

SuperKEKB RF 電子銃用 25Hz と 50Hz レーザーシステムのアップグレード 25Hz AND 50Hz DOUBLE-BUNCH LASER SYSTEM UPGRADE FOR RF GUN AT SUPERKEKB

周 翔宇^{#)}, 夏井 拓也, 張 叡, 吉田 光宏, 小川 雄二郎
Xiangyu Zhou ^{#)}, Takuya Natsui, Rui, Zhang, Mitsuhiro Yoshida, Yujiro Ogawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The electron beams with a charge of more than 5 nC and a normalized emittance of less than 10 μm are expected to be generated in the photocathode RF gun at the injector linac of SuperKEKB. An ytterbium (Yb)-doped fiber and Yb:YAG thin-disk hybrid laser system is developed to obtain high peak energy pulses with 20 ps rectangle shape of UV pulses. As the result, more than 3 nC and 1 nC electron were generated in repetition of 25 Hz with single-bunch and double-bunch respectively.

1. 背景

ルミノシティーを目指す SuperKEKB へのアップグレードのため、新しい電子銃の開発・試験を行ってきた^[1]。5nC の電荷と 10 μm のエミッタンスの電子銃基準として、パルス長 20ps、パルスエネルギー mJ の矩形波形パルスレーザー光源が要求される。繰り返し 2Hz と 5Hz のシングルバンチに対して、Yb 系レーザーシステムの開発を行っていた。生成された紫外パルスを Ir₃Ce カソード^[2]に導入し、5.6nC の電子ビームを得た。

パルスの繰り返す周波数は 2Hz~50Hz、2 バンチに切り替えられることを要求する。レーザーとして繰り返し周波数が上がるとポンプ光を照射することにより媒質が局所的に熱蓄積、レーザー光路に悪影響を与える。そして、高繰り返し、ダブルバンチに対して、レーザー光源のアップグレードを行っている。

2. 25Hzシングルバンチレーザー光源の開発

2.1 レーザーシステム

昨年、25Hz レーザー光源を開発し、1nC の電子ビームを得たが^[3]、熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こし、ビーム品質の劣化し、レーザー安定性、増幅効率、出力強度などの問題があった。そこで 5nC 以上の電子ビームを得るため、Yb 系増幅媒質とするハイブリッド増幅システムのアップグレードを行った。

Figure 1 のよう、まず Yb ドップファイバー発振器から 51.9MHz の種光パルスを生成して、Linac の 2856MHz 主トリガーによって同期を行った。一段階のファイバー増幅した後、パルスを透過型回折格子ストレッチャーにより~20ps まで伸ばし、パルスのスペクトルを矩形に整形した。2 段階の Yb ファ

イバー増幅したパルスを 2 台電気光学効果 (EO) パルスピッカーにより低繰り返しパルスに変換した後、もう一段階のファイバーシステムを用いて数 μJ まで増幅した。低繰り返し、高強度増幅するため Yb:YAG thin-disk 結晶を用いて、マルチパス共振器増幅及び 4 段階のマルチパス増幅による多重アンブを行った。最後に、2 段階の第 2 高調波発生 (SHG) により mJ レベル紫外超短光源が得られた。ポンプ光源の繰り返す周波数を固定すると、熱影響とシステム条件も一致なので、シグナル光の繰り返す周波数を 25Hz 以下に自由に切り替えることも実現できた。パルス増幅効率が上がるとともに、レーザーシステムの安定化も改善した。

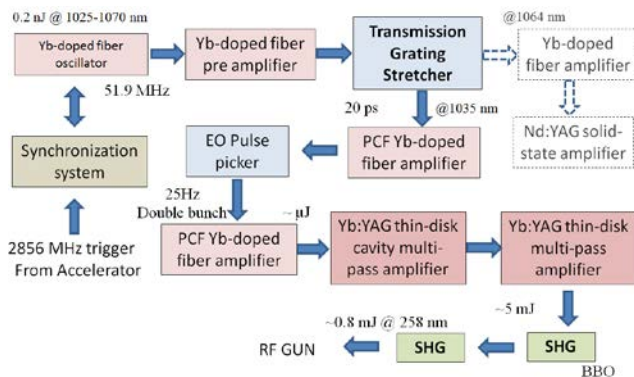


Figure 1: Layout of Laser system.

