザー光を得る。

2.1 全固体化10 fsチタンサファイアレーザー発振器

T³レーザーの短パルス化には、まずその種パルスとなるレーザー発振器自身のパルス幅を短縮することが重要となる。現在では、自己モード同期チタンサファイア発振器から100 fs以下のレーザーパルスが容易に得られるようになったが、いまだ励起光源にはArイオンレーザーが用いられている。放電励起を利用するArイオンレーザーは、その装置自身が大型であり、さらに大きな電力と冷却機構を必要とするため、必然的にレーザー装置が複雑になる。さらに、安定性に影響を及ぼすノイズの問題が顕著であり、長らく改善が望まれていた。また、超高速時間分解分光、ポンププローブ計測等の様々な応用研究においても、小型で、安定した出力特性を有する極短パルスレーザー発振器の開発が望まれていた。最近、半導体レーザー(LD)励起高出力固体レーザーの開発が活発に行われ、市販品で5 W以上の連続発振グリーン光が得られるようになった。著者らは、連続発振LD励起Nd:YVO₄レーザーを励起光源として用い、世界で初めて全固体化10 fsチタンサファイアレーザー発振器の開

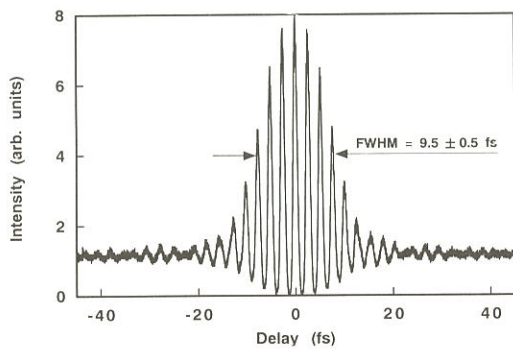


図2 全固体化10 fs チタンサファイアレーザー光の自己相関波形

発に成功した³⁾。また、レーザー共振器内で生ずる分散を補償するため、チャープミラー⁴⁾と呼ばれる分散補償用誘電体多層膜ミラーを用いて、パルス幅10 fs領域でのパルス幅・出力安定性の向上を目指した。本チタンサファイアレーザー発振器から得られるレーザー光の自己相関波形を図2に示す。得られたパルス幅 9.5 ± 0.5 fs (光のサイクルがわずかに4サイクル程度しか存在しない)であり、このときのレーザー光のスペクトル幅は120 nm (中心波長790 nm)、出力エネルギー3 nJ/パルス、平均出力 ~ 230 mWであった。

著者らは本レーザー発振器の安定性 (タイムジッタ・出力) を評価するため、各周波数領域でのレーザーの位相と強度ノイズを求め、これよりレーザーのタイムジッタと出力安定性を算出した。比較のため、励起光源にArイオンレーザーを用いた場合についても測定を行った。図3 (a), (b) はオフセット周波数20 kHzから400 kHzの間でのレーザー光の位相および強度ノイズ密度を示しており、これより算出されるタイムジッタは、全固体化チタンサファイア発振器およびArイオンレーザー励起チタンサファイア発振器の場合で、それぞれ0.31 ps rms, 0.71 ps rms、出力安定性はそれぞれ0.15% rms, 0.32% rmsであった。これらの結果より、LD励起固体レーザーを励起光源に用いた場合、Arイオンレーザーを用いた場合に比べて、チタンサファイアレーザー発振器のノイズ特性が2倍以上改善されることがわかった。今後、サブ50 fsパルスを発生するもう1台の全固体化チタンサファイア発振器との同期発振・増幅実験を行う予定である。

2.2 チャープパルス増幅とパルス整形

チタンサファイアレーザー発振器からのパルス幅 ~ 10 fs、出力エネルギー ~ 3 nJの光パルスは、パルス増幅器によって約10万倍の1 nsにまで拡張される。その後、パルス幅の拡張されたチャープパルスは、チ

