

誘電体加速に向けた高出力超短パルス Yb レーザーの開発

DEVELOPMENT OF HIGH POWER ULTRA-SHORT PULSE YB LASER FOR DIELECTRIC ACCELERATION

松村陽介^{#, A)}, 吉田光宏^{B)}, 周翔宇^{B)}, 小山和義^{A)}, 上坂充^{A)}

Yosuke Matsumura^{#, A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Zhou Xiangyu^{B)}, Kazuyoshi Koyama^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}

^{A)} Department of Nuclear Engineering and Management School of Engineering, The University of Tokyo

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Yb lasers can be pumped by laser diodes. The difference between the oscillation wavelength and the pumped wavelength is small. These characteristics of the Yb lasers enable low thermal load. For these reasons, it is easy to construct the high power Yb lasers. Additionally, since the bandwidth of the Yb oscillation wavelength is broad, the Yb lasers are also used as mode-locked lasers in many science fields. Now, much more high power ultra-short pulse Yb lasers are required for new acceleration science such as lasertron and dielectric laser acceleration. In this research, the high power ultra-short pulse Yb fiber and solid laser for dielectric acceleration are made. To obtain high energy pulse, chirped pulse amplification (CPA) is adopted. With respect to the amplification, the pulses emitted from the Yb fiber laser oscillator are amplified up to several mJ by Yb fiber laser amplifiers, which have high gain. Then, the mJ pulses are amplified up to several J by Yb solid lasers, which aren't broken by relatively high intensity laser. To suppress amplified spontaneous emission (ASE), 62 MHz repetition rate from the oscillator are reduced step by step. We aim to obtain several J 200fs pulse at 50 Hz repetition rate finally.

1. 背景

Yb レーザーは LD 励起可能で、励起波長と発振波長が近いことによりレーザー媒質への熱負荷が小さい。このため Yb レーザーは高出力化が容易である。また、Yb は広帯域な発振が可能のためモードロックレーザーとしてさまざまな分野で利用されている。しかし、誘電体加速やレーザートロン^{[1][2]}といった新しい加速器技術の分野には、より高出力の超短パルスレーザーが必要とされている。

従来から超短パルスレーザーにはチタンサファイアレーザーがしばしば使用されている。チタンサファイアは数フェムト秒の超短パルスを生成するのに非常に適しているが、高出力という点では Yb に劣る。本研究では誘電体加速に向けて、繰り返し周波数 50Hz、パルス幅 200fs、パルスエネルギー数 J の高出力高強度超短パルス Yb レーザーの開発を行っている。

2. Yb レーザーの構成

以下に繰り返し周波数 50Hz、パルス幅 200fs、パルスエネルギー数 J の高出力高強度超短パルスを実現するための Yb レーザーの構成概要を Figure 1 に示す。パルスエネルギー数 J の高強度超短パルスを生成するために CPA を採用する。まず、Yb ファイバーレーザー共振器から生成された繰り返し周波数 62MHz の超短パルスはファイバーにインライン化された EO モジュールによって強度変調される。これにより繰り返し周波数を 1MHz 程度に低減する。次

にファイバーブラッググレーティング (FBG) を利用したファイバーストレッチャーによってパルス幅を 800ps 程度に増加させる。

その後ストレッチされたパルスは Yb ファイバーレーザー増幅器によって増幅される。増幅媒体である Yb ファイバーは数~数十マイクロメートル径のコアに Yb が添加されている。このファイバーの Yb を LD で励起し、コアにシード光を通すことでシード光を増幅する。ファイバーの一番の利点はシード光と増幅媒体との相互作用長を大きくとれることであり、増幅率を大きくできる。また、ファイバーはその体積に比べ表面積が大きいことにより冷却能力が大きい。一方、レーザー光が直径数マイクロメートルのコアに集光するため比較的強度の大きいレーザーに対して使用することが難しい。また、光のロスが生

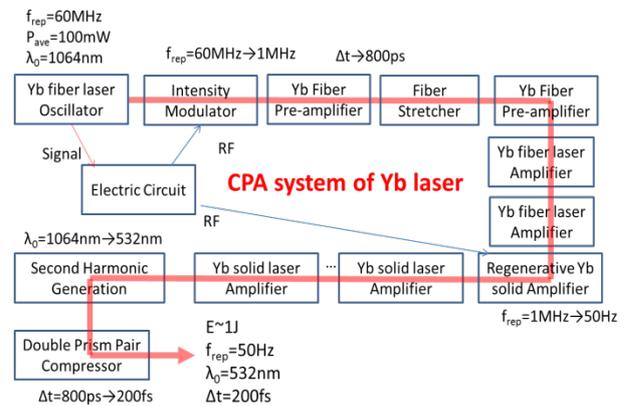


Figure 1: Schematic layout of Yb CPA system.