2.2 ファイバー発振器のバックアップ

加速器からの trigger 信号の 2856MHz と同期するために、レーザーの繰り返し周波数は 10.38MHz の通倍の 52MHz に設定した。生成されたパルスのスペクトルは 1025-1070nm、出力 10mW、パルスエネルギーが 0.2nJ を得た。

ファイバー発振器はレーザーパルスを生成し、RF シグナルと同期した。発振器の安定性は全体として重要な部分である。そこで、もう一台発振器を導入

した。

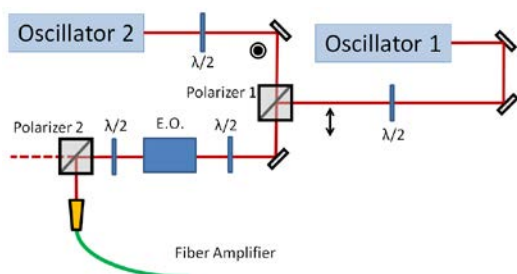


Figure 2: Selection of Oscillator.

Figure 2 のように、2 台の発振器の偏光方向を水平と垂直を設置し、Polarizer1 によって同光路に導入した。電気光学効果 (EO) モジュールの電圧をかけて、偏光方向をコントロールできる。そして、垂直偏光のパルスを選んで、ファイバー増幅システムに集光した。

2.3 114MHz ファイバー発振器の開発

開発した Yb ファイバー発振器には共振器内分散補償を導入するために回折格子を用いる。回折格子の使用はファイバー発振器の堅牢性、および安定性を犠牲にする。従って、全正常分散 (All-Normal Dispersion ; ANDi) 発振器の開発を行っている。更に、入射器に対して 114MHz の RF 信号を一番使いやすいので、レーザー共振器長を 114MHz に合わせる。

2.4 ファイバー増幅システムの改善

種光を増幅するため、低エネルギーと高エネルギーの 2 種類ファイバー増幅システムを採用した。

出力低下を補うため、コア径 4 μ m の Yb ドップファイバーを用いて、750mW のポンプレーザーダイオード (LD) と WDM(wavelength division multiplexed coupler)を溶接して、増幅した。ファイバー間の溶接によって、ロスが最低限に減少し、システムのコンパクト化も実現できる。

シグナル光を EO モジュールなどの光学装置を通して、平均パワーは 1mW 以下になり、ポンプパワーが強すぎるとバックグラウンドのノイズを発生し、増幅された。この問題を解決するため、LD のパワーを 3 つに分けて (15%、35%、50%)、3 段アンプを行った (Figure 3)。このステップまで、約 10mW の出力を得た。

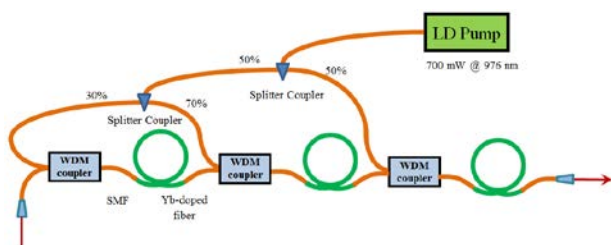


Figure 3: Yb-doped fiber pre amplifier.

プリアンプした後、1740 本の透過型回折格子対を用い、パルスを 20ps まで伸ばした。回折格子対間の距離は約 1.5m である。Yb ファイバー増幅と Yb:YAG の disk 増幅スペクトルを一致させるため、回折格子対とエンドミラーの間に空間整形スリットを挿入した。中心波長 1035nm 近辺に、幅 4nm の矩形利得スペクトルを保持する。

透過型回折格子対及び空間整形スリットによって、90%以上のロスを与えるので、エネルギーを補うため、もう一段ファイバーアンプを行った。

更に、パルスを μ J エネルギーに増幅するため、高エネルギーファイバー増幅システムを行った。

そして、コア径 40 μ m 長さ 1.2m の大口径 Yb フォトニック結晶ファイバー (PCF) を用い、波長 976nm の LD 励起光によって増幅を行う。増幅したパルスは 2 台ポッケルスセルを並べることにより、繰り返しを 25Hz、間隔 100ns の double パルスを変更した。さらなる高ピーク強度を得るためもう一段階同じ構造 PCF ファイバー増幅を行った。ポンプ光源の出力を安定化するため、波長 940nm の LD 励起光を用いた。低繰り返し増幅に ASE を避けるため、LD の入力を抑制して使用した。ファイバーアンプまで、 μ J レベルの低繰り返しシグナルパルスが得られた。

