10 TWチタンサファイアレーザーを用いた ガスジェットターゲットからの高速電子発生

森 道昭[†], 近藤 公伯^{†2}

筑波大学 先端学際領域研究センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Generation of High Energy Electrons from Gasjet Target Irradiated by 10 TW Ti:Sapphire Laser

Michiaki MORI[†] and Kiminori KONDO^{†2}

Center for Tsukuba Advanced Research Alliance, University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577

(Received June 11, 2003)

A commercial base 1.5 TW Ti:Sapphire laser system was improved to be 10 TW one. By improving a design of a chirped pulse-amplification of 1.5 TW system, the pulse width was shortened from 100 fs to 40 fs, and the output energy was increased from 150 mJ to 400 mJ. With this system, a high energy electron beam was generated from Ar gasjet target. The maximum energy was more than 4.5 MeV with the electron density of $1.5 \sim 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. The effective temperature was estimated to be 0.61 MeV.

Key Words: CPA Laser, Laser acceleration, Laser-plasma interaction

1. はじめに

レーザープラズマ粒子加速に代表される高ピーク出力レーザーと物質との相互作用の研究は、かつて慣性核融合研究クラスの大規模レーザーを用いて発展した¹⁻³⁾。さらに1990年代に入り、チタンサファイア結晶⁴⁾等の広帯域利得を有するレーザー媒質の出現やチャープパルス増幅法(CPA)⁵⁾による固体レーザー媒質を用いた超短パルス増幅技術の確立によりテラワット以上でのピーク出力を有する超短パルスレーザーが構成できるようになった。このようなレーザー装置を用いれば、高次高調波発生⁶⁾や高エネルギー粒子発生⁷⁻⁹⁾等の応用研究が可能であり、この分野はこの10年間で急速な発展を遂げた。近年では、PWレーザーがNd:Glassレーザー^{10,11)}のみならず、チタンサファイアレーザーでも実現しつつあり¹²⁾、より高強度の光電磁場と物質との相互作用の研究^{13,14)}が注目を集めつつある。このような状況において、我々は市販のピーク出力1.5 TW・パルス幅100 fsのチタンサファイアレーザーシステムを、ピーク出力10 TW・パルス幅40 fsのシステムに改造し、さらにこのシステムを用いて高速電子発生の研究を進めている。本稿では、1.5 TWレーザーの改造とそれを用いて進めているレーザー励起高エネルギー電子ビーム発生について述べる。

2. 1.5 TWレーザーの10 TW増強

ベースに用いたCPAレーザーシステムはSpectra Physics社製1.5 TWチタンサファイアレーザーシステムで、エネルギー・パルス幅は150 mJ・100 fsであった(Fig. 1)。初めにこの装置について説明する。発振器は、パルス幅60 fs・平均出力600 mWのモード同期チタンサファイアレーザー(Tsunami)である。発振器を出たパルスは、凹面鏡・平面鏡と回折格子を組み合わせたMartinez型パルスストレッチャーと前置増幅器である再生増幅器並びにパルススライサーを組み込んだ1つのコンポーネント(Spitfire)に入射され1パルス当たり約2 mJの出力エネルギーまでプレパルスコントラスト 10^{-6} 以下で増幅される。次に最終増幅段用コンポーネントに入射され、出力エネルギー250 mJに増幅される。最終増幅器用チタンサファイア結晶は両面にARコートをした直径18 mm・厚さ25.4 mmのものを使用し、2台のQスイッチYAGレーザー(スペクトラフィジックス社製GCR-270, 2ω 800 mJ/pulse)で励起する。増幅されたパルスは、最終的に1インチ径に拡大され、真空チャンバー中に設けられたパルスコンプレッサーでパルス圧縮される。パルス圧縮された光は、最終的に150 mJ/100 fs即ち1.5 TWのピーク出力を持つ。

この装置に改造を施した、Fig. 2および3に改造後のレーザー装置の様子を示す。主な改良点について説明する。

現所属: [†] 日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター (〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台8-1)

^{†2} 大阪大学大学院 工学研究科 電子情報エネルギー工学専攻 レーザー工学講座 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Fig. 1 Photograph of a commercial base 1.5 TW laser system.