[#] matsumura@nuclear.jp

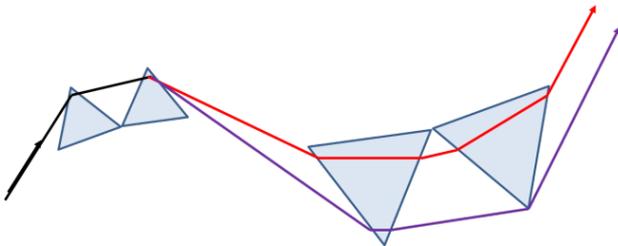


Figure 2: Schematic layout of double-prism compressor

じやすいファイバー端面にしばしば損傷が発生することも欠点である。これらの理由から、パルスが mJ レベルまでは増幅を Yb ファイバーレーザーで行う。以降の増幅は高強度のレーザー光に耐えられる Yb 固体レーザーで行う。

また、Yb ファイバーレーザー増幅器後、ポッケルスセルによって 1MHz 程度の繰り返し周波数を 50Hz に低下させる。このように一度に共振器後のファイバー強度変調器で 50Hz に低下させないのは自然放出増幅(ASE)抑制のためである。ファイバーレーザー増幅器は連続発振の LD によって励起されている。Yb の上位準位の寿命はおおよそ 1ms であり、1kHz 未満の繰り返し周波数では必ず ASE が発生してしまう。しかし、繰り返し周波数を低減させなければ、増幅器で平均出力を大きくしても 1 パルスあたりのエネルギーを大きくすることが難しい。そこで、繰り返し周波数の低減を 2 段階に分け、ASE を抑制しながら効率よく増幅させることにした。増幅後のパルス圧縮はダブルプリズム対³⁾を使用する予定である。F₂ プリズムの透過率は大きく、境界面での反射が少ないためロスが少ない圧縮が出来ると思われる。さらに大型の回折格子よりプリズムの価格は比較的安く、レーザー製作のコストを抑えられる。一方、プリズム対によって与えられる分散量は小さく、プリズム間距離を非常に大きくとる必要がある。そこで、Figure 2 のように 2 つのプリズムで分散角を広げ、もう 2 つのプリズムで平行光に戻す。この平行光を往復させることで圧縮が出来る。また、屈折率分散は 1060nm 付近では小さいため、パルス圧縮前に SHG で 530nm に波長変換を行う。

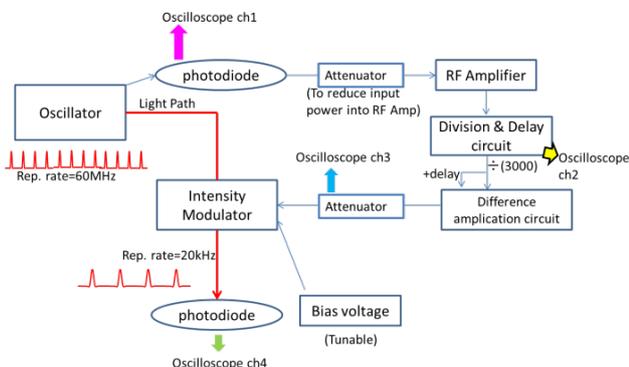


Figure 3: Schematic layout of the optical path through the intensity modulator and the electric circuit to impose electric pulse on the intensity modulator.

ただ、SHG やダブルプリズム対であってもパルス圧縮に必要なプリズム間距離は非常に大きい。そのため、ダブルプリズム対を何度か往復させることで圧縮に必要な負分散を与える。

以上の構成によって最終的に繰り返し周波数 50Hz、パルス幅 200fs、パルスエネルギー数 J の高強度超短パルスを生成することを目指す。

3. Yb レーザーの製作と現状結果

以下に現時点での Yb レーザーシステムの個々のモジュール製作とその結果について述べる。

3.1 Yb ファイバーレーザー共振器

Yb ファイバーレーザー共振器については参考文献⁴⁾で述べたものを使用した。共振器から得られたレーザーパラメーターは、中心波長が 1060nm、スペクトル幅(FWHM)が 49nm、繰り返し周波数が 62MHz、平均出力が 95mW であった。尚、強度変調器や励起用 LD の同期のためにこの共振器をマスターオシレーターとして利用する。クロックには回折格子の反射光をフォトダイオードで受けて利用している。

