

SuperKEKB の Phase-II コミッショニングに向けた RF 電子銃用 Yb ファイバーと Nd:YAG ハイブリッドレーザーシステム

YB FIBER AND ND:YAG HYBRID LASER SYSTEM OF RF GUN FOR SUPERKEKB'S PHASE-II COMMISSIONING

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

For commissioning phase-II of SuperKEKB project, a new laser system based on the Yb doped fiber and Nd:YAG crystal amplifier was development. By the improvement of laser property, 1.5 nC beam generation from the gun was achieved with the bunch length of 22 ps in 1-25 Hz by single or double bunch.

1. 背景

SuperKEKB 計画には高ルミノシティ・低エミッタンスを目指すため、RF 電子銃および電子銃用レーザーの開発・試験を行ってきた。Yb ファイバー及び Yb:YAG の thin-disk 型ハイブリッドシステムにより、25Hz レーザー光源を開発し、Phase-I に入射器ビームコミッショニングを完成した。[1]

しかし、高強度パルスを増幅すると、非線形効果より波長・位相変調などの問題が生じてしまい、出力やビーム品質に制限を与えている。レーザーダイオード (LD) 励起 Nd:YAG レーザーは、容易に高出力化することができる利点がある。Phase-II に進んで衝突点での絞り込み及び衝突ビーム調整を行い、3nC 程度のバンチ電荷量が必要であるので、Yb:YAG 結晶の代わりに Nd:YAG 結晶増幅システムを開発している。

レーザー精度や品質を維持するためには、環境を常に適切な温度で管理することが大切である。特にレーザーの心臓部といえるパルス発振器は、温度変化に影響されやすく、同期を外したり、ノイズを生成したり、モード同期を動作できないことがある。そして、新レーザー室を立ち上げて、レーザー室の室温及び冷却設備を管理し、安定な環境温度を維持している。

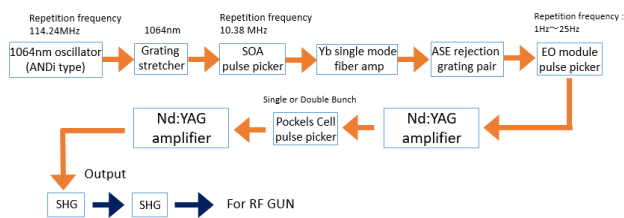


Figure 1: Layout of Laser system.

2017 年秋に開始予定 Phase-II コミッショニングに向けて、新レーザー室に安定な高品質光源を開発し

[#] xiangyu.zhou@kek.jp

ている。Yb ファイバー発振器と Yb ファイバー増幅した後、Nd:YAG 増幅システムを採用した。新光源が 20 ps、500 μ m、1-25 Hz シングル及びダブルバンチの目標を目指し、より安定性を求める。(Figure 1)

2. 1-25 Hz Yb/Nd ハイブリッドレーザー光源

2.1 ファイバーレーザーシステム

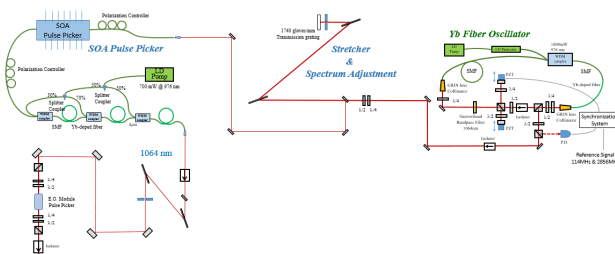


Figure 2: Fiber part structure.

Figure 2 のように、まず全正常分散 ANDi (all normal dispersion)タイプ Yb ドップファイバー発振器から 114.2 MHz (10.38*11 MHz)の種光パルスを生じて、Linac の 2856 MHz と 10.38 MHz 主トリガーによって同期を行った。室温が 25°C 設定し、 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ に変化される。発振器のモードロック及び同期が安定し、数ヶ月に連続運転している。

種光の出力が約 100 mW であり、透過型回折格子ストレッチャーにより ~ 20 ps まで伸ばし、パルスのスペクトルを中心波長 1064 nm、バンド幅 0.5 nm の矩形に整形した。

高速光スイッチ (切り替え速度 $\sim 1\text{ns}$) 半導体光増幅(semiconductor optical amplifier: SOA)はパルスピッカーとして使用して、10.38 MHz 外部 RF 信号との同期系を NIM で構築し、SOA チップとドライバーに適應したパルスピック信号を SOA に入力する。パルス列を 10.38 MHz に下げると同時に増幅によ

