

# 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

## Nd/Yb HYBRID AMPLIFIER LASER SYSTEM OF RF GUN FOR SuperKEKB

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

### Abstract

For RF gun of injector linac, by development of the Yb-doped laser system, more than 1.0 nC electron has been obtained in 25 Hz. The Yb-doped laser system is already for commissioning phase I. Next, to generate 50 Hz double bunch electron beam, a new Nd/Yb hybrid laser system is development to improve the stability and pulse energy.

### 1. 背景

SuperKEKB の設計ルミノシティは KEKB で最終的に到達したルミノシティの約 40 倍である。KEKB の熱カソード DC 銃が 20 mm-mrad 5 nC という高電荷低エミッタンスを達成するのは非常に困難であるので、SuperKEKB ではフォトカソード RF 電子銃を使用することになった。ただいま、RF 電子銃の導入やレーザー光源の増強など、入射器の改造も進行中である。

SuperKEKB の建設は順調に進み、今年、第一段階のビームコミッショニング (Phase I) を開始した [1]。この期間には RF 電子銃と KEKB 時代から使用している熱電子銃と並行して運転を行う。RF 電子銃に向けて 25 Hz Yb 系ファイバーおよび Yb:YAG Thin-disk 増幅媒質とするハイブリッド増幅システムを開発した。Phase I 運転においては、1 nC 程度のバンチ電荷量で満足できる。このレーザーを使ったシングルバンチ、25 Hz、1.3 nC の電子源を生成され、ビームコミッショニングを行っている。

その後、今秋に第二段階のビームコミッショニング (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、5 nC 程度のバンチ電荷量が必要である。したがって、Nd と Yb ドップ利得媒質を用い、新しいハイブリッドレーザーシステムを開発している。

### 2. 25Hz Yb ハイブリッドレーザー光源

#### 2.1 レーザーシステム

Phase I 運転においては、1 nC 程度の安定なビーム開発に集中する。RF 電子銃用 Yb ハイブリッドレーザーシステムの開発はほぼ完成した [2]。

Figure 1 のよう、まず Yb ドップファイバー発振器から 51.9 MHz の種光パルスを生じて、Linac の 2856 MHz 主トリガーによって同期を行った。コア径 4  $\mu\text{m}$  の Yb ドップファイバーを用いて、750 mW のポンプレーザーダイオード (LD) と

WDM(wavelength division multiplexed coupler)を溶接し、種光を増幅した。そして、パルスを透過型回折格子ストレッチャーにより $\sim 30$  ps まで伸ばし、パルスのスペクトルを矩形に整形した。

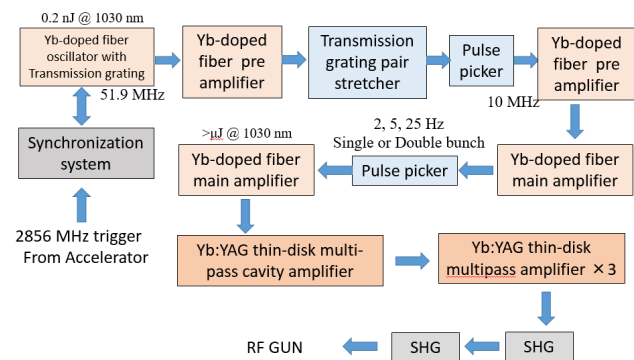


Figure 1: Layout of Laser system.

半導体光増幅(semiconductor optical amplifier: SOA)は高速光スイッチ (切り替え速度 $\sim 1\text{ns}$ )でパルスピッカーとして使用する。繰り返し周波数 51.9 MHz のパルス列を 10.38 MHz に下げると同時に増幅によって利得が得られた。

さらに、弱いパルスを増幅するため、ポンプパワーを3つに分けて (15%、35%、50%)、3段アンプを行った。そして、コア径 40  $\mu\text{m}$ 、長さ 1.2 m の大口径 Yb フォトニック結晶ファイバー (PCF) を用い、波長 976 nm の LD 励起光によって増幅を行う。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に変更した。 $\mu\text{J}$  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 940 nm の LD 励起光を用いた。

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3段階のマルチパス増幅による多重アンプを行った。ディスクレーザーには結晶を薄くディスク状にして、冷却装置への設置面積を広くした。いろんなテストの結果として、結晶厚み 05 mm に対して 25 Hz 繰り返しパルス増幅に対応できる。最後に、2段階の第2

高調波発生 (SHG) により sub-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 25 Hz 以下に自由に切り替えることも実現できた。長時間安定な運転するため、基本波出力エネルギーは 7 mJ 程度を抑えている。RF 電子銃前に紫外パルスエネルギーが約 400  $\mu$ J 得られた。