3.2 EO ファイバーモジュールと FBG ストレッチャー

レーザー光の道筋と EO モジュールに印加する電気回路を Figure 3 に示す。共振器から得られた 62MHz の信号を分周する。分周後、分周されたシグナルを 2 つに分け、片方に適当な遅延を与え差動増幅回路に入力した。これにより 10ns 程度のパルス幅のパルスが出力され、アッテネータによりパルス高を適当な高さに変え、それを EO モジュールに印加する。強度変調の結果を Figure 4 に示す。Figure 4 から 62MHz のパルストレインからパルスが抜き出されている様子が分かる。尚、2 章 Yb レーザーの構成では繰り返し周波数を 1MHz 程度に低下させる

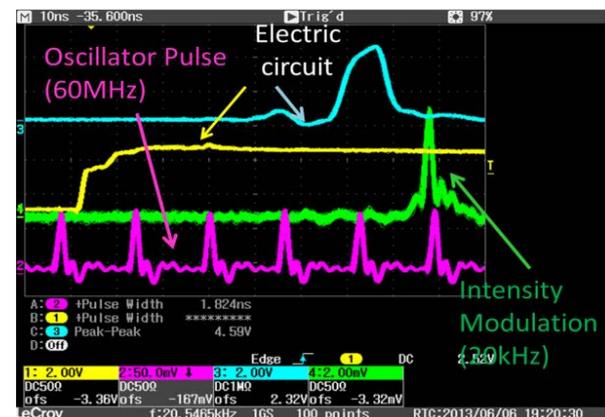


Figure 4: Intensity modulation by the EO fiber module. Ch2 (pink): pulse train from the Yb Oscillator (60 MHz), Ch1 (yellow): divided signal (20 kHz), Ch3 (light blue): signal imposed on the EO module, Ch4 (yellowish green): pulse picked up by the EO module.

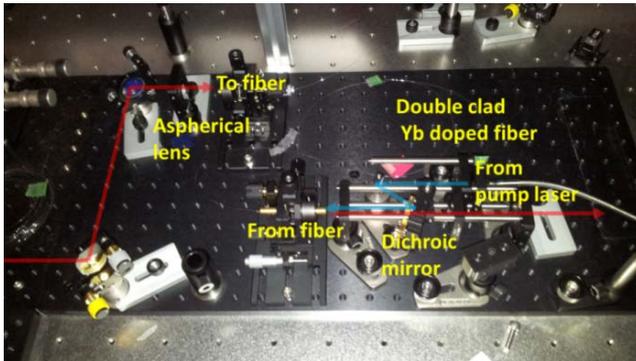


Figure 5: 60W pumped Yb fiber laser amplifier.

と述べたが、今回は用意できる分周回路の都合上、20kHz まで低減せざるを得なかった。

パルスのストレッチは FBG を応用したファイバーストレッチャーを用いた。FBG はファイバー内に周期的な屈折率分布を伝搬方向に設けることで選択的な波長の反射が出来る。長波長の光に対しては早い地点で、短波長の光には遅い地点で反射がされるように設計することで正の分散を与えることが出来る。サーキュレータの 2 番目のポートにその FBG ストレッチャーを融着する。これにより、1 番目のポートに入射したパルスは 2 番ポートへ出力される。2 番ポートから出力されたパルスは、ストレッチャーで反射されて 2 番ポートへ戻り、3 番目のポートに出力される。ストレッチ後のパルス幅は約 800ps である。

また、ストレッチャー、サーキュレータなどの素子をパルスが通過する度に損失を受ける。強度変調を行わなくとも、EO モジュール透過の際には損失を受ける。そのため EO モジュールおよびサーキュレータ後にそれぞれ小型の Yb ファイバーレーザー前置増幅器を挿入した。どちらも励起用 LD の出力は 150mW である。ストレッチ後の出力は増幅器導入以前は 0.1mW であったが、増幅器導入後 56mW まで増幅された（ただし EO モジュール電圧不印加時の結果である）。

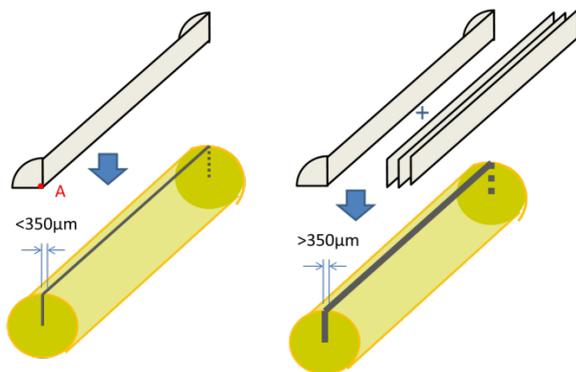


Figure 6: Layout of the fiber chuck without any processing (Thorlabs HFC007) (left) and the fiber chuck after processing (right).