Fig. 2 Photograph of a 10 TW laser system.

まず発振器にはパルス幅20 fsのモードロックチタンサファイアレーザーを製作した¹⁵⁾。発振器から出射されたパルスは、凹面・凸面鏡および回折格子を組み合わせ構成したOffner型パルスストレッチャーを用いてパルス幅を広げ、広帯域パルスに対しパルス圧縮可能なパルスストレッチャーを施した¹⁶⁾。ストレッチャーとコンプレッサーに用いた回折格子はスペクトラゴン社製Auコートホログラフィック回折格子であり、1200 lines/mm(改造前:1800 lines/mm)を使用した。このストレッチャーでは、用いる増幅器がSpitfireをベースにしているため、キャビティー中にポッケルスセルを2個使用しており、しかもビーム径がおおよそ0.8 mmと比較的小さい。従って、B積分を考慮してOffner型ストレッチャーを4 passさせ、バンド幅40 nmにおいて520 psまでパルス幅を広げた。こうすることで再生増幅器中で発生する自己収束による損傷を避けることができた。また、再生増幅器内にはプリズム対(材質:LaFN28)を挿入し、プリズム対の挿入量を制御する事で、増幅システム全体の高次分散補償も簡便に制御できるようにした¹⁷⁾。さらに再生増幅器内にニトロセルロス薄膜によるエタロン板を挿入し、ゲインナローイングを抑制した¹⁸⁾。今回の改造では増幅システムの広帯域対応化と高次分散補償による短パルス化を図ると共に、最終段増幅器励起用のYAGレーザーを増やし、できるだけ出力エネルギーを大きく取れることも目的とした。しかし、Frantz-Nodvikのモデル¹⁹⁾から導出される理論的な利得を考慮すると、最終段増幅段に入射する種パルスのエネルギー

ギを改造前の2 mJから100 mJクラスにする必要がある。従って、最終段の前段に2段目のマルチパス増幅器を増設した。2段目の結晶は、1.5 TWシステムの最終増幅段に用いていた結晶を使い、両側から新たに設けたQスイッチNd:YAGレーザー2台(GCR-150, GCR-170)を用いて270 mJと300 mJ計570 mJで励起した。こうして増幅したパルスのエネルギーは2段目直後で100 mJであった。最終段増幅器にはARコート付きの直径20 mm長さ25.4 mmのチタンサファイア結晶を用い、結晶の両側からそれぞれ1200 mJ(PRO-350)と800 + 760 mJ(GCR-270 2台)で励起した。最終段増幅器直後の出力エネルギーは1 Jであった。尚、新設した2段目の増幅段は、元々SpitfireとしてMartinez型パルスストレッチャーが収まっていた部分からパルスストレッチャーコンポーネントを外し、その部分に設置した。パルスストレッチャーは既に述べたようにOffner型をSpitfireのケースの外へ設置した。このためFig. 1とFig. 3を比較すれば分かるように外見は改造前とほぼ変わらない。最終増幅器から出射されたレーザー光(ビーム径12 mm)は、ビーム径を50 mmに拡大し、回折格子対によってパルス圧縮される。Fig. 4にこのレーザーシステムで発生したパルスの典型的なスペクトル及び2次自己相関波形を

Fig. 3 Schematic diagram of a 10 TW laser system.

Fig. 4 (a) The spectrum of the 10 TW laser system. (b) Single-shot autocorrelation trace of an amplified pulse.

示す．これによって我々は10 TW(エネルギー/パルス幅 400 mJ/40 fs)増強を確認した．尚，Table 1に改造前と改造後のレーザースペックの比較を示す．