## 2.2 レーザー光源の安定性

昨年、25 Hz 繰り返しに対して 1 nC の電子ビームを得たが、室温および冷却システムによる熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こし、レーザー安定性などの問題が残った。それらの問題を完全に解決し、1 か月以上レーザーが連続運転によって、長時間安定性をテストした。

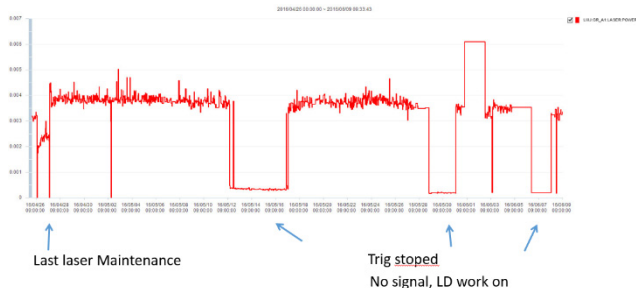


Figure 2: Stability of Laser system from 4/26 to 6/9.

Figure 2は、4月26日から6月9日の間にレーザー光源の出力エネルギーを観測した。4月27日に最後のレーザーメンテナンスを行って、その後全レーザーシステムを6月9日までノータッチしていた。途中、何回に外部トリガーがなくなり、レーザーシグナルを0になることがある。その場合には、全てのレーザーポンプダイオードが運転し続ける、熱条件が変化しない。外部トリガーを回復したら、レーザーの出力も元に復旧した。1 か月以上にレーザー光源が安定に働くことが確認した。

更に、レーザーハットの中にエレベーター点検を月一回に行うので、すべてのレーザーポンプダイオードを半日くらいシャットダウンした。その後、再び電源を入れるとレーザーが完全に復旧したことも確認した。

## 2.3 レーザーパルス幅および電荷量

透過型回折格子ストレッチャーを用い、パルススペクトルを調整することで Sub-30ps 矩形パルスを整形する。回折格子間の距離を調整し、回折格子対の後に空間マスクを設置して、パルスの時間幅を調節した。Figure 3 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 28 ps であり、矩形になるように整形した。

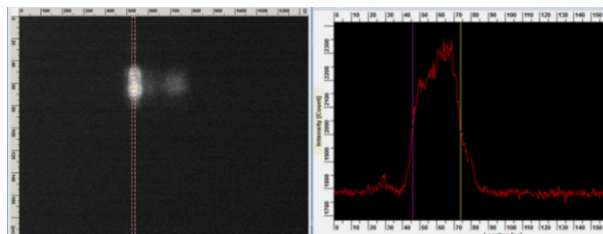


Figure 3: Pulse shape by streak camera.

また、レーザー光源を用いて RF 電子銃から電子ビームを生成した。1.3 nC、25 Hz、シングルバンチ電子発生を確認している[3]。Q Scan によって、エミッタンスは水平方向：28.3 mm-mrad、垂直方向：26.4 mm-mrad の結果になった。このレーザーシステムは Phase I 運転条件を満たしたので、ビームコミッションングを行っている。

## 3. 新 Nd/Yb ハイブリッドレーザーシステムの開発

今使っているレーザーシステムは二つの制限がある。一つはポンプ光の繰り返し周波数を上げると、熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こす。厚み 0.5mm の Yb:YAG thin-disk 結晶について繰り返し 50Hz に上がると増幅率及びビーム品質を悪くしている。この問題を解決するには冷却システムの改造が必要である。もう一つは増幅するパルスの幅が約 30ps であり、パルスのピーク強度が強すぎ、それ以上に増幅すると、非線形効果が起こり、波長・位相の変調などの問題が生じてしまう。この問題を解決するため、チャープパルス増幅 (Chirped pulse amplification: CPA) システムが必要である。したがって、最終運転条件を満たすため、新しいレーザーシステムを開発している。

半導体 LD 励起方式は、すべて固体素子で構成されるため、レーザー媒質内部に発生する熱を大幅に低減できる。従来の励起方式に比べ、高変換効率・コンパクト化が可能であり、高品質ビームが得られる。更に、長寿命・超安定な LD を用いた完全固体化レーザーで、メンテナンスが容易である。Nd:YAG 利得媒質には、Yb:YAG 媒質と同じ、LD 直接励起なので、構造簡単により、更なる高光学均一性や耐力性を備え、高繰り返し高強度増幅に対応できる。

しかし、Nd 系媒質の利得スペクトルが狭くて (~0.3 nm)、周波数領域の制御が難しくなる。Phase II には高電荷量が目指して、レーザー光源の増強することは中心として開発する。

一方、第三段階のビームコミッションング (Phase III) について高強度と低エミッタンスを両方目指すので、Yb:YAG 利得媒質によって CPA 増幅システムを開発を行う。