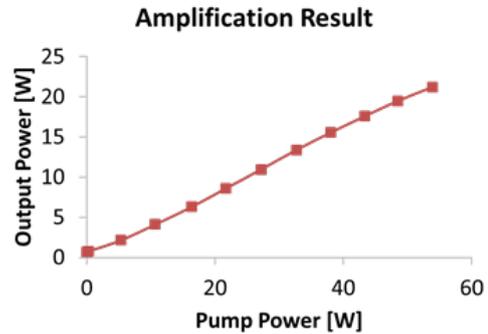


Figure 7: Output power for pump power at the second Yb fiber laser amplifier at 62MHz repetition rate.

3.3 Yb ファイバーレーザー増幅器

約 800ps までストレッチされたパルスは 2 段の Yb ファイバーレーザー増幅器によって増幅される。しかし、3.2 で述べた強度変調器とパルスストレッチャー製作の前に増幅器を製作したため、シード光は共振器から直接増幅器に入射している。したがって、この節の結果は繰り返し周波数が 62MHz の状態で示されている。一段目の増幅器は参考文献^[4]で述べたものを使用した。一段目の増幅器の最大出力は 6.9W である。しかし、一段目の増幅器の安定性を考慮し、励起用 LD の出力をやや落として使用している。また、二段目の増幅器に入射するまでにアイソレータ等の光学素子を通るため、二段目の増幅器入射前では 2.2W となっている。

製作した二段目 Yb ファイバーレーザー増幅器を Figure 5 に示す。二段目 Yb ファイバーレーザー増幅器では出力 60W の励起用 LD を用いた。用いた Yb 添加偏波保持ファイバーの端面はフレネル反射を抑えるため、端面角約 8° で切った。増幅器製作初期には、このファイバーの素線は後部装着コレット式ファイバーチャック (Thorlabs 社製 HFC005) で固定していた。このファイバーチャックは合成樹脂でファイバーを締め付けて固定するため熱に弱く、励起用 LD の出力を上げると熱で損傷してしまう。そこでファイバー素線の固定にすべて金属からできている側面装着ファイバーチャック (Thorlabs 社製 HFC007) を使用することにした。このファイバーチャックの溝幅は直径 $200\mu\text{m}$ のファイバーを装着できるように設計されており、使用しているファイバーのコーティング径 ($350\mu\text{m}$) より小さい。そのためダイヤモンドカッターでファイバーチャックの溝を削り、Figure 6 に示したように溝幅を大きくした。加工したファイバーチャックをファイバー素線保持に使用し、励起光の出力を上昇させてファイバーに入射すると、ファイバーを抑える金属片の端の一点 (Figure 6 における A 点) に熱が集中し、そこから損傷することが詳細な観察で分かった。そこで何枚かの金属片をファイバーチャックの溝に詰め込み、金属片からファイバーチャックへの熱伝導率を向上させることで、励起光出力 60W 時において

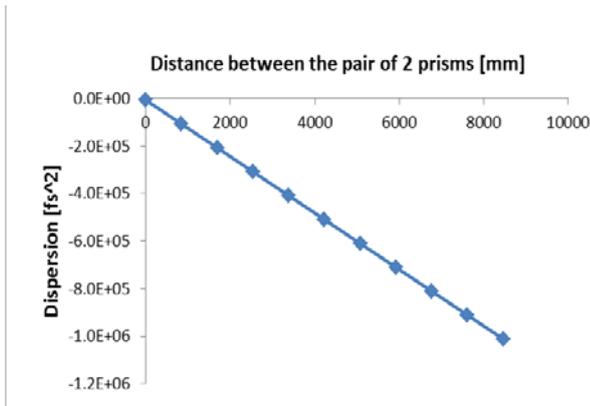


Figure 8: Dispersion of double prism pair.