3. 10 TWレーザーを用いた高エネルギー電子線発生

超短パルス高強度レーザーを物質に照射すると，瞬間的にプラズマ化し，さらにレーザー光と相互作用することで，航跡場などのプラズマ波が励起され高速電子などの高エネルギー粒子が発生する．特にレーザープラズマ粒子加速では，近年自己変調型レーザー粒子加速の研究が盛んに進められている^{7,9)}．レーザー航跡場加速には標準型と自己変調型がある．双方の違いは航跡場の励起メカニズムに違いがある．即ち，通常の標準型レーザー航跡場加速では航跡場がレーザーのポンデロモータビリティによって励起されるのに対し，自己変調型では航跡場はパラメトリック不安定性の1つである誘導ラマン散乱過程の成長に伴って励起されて行く．そのため，十分な振幅の航跡場を発生させるにはプラズマ周期がレーザーのパルス幅に比べ短い必要があり，高いプラズマ密度が条件となる．この事は，加速エネルギーの上限となるプラズマ波の位相速度が遅いという問題があるものの，加速勾配の高さや標準型に比べプラズマ密度の共鳴条件が緩い点等で有利である事を示す．このレーザープラズマ不安定性による粒子加速は古くから議論されていたプロセスである²⁰⁾．しかし，最近これとは異なるプロセス(直接加速(Direct Laser Acceleration))の存在も議論されている⁸⁾．このメカニズムは，逆自由電子レーザーと類似している．超高強度レーザーがプラズマに入射すると相対論的レーザーチャネルが形成されレーザーの径方向に電子キャビテーションによる電荷分布の偏りが発生する．これによって発生する静電場と，加速を受ける電子が発生させる自己磁場によって電子はベータトロン振動を伴って加速する．これが直接加速の過程で，このメカニズムによる加速の存在を主張しているGahnらはこの場を“Self-generated quasi-static electric field”と呼んでいる．

我々は，自己変調領域における電子線発生を目的に，増強した10 TWレーザーを用い照射実験を行った．実験装置の概略をFig. 5に示す．パルス圧縮部からガイドしたレーザー光は，f/3.3の軸外し放物面鏡によって強度 $1 \times$

Fig. 5 Experimental setup for the generation of energetic electrons induced by the laser-plasma interaction.

10^{19} W/cm^2 で，Arガスジェットに集光させた．ここで，ガスジェットはGeneral Valve社のガスバルブ(Series 9)を用いて充填圧力140 psi(10 kgf/cm²)で発生させた．一方，発生した高速電子はレーザーの伝搬方向に配置した蛍光板(極光 F5)もしくはイメージングプレート(富士フイルム BAS-MS2040)によって検出した．これらの検出器は電子線以外にEUV・X線にも感度を持つため，厚み100 μm のAlフィルターを前面に配置してこれらの遮蔽を行った．

Figure 6 (a)にCCDカメラで撮像した蛍光板の発光像を示す．ここで，縦方向の周期的な強度変化はCCDカメラの走査線の強調を反映したもので計測上の意味を持たない．この発光像はFig. 6 (b)の結果，即ち電子線の軌道上への磁場の印加によって発光像に変化が生じていることから，観測された指向性を持つ高エネルギー放射線は電子ビームであり，発光像はその分布を反映していると考えられる．ここでビームの発散角は，蛍光板の配置(相互作用点から320 mm)から120 mrad(FWHM)と見積られる．これはレーザーのF値(3.3)に比べ約1/3の拡がり角に相当する．

この蛍光板を用いた観測は，リアルタイムに電子線発生が観測できる反面，発生した電子線の絶対量の評価には新たな較正が必要である．従って，絶対量の評価には既に絶対感度がある程度明らかになっているイメージングプレートを用いた．イメージングプレートは輝尽性発光(Photo-Stimulated Luminescence: PSL)の現象を用いた積

Table 1 Comparison of the laser pulse parameter between 1.5 TW and 10 TW system.

	Old	New
OSC	600 mW/	350 mW/
	80 MHz/16 nm (Tsunami)	80 MHz/40 nm (WA state type)
Str.	120 ps/16 nm	520 ps/40 nm
	(Martinez)	(Offner 4-pass)
Regen.	2 mJ/12 nm	2 mJ/35 nm
		Pellicle & Prism
2nd AMP	-	70 mJ
0.15 wt%, L = 25.4 mm	250 mJ	0.6 J pump (2YAG)
Final AMP	1.4 J pump (2 YAG)	1 J
0.15 wt%, L = 25.4 mm		2.6 J pump (3 YAG)
Comp.	150 mJ/100 fs	400 mJ/40 fs

Fig. 6 Energetic electron images detected by the fluorescent screen. (a) without external magnetic field. (b) with external magnetic field.