2.5 Yb:YAG 結晶クーリングシステムの改善

繰り返し周波数が 25Hz に上がると、連続使用による Yb:YAG 結晶に熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こし、増幅率を急に下げている。Thin-disk 結晶を銅板に接合し、10 $^{\circ}$ C の冷却水でクーリングを行った。銅板だけで冷却効果は不足なので、結晶と板の間に共晶混合物である 金/すず (Au/Sn) 層を採用した^[4]。

金/すず (80%:20%) 接合は良好な塗布性、高い熱伝導性と高い表面張力など多くの利点を備えている。Thin-disk 結晶を接合し、冷却性能の向上を実現した。Yb:YAG 媒質の増幅率を維持の上に、結晶表面の変形も抑える。

2.6 Thin-disk 固体増幅システムの改造

薄い Yb:YAG 結晶 Thin disk ではパルスの増幅率が低いので、光パルスが数十回繰り返される再生増幅が必要である。しかし、再生増幅システムでは、非常に長い共振器が必要である。装置的に複雑化し、自然放出光の増幅 ASE (Amplified Spontaneous Emission) の割合が多くなる。一方、マルチパス増幅にはビーム方向のずれに対して増幅性能が鋭敏に応答し、P.C.の透過オプティックスの損傷制限がなく、高効率の増幅が可能である。しかし、ビームが多数に折り返すことがあり、システムの構造が複雑になる。

従って、共振器タイプのマルチパス増幅器を開発した。Figure 4 のように、polarizer1 によって、シグナルパルスを共振器に閉じ込める。2 枚 45 度ミラーを用いて、ビームを Yb:YAG 結晶に 15 回くら

い増幅する。LD ポンプ光は 4.8kW、片方に Yb:YAG thin disk 結晶に斜入射する。増幅したパルス共振器に一周して、波長板にパルスの偏光を変換し、Polarizer2 及び Polarizer1 に通過する。そして、同じ用に 15 回増幅を再び行う。その後、増幅したパルスの偏光を変換し、Polarizer2 によって共振器外に飛び出す。この共振器は P.C.などのオプティクスを採用されなく、高効率と高増幅回数が同時に達成できた。

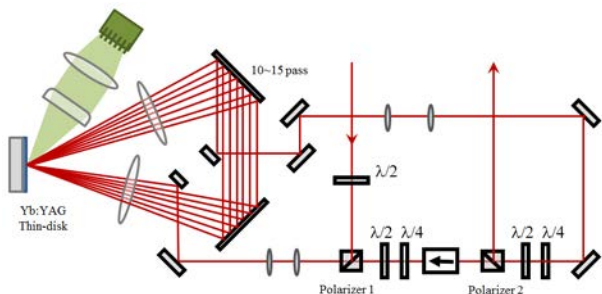


Figure 4: Thin-disk multi-pass amplifier with cavity.

更に高エネルギーを取り出すため、4 段階のマルチパスアンプを行った。Yb:YAG 結晶の前に 2 枚凸レンズによるビーム径を調整し、熱レンズの補償を行う。レンズの前後を調整し、thin disk 結晶表面にシグナル光とポンプ光のビーム径を合わせ、効率よく増幅した。4 台の LD ポンプは両側に入射して、片側の出力パワーが 4.8kW である。最終段増幅にはシグナル光は集光させず、平行ビームを利得結晶に 2 回折り返し、十分な励起フルエンスが得られた。マルチパス増幅によって、出力は 5mJ に上げた。

その後、BBO 結晶に通して、2 段階シングルショット SHG 波長変換により、中心波長 259nm、0.8mJ の紫外パルスを生成した。発振器と各増幅システムに ASE およびバックグラウンド光の割合をできるだけ抑制され、2 段階の SHG の変換効率は 60%と 30%に上がることを達成した。

2.7 RF 電子銃試験

レーザーが生成した光源は約 15m の自由空間に転送し、RF 電子銃カソードに 60° 斜入射した。紫外光は空気中に伝播すると、ロスが 50%に上がる。そのロスを避けるため、第 2 段階の SHG ステージを電子銃の隣に設置した。2 倍波の 515nm ビームを 15m の自由空間を通過すると、95%のエネルギーを維持できた。