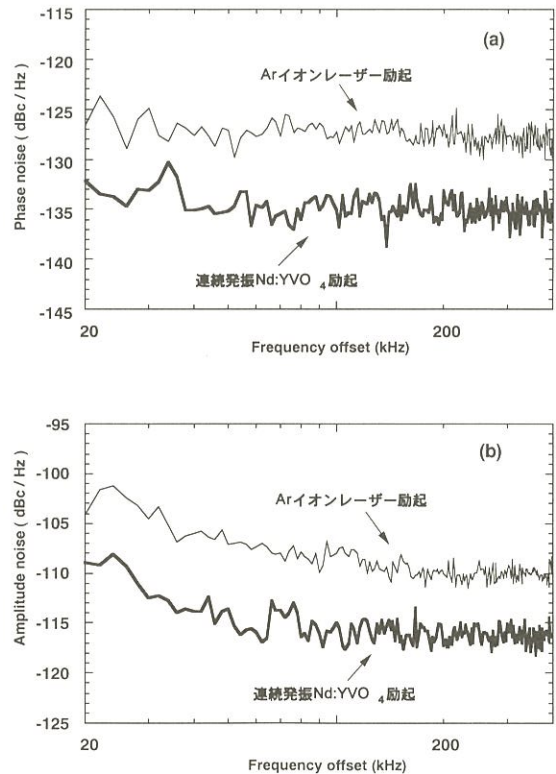


図3 全固体化チタンサファイアレーザー発振器とArイオンレーザー励起チタンサファイアレーザー発振器の(a)位相ノイズ特性と(b)強度ノイズ特性

タンサファイア再生増幅器により最大10 mJにまで増幅される。一般に、高利得増幅 ($> 10^7$ 倍) によってスペクトルの狭帯化 (Gain Narrowingとも呼ぶ) が生じるため、圧縮パルスの最短パルス幅に制限を与える (光パルスの時間幅 $\Delta\tau$ とスペクトル幅 $\Delta\omega$ の間には $\Delta\tau\Delta\omega/2\pi \leq 1$ の関係があるため)。ここではGain Narrowingを抑制するために、再生増幅器内に特殊なスペクトルフィルターを用いてパルス整形を行った⁵⁾。スペクトルフィルターとして厚さ3ミクロンのエタロン板を用いた場合の増幅実験の結果を図4に示す。図4 (a) は自己モード同期Ti:サファイア発振器からの光パルスのスペクトル (83 nm FWHM)、(b) および (c) はそれぞれスペクトルフィルターを用いない場合 (32 nm FWHM) とエタロン板2枚を用いた場合の増幅スペクトル (98 nm FWHM) であり、(c) の場合、(b) と比べて約3倍のスペクトル幅が得られている。なお、この場合のフーリエ変換限界パルスはパルス幅12 fsに相当する。

再生増幅器からの出力光は、ビーム拡大器により直径6 mmに拡大され、4パス増幅器に注入される。4パス増幅器に使用されるチタンサファイア結晶 (直径20 mm、長さ15 mm) はNd:YAGレーザーの2倍

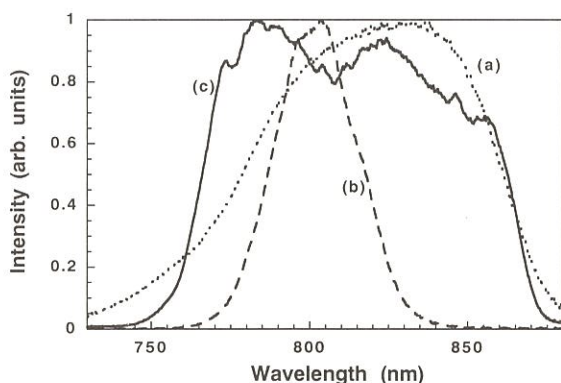


図4 パルス成形実験の結果。(a)はチタンサファイアレーザー発振器からの光パルススペクトル、(b)および(c)はそれぞれスペクトルフィルターを用いない場合とエタロン板2枚を用いた場合の増幅スペクトル。

高調波光（出力エネルギー約1 J）で励起される。この段階でパルス圧縮を行うことにより、10 TW級の出力が得られる。4パス増幅器からの出力光は、さらにビーム拡大器を用いて直径12 mmに拡大され、全出力エネルギー7 Jの2倍高調波Nd:YAGレーザーで励起される2パス増幅器に注入される。2パス増幅器に使用されるチタンサファイア結晶は直径35 mm、長さ25 mmである。その後、2パス増幅器からの増幅光（～3.5 J）はビーム拡大器により直径約10 cmにまで拡大され、真空中に配置された回折格子対（溝本数1200 lines/mm、格子サイズ165 x 220 mm及び210 x 420 mm）よりなるパルス圧縮器で再パルス圧縮される。パルス圧縮器の全体効率が約60%であると予想されるので、パルス圧縮後のエネルギーとして～2 J/パルスが期待できる。これにより、今後パルス幅20 fs、ピーク出力100 TWのレーザー光の発生を行う予定である。すでに、カリフォルニア大学との共同研究における予備的な実験では、パルス幅18 fsのマルチテラワット（ピーク出力4 TW）レーザーパルスの発生に成功している⁶⁾。

3. まとめ

以上のように、小型で、安定した全固体化10 fsチタンサファイアレーザー発振器の開発と、Gain Narrowingを制御するパルス整形技術(Regenerative Pulse Shaping)を用いることにより、数年前には考えられなかったピーク出力10～100 TW級のT³レーザー開発が可能となった。これにより、さらなるピーク出力向上のための課題は少なく、繰り返して動作す

る(>1 Hz)ペタワット級レーザーの出現も夢ではなくなった。ピーク出力100 TW～1 PWのレーザー光を集光照射することにより、単位面積当たりゼタワット(10²¹W/cm²)級のエネルギー集中が可能となる。これによって、短波長コヒーレント光源(X線レーザー)やレーザーによる粒子加速器の開発が実験室規模のサイズで可能となるばかりでなく、高強度光科学と呼ばれる新しい研究分野が今後幅広く開かれていくものと期待されている。

謝 辞

本研究の一部は先端基礎研究センター及びカリフォルニア大学サンディエゴ校において行われたものである。本研究の遂行に際し、御指導を賜りました伊達宗行センター長(先端基礎研究センター)、宅間宏特別研究員、的場徹主任研究員(関西研究所)、Kent Wilson教授、Chris Barty博士(カリフォルニア大学)に謝意を表します。

参考文献

- 1) M. D. Perry and G. Mourou: Science, 264, 917, 1994.
- 2) D. Strickland and G. Mourou: Opt. Comm. 56, 219, 1985.
- 3) K. Yamakawa, M. Aoyama, T. Itoh, and Ch. Spielmann: Jpn. J. Appl. Phys. 35, L-989, 1996.
- 4) R. Szipocs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, and F. Krausz: Opt. Lett. 19, 201, 1994.
- 5) K. Yamakawa, T. Guo, G. Korn, C. Le Blanc, F. Raksi, C. Rose-Petruck, J. Squier, K. R. Wilson, V. Yakovlev, and C. P. J. Barty: Proceedings of the SPIE, "Generation, Amplification, and Measurement of Ultrashort Laser Pulses III", 2701, 198, 1996.
- 6) C. P. J. Barty, T. Guo, C. Le Blanc, F. Raksi, C. Rose-Petruck, J. Squier, K. R. Wilson, V. V. Yakovlev, and K. Yamakawa: Opt. Lett. 21, 668, 1996.