分型放射線検出器で、X線や電子線などを広いダイナミックレンジで検出できる特徴を持つ。我々は電子線の軌道上にコリメーターと電磁石を配置し、透過型配置で電子線分光を行った。Fig. 7に観測した電子線分光像を示す。この観測に用いたBAS-MS型のイメージングプレートは医療用に開発されたもので、較正值が明らかになっているBAS-SR型に比べX線感度が高い。我々はBAS-MSとBAS-SRの感度がほぼ同じものと仮定し、既知であるBAS-SRの較正值²¹⁾を用いて、電子線のエネルギースペクトルを評価した(Fig. 8)。厳密な発生量は議論の余地が残るものの、MPQ⁸⁾やLULI⁹⁾の実験結果と比較するとほぼ同じ傾向の発生量とスペクトルが得られていることから、この較正值の適用にはある程度の妥当性があるものと考えている。得られた電子線スペクトルから、本照射条件において、有効温度0.62 MeVのMaxwell-Boltzmann分布で近似できる電子線の発生が明らかとなった。この実験における

Fig. 7 Spectrally resolved electron image detected by the imaging plate.

Fig. 8 Experimentally determined electron spectrum.

平均分子密度は、以前に行った光学干渉によるガス密度計測²²⁾から、相互作用点で平均 $1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であると評価できる。また、さらに電離の価数は特に短パルスレーザー照射では電離はトンネル電離が優勢である。このトンネル電離のモデルの一つであるBarrier Suppression Ionization (BSI) モデル²³⁾を用いれば、Arの電離は15価程度と評価できることから平均電子密度は $1.5 \sim 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と見積ることができる。この結果を同じ平均電子密度でのMPQの結果⁸⁾と比較すると、本結果は彼らの実験から求められる有効温度の平均電子密度スケールリング($T_{\text{eff}} \propto n_e^{1.2}$ ($n_e < 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, α : 定数)から2~4倍近く高い有効温度である事が分かる(Fig. 9)。この結果は集光強度の差異を反映していると考えられる。彼らはこの平均電子密度スケールリングの他方で、電子密度 $n_e \sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ での有効温度の集光強度スケールリング則 $T_{\text{eff}} \propto I^{0.5}$ (α : 定数)も得ている。我々の実験では彼らの実験に比べ、集光強度が3~4倍高い。このスケールリングをそのまま適用できると仮定すると有効温度は1.7~2倍と見積られることから、本結果は妥当であると考えられる。尚、MPQ、LULI双方の研究では、平均電子密度が高い 10^{20} cm^{-3} を越える条件下で同様の高速電子線発生を試みており、既に1%を越える変換効率でMeVを越える有効温度の電子線の発生を観測している^{8,24)}。

3. まとめ

市販の1.5 TWチタンサファイアレーザーを改造し、出力10 TWのシステムを開発した。また改造したシステムを用いて、電子線発生実験を行い、指向性を持った高速電子線が発生していることを確認した。観測された高速電子の有効温度は0.62 MeVであった。今後、高速電子の発生の研究をより詳細に進めると共に、発生した電子線による放射線の発生についても展開して行く予定である。

Fig. 9 Comparison of the electron spectrum between our result and MPQ results (see Ref. 8).

謝 辞

本研究において、電子線計測を含めた放射線計測について協力を頂いた、筑波大学加速器センター 小松原 哲郎博士ならびに笹 公和博士に感謝致します。また、本研究は筑波大学TARAプロジェクトと、科学研究費補助金基盤研究(B)、特定領域研究および若手研究(B)の支援を受け遂行しました。