て利得が得られた。

弱いパルスを増幅するため、750 mW のポンプパワーを 3 つに分け (15%、35%、50%)、コア径 4 μm の Yb ドップファイバーを用いて、ポンプ LD と WDM(wavelength division multiplexed coupler)を溶接し、シグナル光を 3 段増幅した。

SOA 及びシングルモードファイバーアンプで発生した ASE を除去するために、透過型グレーティングペアとスリットの組み合わせで、中心 1064 nm、半値全幅 0.5 nm のみを切り出した。

増幅したパルスは電気光学効果 (EO) パルスピッカーによりを低繰り返し 1-25 Hz のダブルバンチに変更した。そこまで、数十 nJ ピーク強度の低繰り返し 20 ps 光源が得られた。[2]

旧レーザーには、大口径 Yb フォトニック結晶ファイバー (PCF) を用い、 μJ ピーク強度までパルスを増幅した。PCF ファイバーの利得スペクトル中心が 1040 nm であり、中心波長 1064 nm シグナルに対して、増幅効率が低下し、採用しない。

ファイバー発振器及び増幅器が半年以上連続運転し、メンテナンスフリーでほぼ安定な出力が得られた。

2.2 Nd:YAG 増幅システム

ダイオード励起固体 (DPSS) Nd:YAG レーザーは固体レーザーとして最も普及しているレーザーである。LD の発光スペクトルは YAG 結晶の吸収スペクトルより狭く、LD の光パワーを効率良く YAG 結晶に投入することができる。利得スペクトルが狭い欠点があるのに、高強度増幅しやすく、Phase-II 運転に対応できる。

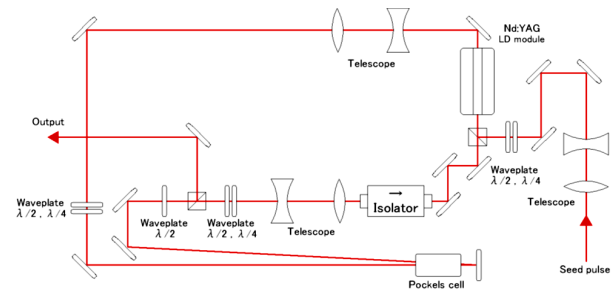


Figure 3: Nd:YAG Rod regenerative amplifier.

まず、nJ レベルパルスを mJ レベルに増幅するため、シグナル光が利得結晶に繰り返される再生増幅を試した。Figure 3 のように、リング型再生増幅共振器で直径 2 mm 長さ 79 mm のロッドタイプ Nd:YAG 結晶を採用する。共振器内に高速レスポンス (~20 ns) 電気光学効果 Pockels Cell を用い、共振器長が 7 m 以上設置した。高利得の LD モジュールによって、1 パスの増幅倍率が 5 倍以上である。しかし結晶に熱レンズ効果を相殺するため、光束径をテレスコプで拡散する。プロファイル辺縁が切られるので、実際の 2 パスの増幅倍率が約 3~4 で、2.0 mJ まで増幅できた。共振器内シグナルパルスを閉じ込め、利得飽和直後に取り出す。その後、更に高エネルギーを得るため、ロッド Nd:YAG のシング

ルパス増幅システムに導入した。結晶サイズ直径 4 mm 長さ 93 mm で、5 mJ まで増幅した。

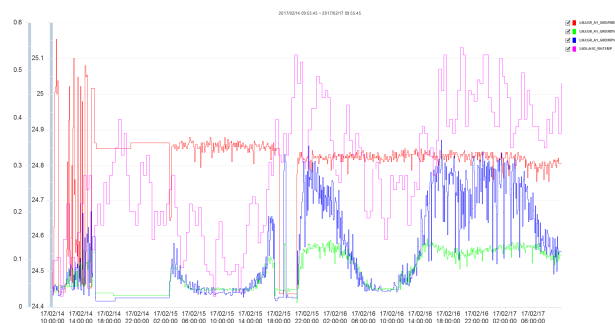


Figure 4: Output log data for fiber and regenerative amplifier.