シングルバンチのシグナルの場合、3nC 以上の電子ビームを得た (Figure 5)。ダブルバンチのシグナルを作る場合、1バンチ目のシグナル強度を抑えて、二つのバンチの出力を同じようにコントロールし、各 1nC 電子ビームを観測した。

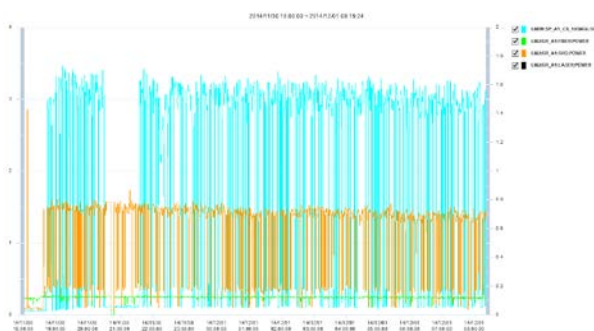


Figure 5: Charge history of RF-Gun.

3. 50Hz ダブルバンチレーザー光源の増設

ポンプ LD の繰り返し周波数を 50Hz に上がると、熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こし、Yb:YAG 結晶の増幅率及びビーム品質を悪くしている。

一方、Nd:YAG レーザー結晶は、高い光学的均一性や耐力性を備え、高繰り返し増幅に対応できる。超短パルス Nd:YAG レーザーは 808nm の LD による直接励起し、1064nm で最大スループットが得られる。Yb ドップファイバーのスペクトル領域は 1030-1065nm であり、Yb:YAG 及び Nd:YAG 増幅を両方対応できる。

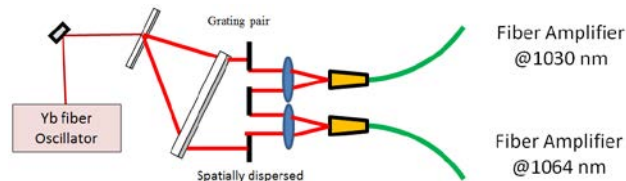


Figure 6: Spectrum separation by grating pair.

Figure 6 のように、回折格子ストレッチャーによって、発振器からのパルスを波長ごと (1020nm-1070nm) に展開される。この中、中心波長 1030nm 幅 4nm の成分が選択され、ファイバー増幅および Yb:YAG 結晶増幅に導入した。今度、使用しない一部中心波長 1064nm 幅 2nm の成分も取り出して、Nd:YAG 増幅システムのシグナル光として使われる。

Yb ドップファイバーと Nd:YAG 結晶増幅を合わせて、50Hz ダブルバンチのレーザー光源を平行に開発している。Nd 系光源のパルススペクトルが狭くて、周波数領域の制御が難しくなる。パルスの整形には実現できなくなる。

4. まとめ

RF 電子銃を励起するため、Yb 系レーザーシステムの開発を続けている。Yb ファイバー発振器・Yb ファイバー増幅器・Yb:YAG の thin-disk 型固体再生増幅器及びマルチパス増幅器により、高強度赤外光源を得た。Yb:YAG 結晶に冷却効果を改善し、結晶と板の間に共晶混合物である 金/すず (Au/Sn) 層を採用した。2 段階の第 2 高調波発生を行い、変換された紫外光源を Ir₅Ce カソードに入射した。25Hz の

ダブルバンチのレーザー光源に対して、安定な 1.0nC の電子ビームが得られた。

SuperKEKB 入射要件の 50Hz、ダブルバンチに対して、繰り返し周波数の増加に伴う熱レンズ効果によって、Yb:YAG 結晶には対応できない。そして、回折格子ストレッチャーに一部の光源を分けて、新しい Nd:YAG 結晶増幅システムを開発している。固体増幅の部分に Yb:YAG と Nd:YAG の併用を進めている。

参考文献

- [1] X. Zhou et al., FSP022, “KEK 電子陽電子入射器の現状”, in these proceedings.
- [2] T. Natsui et al., TUPJE003, “Quasi-Traveling Wave RF Gun and Beam Commissioning for SuperKEKB”, IPAC15, Richmond, USA, 2015.
- [3] X. Zhou, et al., SAP114, “SuperKEKB 用 RF 電子銃に向けたレーザーシステムのアップグレード”, 第 11 回加速器学会, 青森, 2014.
- [4] R. Zhang, et al., WEP121, “Improvements of the Laser System for RF-Gun at SuperKEKB Injector”, in these proceedings.