もファイバーの損傷を防ぐことが出来た。また、ファイバーチャックを保持する 6 軸マウントが良好なヒートシンクとなっていることも損傷を防げた一因と考えられる。二段目 Yb ファイバーレーザー増幅器の増幅結果を Figure 7 に示す。これにより 62Hz において 20W 以上の増幅を達成できた。

3.3 ダブルプリズム対の分散量計算とオートコリレータの製作

ストレッチされ増幅された最後に圧縮されて超短パルスとなる。参考文献^[1]に基づき、レーザー径を考慮したダブルプリズム間距離から分散量を計算した。プリズムの材料は F₂ を仮定した。F₂ は透過率が大きい一方、F₂ は波長 1060nm 付近では屈折率分散が小さいため、パルス圧縮前に 2 次高調波に変換する。プリズムは市販の等辺分散 (1 辺 50mm) を用い、レーザーの直径は 3mm とした。計算結果を Figure 8 に示す。

例えば中心波長 530nm、波長幅 15nm、パルス幅 800ps のパルスの分散量は 8×10^6 fs² であるため、フーリエ限界まで圧縮するためには、ダブルプリズム間距離を 8m 程度離し、パルスを 8 往復させる必要があることが Figure 5 より求まる。

また、パルス幅測定のために干渉型オートコリレータを製作した。Figure 9 に製作したオートコリレータを示す。製作したオートコリレータが正常に作動することを確認するために、一段目の Yb ファイバーレーザー増幅器後のパルス (ただし、ストレッチはされていない) を回折格子対で圧縮し、パルス幅を測定した。測定の結果に表れるフリッジと可動ステージの移動量を照らし合わせ、正常にオートコリレータが作動することを確認した。

4. まとめと今後の課題

これまでの研究により Yb レーザーシステムのファイバー使用部に関して、Yb ファイバーレー

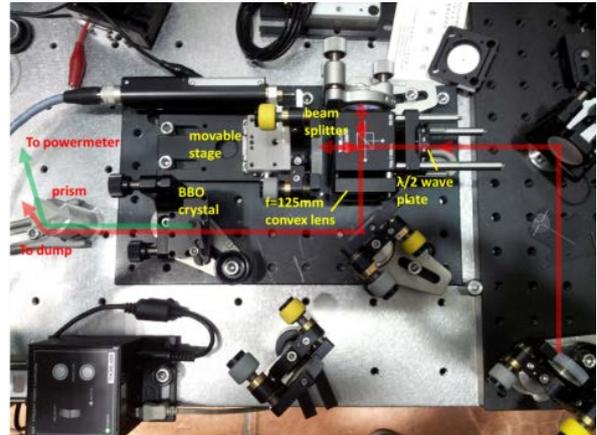


Figure 9: Interferometric autocorrelator.

ザー増幅器や強度変調器など個々のモジュールはほぼ完成した。今後はそれらのモジュールを統合した際に ASE を抑えつつ増幅が可能となるよう調整することが必要となってくる。また、Yb ファイバーレーザー増幅器後の Yb 固体レーザー増幅器の製作も今後の課題である。さらに、増幅後のダブルプリズム対によるパルス圧縮なども行い、オートコリレータによる測定も行っていく必要がある。

今後これらの課題をクリアし、繰り返し周波数 50Hz でパルス幅 200fs、パルスエネルギー数 J の高強度超短パルスを得られるよう Yb レーザーの開発を行ってゆく。

この研究の一部は、科研費基盤研究(C)24510120 によって行われた。

参考文献

- [1] E. L. Garwin, et al., "An Experimental Program To Build A Multimewatt Lasertron For Super Linear Colliders", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, No. 5, Oct. 1985
http://paper.kek.jp/p85/PDF/PAC1985_2906.PDF
- [2] M. Yoshioka, et al., "LASERTRON-Laser Triggered RF-Source for Linacs in TeV Region", Proceedings of the 1984 Linear Accelerator Conference, Seeheim, Germany, p. 469-471
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/184/papers/frq0005.pdf>
- [3] Z. Cheng, et al., "Compression of 2 mJ kilohertz laser pulses to 17.5 fs by pairing double-prism compressor: analysis and performance", Optics Communications 201 (2002) 145-155, Jan. 1, 2002
http://ac.els-cdn.com/S0030401801016753/1-s2.0-S0030401801016753-main.pdf?_tid=73b7b222-f5cb-11e2-ae2-0000aacb35f&acdnat=1374826674_27e414de94c5be1234b0ea48152ffcaf
- [4] Y. Matsumura, et al., "Fiber Laser Development for Dielectric Laser Accelerator", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS114.pdf