Figure 4 はレーザー出力の安定性を表示する。横軸が時間スケール、3 日間に観測した。赤線がファイバーの出力エネルギー、緑線と青線が Nd:YAG の再生増幅と 2 パス増幅出力である。一方、紫線が室温である。温度変化最大 0.3°C に対して、ファイバー増幅の出力が一定に維持していたが、Nd:YAG 増幅に巨大な変化が現れた。再生増幅の共振器が長く、環境変化による安定条件がずれ易いことが分かった。この問題を解決するのが難しいので、長時間安定運転のため、再生増幅システムが廃止された。

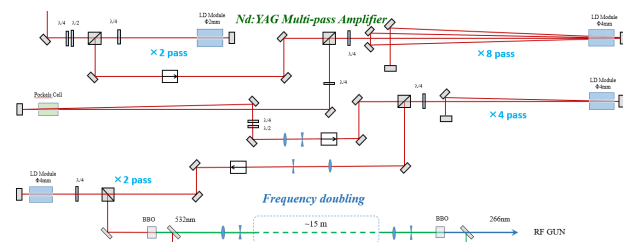


Figure 5: Nd:YAG Rod multi-pass amplifier.

マルチパス増幅には各パスの光束方向を調整でき、増幅性能が鋭敏にตอบสนองし、安定な増幅が可能である。しかし、光束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。mJ まで増幅するため、4 段階のマルチパス増幅を行った (Figure 5)。

まず、2×79 mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を用いて高利得の 2 パス増幅を行った。1 パスの増幅倍率が約 7 倍で、往復で約 50 倍の増幅倍率が得られ、 μJ まで増幅した。

2 段から 4 段まで低利得 4×93 mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を採用する。2 段目増幅には 8 パス増幅を行い、~50 μJ まで増幅した。その後、P.C. を挿入し、ノイズ信号を切る上、シングル・ダブルバンチを切り替えることができる。

3 段目マルチパス増幅には 4 パス増幅で、700 μJ まで増幅した。高強度増幅に熱レンズ効果を抑えるため、テレスコプレンズを設置した。4 段目には 2 パス増幅で、4.5 mJ まで増幅した。

最後に、4 mm と 5 mm の BBO 結晶を用い、2 段階の第 2 高調波発生 (SHG) により紫外超短光源を生成した。2 倍波変換効率が 45% で、2.1 mJ の 532

nm 光が得られた。数枚の全反射ミラーによって、2倍波ビームをレーザー室から 15 m 外にある RF 電子銃の近辺に導入した。自由空間及び反射ミラーの損失により 80%の転送率ができた。そして、RF 電子銃前に第 2 段階 SHG で 510 μm の紫外パルスを生じさせ、変換率 25%である。全体的に ω -4 ω の変換効率は 10%以上に達成した。

2.3 レーザー光源のプロパティ

Figure 6 によって、パルスの時間幅をストリークカメラで測った。パルス幅が約 22 ps であり、旧 Yb:YAG レーザーの 30 ps より短く、パンチ長を抑えることもできる。

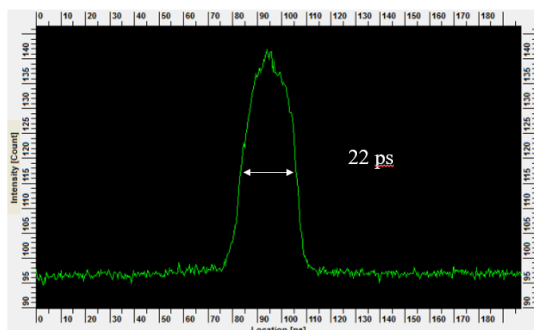


Figure 6: pulse time domain profile.

Figure 7 は増幅後のスペクトルを示す。中心波長が 1064.35 nm で、幅 0.2 nm である。Yb:YAG 結晶によりレーザーが狭いので、整形することができない。

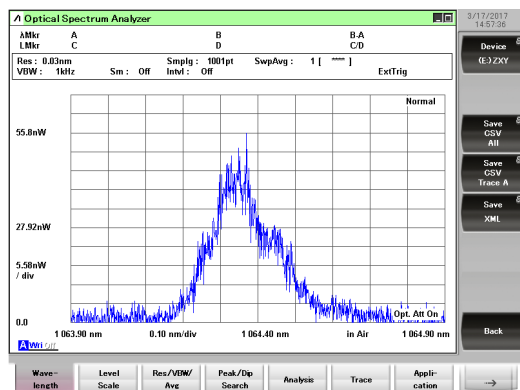


Figure 7: pulse spectrum.