### 3.1 レーザーシステム

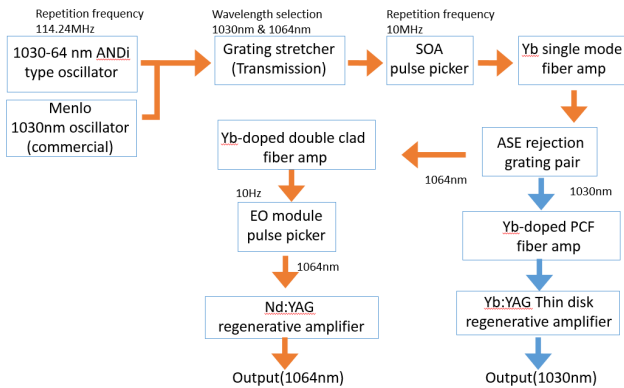


Figure 4: Layout of Laser system.

Figure 4 によって、まず、市販の 114 MHz、中心波長 1030 nm の Menlo 社発振器を導入した。バックアップとして、新全正常分散 ANDi (all normal dispersion)タイプ Yb ファイバー発振器を開発した。シグナルパルスを中心波長 1030 nm と 1064 nm の成分を分け、Yb:YAG 及び Nd:YAG 増幅を両方対応できる。そして、旧レーザーシステムと同じように、透過型回折格子ストレッチャー、SOA パルスピーカーおよびファイバー増幅システムを導入した。ストレッチャーによる広帯域スペクトルパルスを中心波長 1030 nm と中心波長 1064 nm によって二つに分ける[4]。

1064 nm 成分シグナルは Yb ドップファイバーを用いて増幅し、EO パルスピーカーによって Nd:YAG 固体再生増幅システムに入れる。こちらの増幅システムは高強度パルスを目指す。一方、1030 nm 成分シグナルは Yb ドップ PCF ファイバーを用いて増幅し、Yb:YAG 固体再生増幅システムに入れる。今後に CPA システムも導入する予定である。

### 3.2 全正常分散 ANDi 型ファイバー発振器

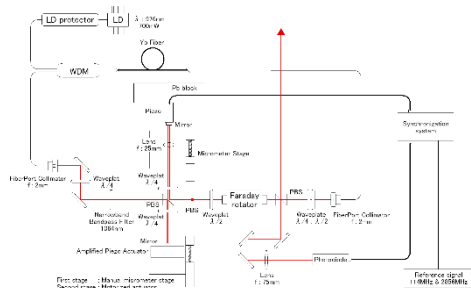


Figure 5: ANDi type Oscillator.

全正常分散型ファイバー発振器は、共振器内での回折格子などの分散補償素子を設けことなく、全正常分散発振することである。パルスの広がり、モード同期の役割を担うスペクトルバンドパスフィルタによって補償される。Figure 5 によって、共振器内に回折格子対を使用しないので、発振器の堅牢性を増強し、内部ロスを抑制した。更に、発振器内

のシグナルパルスを送分散しか与えないので、パルス列の安定性もアップした。発振器の繰り返し周波数を 114.2 MHz (10.38\*11 MHz)にセットした。そして、繰り返し周波数 10.38 MHz の長共振器も開発している。

バンドパスフィルタの中心波長およびバンド幅によって生成されたシグナルパルススペクトルを調整できる。Figure 6 はいろんなバンドパスフィルタにおいて出力パルスのスペクトルの形である。

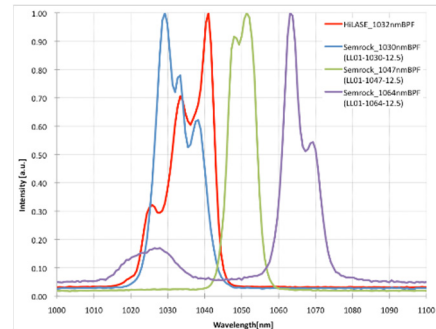


Figure 6: The spectrum of the oscillators.

### 3.3 1030/1064 nm ビームの仕切

Figure 7 のように、回折格子ストレッチャーによって、回折格子対とエンドミラーの間に発振器からのパルスを波長ごとに展開される。この中、中心波長 1030 nm 幅 2 nm の成分と中心波長 1064 nm 幅 0.3 nm の成分が選択され、それぞれにファイバー増幅に導入した。増幅した 1030 nm のパルス成分を Yb:YAG thin-disk 結晶増幅システムのシグナル光として使われるが、増幅した 1064 nm のパルス成分を Nd:YAG Rod 結晶増幅システムのシグナル光として使われる。

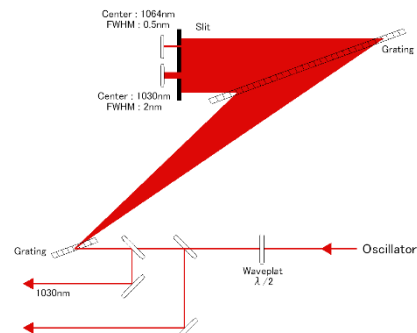


Figure 7: Grating stretcher.