参考文献

- 1) Y. Kitagawa, T. Matsumoto, T. Minamihata, K. Sawai, K. Matsuo, K. Mima, K. Nishihara, H. Azechi, K. A. Tanaka, H. Takabe, and S. Nakai: Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 48.
- 2) C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson, M. Everett, A. Lal, W. P. Leemans, R. Williams, and C. Joshi: Phys. Rev. Lett. **70** (1993) 37.
- 3) K. Nakajima, D. Fisher, T. Kawakubo, H. Nakanishi, A. Ogata, Y. Kato, Y. Kitagawa, R. Kodama, K. Mima, H. Shiraga, K. Suzuki, K. Yamakawa, T. Zhang, Y. Sakawa, T. Shoji, Y. Nishida, N. Yugami, M. Downer, and T. Tajima: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4428.
- 4) P. Moulton: J. Opt. Soc. Am. B **3** (1986) 125.
- 5) G. A. Mourou, C. P. J. Barty, and M. D. Perry: Phys. Today **Jan.** (1998) 22.
- 6) 玉木 裕介, 板谷 治郎, 小原 實, 緑川 克美: レーザー研究 **29** (2001) 225.
- 7) D. Umstadter, S.-Y. Chen, A. Maksimchuk, G. Mourou, and R. Wagner: Science **273** (1996) 472.
- 8) C. Gahn, G. D. Tsakiris, G. Pretzler, K. J. Witte, P. Thirolf D. Habs, C. Delfin, and C.-G. Wahlström: Phys. Plasmas. **9** (2002) 987.
- 9) V. Malka, J. Faure, J. R. Marquès, F. Amiranoff, J. P. Rousseau, S. Ranc, J. P. Chambaret, Z. Najmudin, B. Walton, P. Mora and A. Solodov: Phys. Plasmas. **8** (2001) 2605.
- 10) M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart, G. Tiethohl, J. A. Britten, C. Brown, S. Hermann, B. Golick, M. Kartz, J. Miller, H. T. Powell, M. Vergino, and V. Yanovsky: Opt. Lett. **24** (1999) 160.
- 11) Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama, H. Yoshida, T. Jitsuno, S. Sakabe, K. A. Tanaka, H. Nishihara, Y. Izawa, K. Mima, and T. Yamanaka: *Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA) 2001* (Elsevier Science, Paris, 2002) p. 475.
- 12) 井上 典洋, 青山 誠, 赤羽 温, 上田 英樹, 桐山 博光, 馬 景龍, 辻 公一, 中井 善基, 山川 考一: 2003年(平成15年)春期応用物理学会講演会 27a-YC-1/III.
- 13) R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Norimatsu, S. J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka, and M. Zepf: Nature **412** (2001) 798.
- 14) R. A. Snavely, M. H. Key, S. P. Hatchett, T. E. Cowan, M. Roth, T. W. Phillips, M. A. Stoyer, E. A. Henry, T. C. Sangster, M. S. Singh, S. C. Wilks, A. MacKinnon, A. Offenberger, D. M. Pennington, K. Yasuike, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, J. Johnson, M. D. Perry, and E. M. Campbell: Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 2945.
- 15) M. Asaki, C. P. Huang, D. Garvey, J. Zhou, H. C. Kapteyn, and M. Murnane: Opt. Lett. **18** (1993) 977.
- 16) G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin, J. P. Chambaret, B. Walker, and L. F. Dimauro: Opt. Lett. **21** (1996) 414.
- 17) 鍋川 康夫, 関川 太郎, 富樫 格, 渡部 俊太郎: レーザー研究 **29** (2001) 218.
- 18) K. Yamakawa and C. P. J. Barty: IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron. **6** (2000) 658.
- 19) L. M. Frantz and J. S. Nodvik: J. Appl. Phys. **34** (1963) 2346.
- 20) C. Joshi, T. Tajima, and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **47** (1981) 1285.
- 21) 高橋 輝吉, 佐藤 隆史, 藪内 俊毅, 児玉 了祐, 北川 米喜, 譽田 義英, 池田 稔治, 奥田 修一, 田中 和夫: 放射線 **28** (2002) 203 (85).
- 22) M. Mori, T. Shiraishi, E. Takahashi, H. Suzuki, L. B. Sharma, E. Miura, and K. Kondo: J. Appl. Phys. **90** (2001) 3595.
- 23) S. Augst, D. D. Myerhofer, D. Strickland, and S. L. Chin: J. Opt. Soc. Am. **B 66**, 290 (1987).
- 24) V. Malka, S. Fritzler, E. Lefebvre, M.-M. Aleonard, F. Burgy, J.-P. Chambaret, J.-F. Chemin, K. Krushelnick, G. Malka, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin, M. Pittman, J.-P. Rousseau, J.-N. Scheurer, B. Walton, and A. E. Dangor: Science **298** (2002) 1596.