マルチパス増幅を採用する目的がレーザー安定性の改善である。Figure 8 は 3 日間にレーザー出力の安定性を表示する。赤線がファイバーの出力エネルギー、他の線が各段階の出力エネルギーを表示する。Figure 4 に比べると、かなり改善したことが分かった。

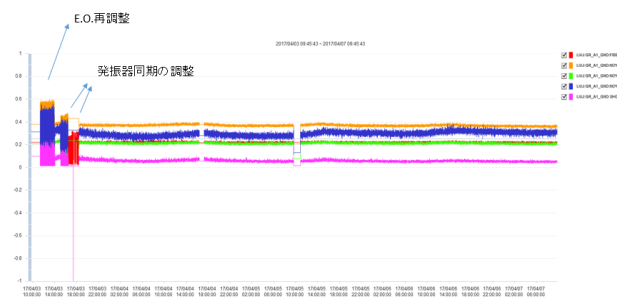


Figure 8: Output log date for amplifier.

Figure 9 は 2 倍光源のプロファイルを示す。プロファイルが汚い原因を探し、最終段増幅に結晶とポラライザーを損失したことを発見した。これから交換する予定である。

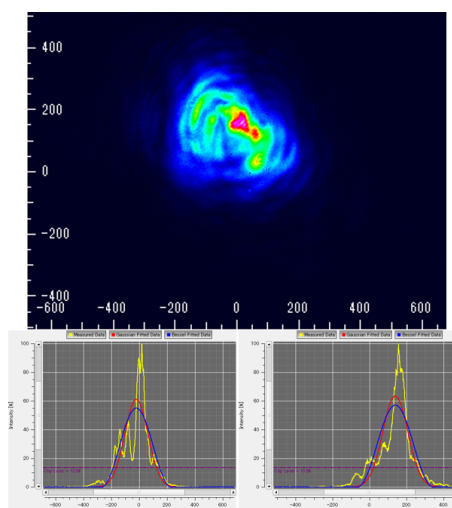


Figure 9: Beam profile of the 2 ω .

2.3 ビームコミッションング

出力パルスが 1-25 Hz・シングル・ダブルバンチに切り替える。この光源を用いて、ビームコミッションングを行った。RF 電子銃で 1.57 \pm 0.032 nC 電子発生を確認した。

Q Scan によって、エミッタンスは水平方向：22.955 \pm 0.879 mm-mrad、垂直方向：11.376 \pm 7.876 mm-mrad を得ることができた。この結果は Phase-I コミッションングより改善したことを確認した。[3]

レーザー光源のパルスエネルギーが 500 μm 以上であり、Phase-I レーザーよりパルス強度が十分強くなる。目標の 3 nC 電子を出すため、ビームプロファイルの改善が重要である。

3. まとめ

Phase-II ビームコミッションングにむけて、新しい Yb ドップファイバー及び Nd:YAG 型ハイブリッドレーザー光源を開発した。Phase-I 用レーザー光源より、出力パルスエネルギー及び時間幅をアップグレードし、安定性を改善した。RF 電子銃で 1.57 nC の電子発生を確認した。パルスの繰り返し周波数が 1-25 Hz シングル・ダブルバンチに自由に切り

PASJ2017 WEP116

替える。Phase-II ビームコミッショニングまでビームプロファイルを調整する予定である。

そして、Phase-III に向け、高性能 RF 電子銃及びレーザーシステムの開発[4-6]も続いている。

参考文献

- [1] M. Satoh *et al.*, MOP060, “SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状 (III)”, 第 13 回加速器学会, 幕張メッセ, 2016.
- [2] X. Zhou *et al.*, WEOM02, “SuperKEKB に向けた RF 電子銃用 Nd/Yb ハイブリッドレーザーシステム”, 第 13 回加速器学会, 幕張メッセ, 2016.
- [3] M. Satoh *et al.*, MOP060, “SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状 (IV)”, 第 14 回加速器学会, 札幌, in these proceedings.
- [4] T. Natsui *et al.*, TUP004, “SuperKEKB 用 RF gun の開発状況”, 第 14 回加速器学会, 札幌, in these proceedings.
- [5] R. Zhang *et al.*, WEP117, “SuperKEKB 入射器における RF 電子銃用レーザー安定性と出力エネルギーの高性能化の検討”, 第 14 回加速器学会, 札幌, in these proceedings.
- [6] D. Satoh *et al.*, WEP106, “SuperKEKB 電子入射器のためのイリジウム・セリウム光陰極の高性能化”, 第 14 回加速器学会, 札幌, in these proceedings.