### 3.4 Nd:YAG Thin-disk 固体再生増幅システム

まず、増幅率を上げるため、光が利得結晶に繰り返される再生増幅を行う。Figure 8 は ND:YAG リング型再生増幅共振器である。ダブルバンチを増幅するため、共振器長が 7 m 以上設置した。共振器内に電気光学効果 Pockels Cell を用い、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、Nd:YAG マルチパス増幅システムに導入予定である。

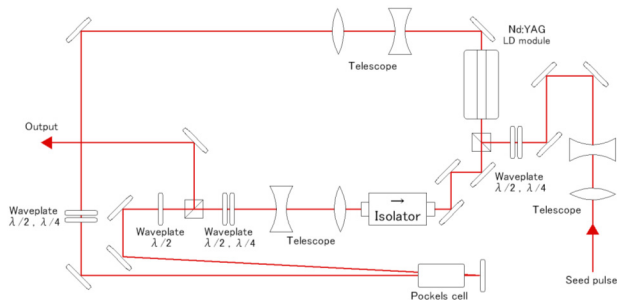


Figure 8: Nd:YAG Rod regenerative amplifier

Nd:YAG 増幅システムには Phase II に対応するため、高強度出力光パルスを目指す。

### 3.5 Yb:YAG Thin-disk 固体再生増幅システム

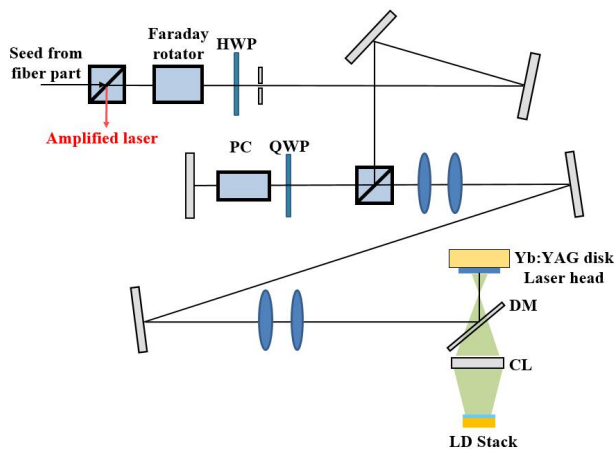


Figure 9: Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier

PCF ファイバー増幅した 1030 nm のシグナルパルスを Yb:YAG Thin-disk 再生増幅共振器(Figure9)に入れる。

繰り返し周波数 50 Hz について、熱蓄積を避けるため、新しい結晶クーリング用のヒートシンクを開発し、はんだ付け方法も改善した。更に、ペルチェ素子および真空チャンバーによって -23° まで Yb:YAG 結晶を冷却実験も行った。もっと詳しい報告は[5]に掲載した。

Yb:YAG 増幅システムには最終の Phase III に対応するため、高強度およびパルス幅が整形できるレーザー光源を目指す。

## 4. まとめ

RF 電子銃を励起するため、Yb 系増幅媒質とするハイブリッドレーザー光源を開発した。繰り返し周波数 25 Hz に対して、安定な 1.3 nC の電子ビームが得られた。Phase I ビームコミッショニングにむけて運転している。

今後のビームコミッショニングのため、5 nC 程度のバンチ電荷量生成できるおよび整形できるパルス光源が必要である。したがって、Nd および Yb ドープ利得媒質を用いて、新しいハイブリッドレーザーシステムを開発している。

Yb ファイバー発振器から生成した広帯域シグナルを回折格子ストレッチャーによって、中心波長中心波長 1064 nm 幅 0.3 nm の成分と 1030 nm 幅 2 nm の成分が選択され、それぞれに Nd:YAG 増幅システムと Yb:YAG 増幅システムに導入した。Phase II ビームコミッショニングにおいて、Nd:YAG 増幅システムを開発し、高強度出力パルスを目指す。そして、最終 Phase III ビームコミッショニングにおいて、Yb:YAG 増幅システムを開発し、高強度出力パルスとパルス形の整調を両方目指す。

## 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)”, in these proceedings.
- [2] X. Zhou *et al.*, THP115, “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”, 第 12 回加速器学会, 福井, 2015.
- [3] T. Natsui *et al.*, MOP064, “SuperKEKB 用 RF gun のコミッショニング状況”, in these proceedings.
- [4] X. Zhou *et al.*, THPMY041, “Neodymium and Ytterbium hybrid solid laser of RF gun for SuperKEKB”, IPAC16, Busan, Korea 2016.
- [5] R. Zhang *et al.*, TUP054, “Improvements of Stable and High Output Energy Laser System for RF-Gun at SuperKEKB Injector”, in these proceedings.