

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

Laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB

Xiangyu Zhou ^{#)}, Takuya Natsui, Mitsuhiro Yoshida, Yujiro Ogawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

For injector linac of SuperKEKB project, the electron beams with a charge of 5 nC and a normalized emittance of 10 μm are expected to be generated in the photocathode RF gun. An ytterbium (Yb) based laser source with a center wavelength of 258 nm and a pulse width of 30 ps is employed to obtain high peak energy pulses. More than 5 nC electron with single-bunch has so far been generated in the 2 Hz. Next, the laser system was restructured to 25Hz double-bunch, and 1.3 nC electron beams was obtained at both bunches.

1. 背景

高ルミノシティを目指すSuperKEKBでは、RF電子銃の要求性能5nCの電荷と10 μm のエミッタンスの実現のために、数十ps以上の初期バンチ長が必須である。Ir₃Ceカソードの場合パルス長30ps、パルスエネルギーmJの広帯域スペクトル紫外パルスレーザー光源が要求される[1]。KEK入射器では、RF電子銃励起用のYb系レーザーシステムの開発を行っている。

最初に、コミュニケーション用として、低繰り返しシングルバンチの電子源が要求され、その後、実際運転のために25Hzおよび50Hzのダブルバンチの光源が必要となる。まず、電子銃に向けたレーザーに対して、電子を出すために2Hzシングルバンチのレーザーシステムを開発した。テスト実験終了後、レーザーを25Hzダブルバンチにアップグレードした[2]。さらに、改造した後、レーザー光源の繰り返しは25Hz以下、シングルとダブルバンチを自由に変更できるようになった。

イッテルビウム (Ytterbium:Yb) 系レーザーは 3準位系で、上準位寿命が長く、エネルギー蓄積効果が大きい。LD 直接励起によって吸収波長と増幅波長の差が少ないため、エネルギーの損失が低く、熱エネルギーの放出も低い。また広い波長で増幅させることができるので超短パルスレーザーを作りやすいため、RF 電子銃用レーザーシステムとして採用した。

ファイバーレーザーは添加濃度が高くすることができ、高い発振効率で小型、軽量、高ビーム品質といった利点を備えている。一方、thin disk レーザーは熱レンズ効果、排熱効率の問題を抑制するため、高強度レベルの増幅に適合している。従って、近年、伝統的なレーザー増幅システムより、ファイバー増幅および disk 増幅が注目されている。

そのため、前段でファイバー増幅して、後段で Yb:YAG 結晶を用いた増幅により、高信頼性と高出

力パルスの両方得ることを目指した。

2. 2Hz シングルバンチレーザー光源の開発

2.1 2Hz レーザーシステム

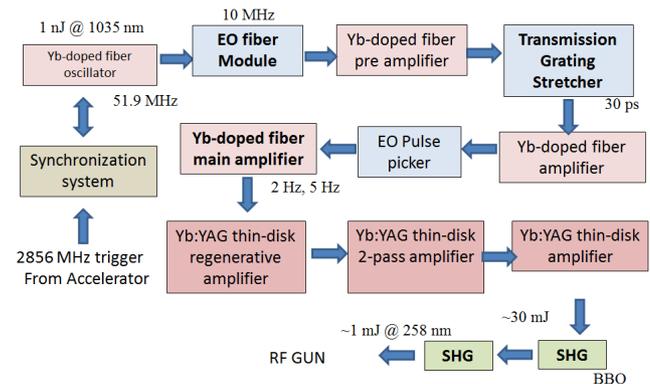


Figure 1: Layout of 2Hz laser system.

これまで Yb 系増幅媒質とする安定な 1 μm 帯超短パルスハイブリッド増幅器の開発を行ってきた。昨年、2Hz レーザー光源を開発し、1.2nC の電子ビームを得たが[3]、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、全体的にアップグレードを行った。

図 1 のよう、まず Yb ファイバー発振器から 51.9MHz のパルスを生じて、Linac の 2856MHz トリガーによって同期を行った。そして、ファイバー EO パルスピッカーによって、繰り返し周波数を 10.38MHz に変更した。一段階のファイバー増幅した後、時間幅 fs レベルのパルス透過型回折格子により ~30ps まで伸ばし、2 段階の Yb ファイバー増幅を行った。増幅した μJ レベルパルス電気光学効果 (EO) パルスピッカーにより 2Hz の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増幅をした。低繰り返し、高強度増幅するため

Yb:YAG thin-disk 結晶を用いて、再生増幅及び 2 段階のマルチパス増幅による多重アンプを行った。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。

2.2 ファイバー発振器の改善

前回、Yb ドップファイバー受動モード同期リング共振器を開発した。ファイバー発振器はレーザーパルスを生成し、加速器の一番基本的な部分である。そこで、安定性をアップするため、色々な対策を講じた。

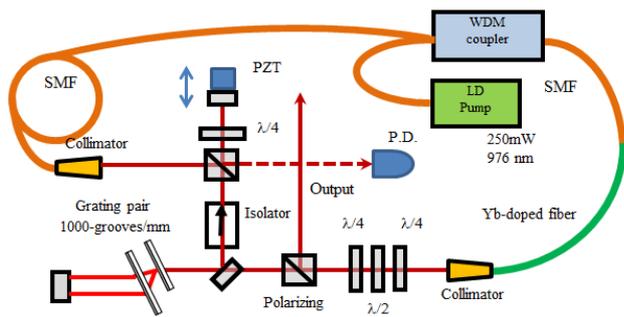


Figure 2: Layout of oscillator.

Super Invar 合金はある温度範囲での熱膨張が小さくなるものである。熱の影響を少ないように、Super Invar 基盤を使用する。そして、分散補償するところに回折効率が高い透過型回折格子を使った結果、モードロックが容易になった (図 2)。回折格子の後に PZT を付け、上下のずれに対して、もうひとつ往復回路に PZT を設置した。さらに、鉛ブロックを設置し、安定性を改善した。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中心波長は 1040nm、スペクトル幅 20nm、出力 30mW、パルスエネルギーが 0.6nJ を得た。発振器を数か月 24 時間連続運転ながし、同期精度は ps であった。

2.3 ファイバー増幅システムの改善

前回、ファイバー増幅した後にポッケルスセルパルスピッカーにより繰り返しを低くした 2Hz のパルスを得た。しかし、ポッケルスセルが光を偏光するため、電圧の立ち上がり時間がかかる (>20ns) ので、52MHz で低繰り返しに間引くと、選ぶパルス前後のパルス成分が残る。そして、前段に 52MHz 高繰り返しで増幅しても、パルスピッカーによって捨てられるので、増幅する前にパルスピッカーを入れる。ファイバーEO モジュールによって、1/5 のパルスを選び、10.38MHz まで間引く。

出力低下を補うため、750mW のポンプ LD を用いて、増幅した。そして、1740 本の透過型回折格子対を用い、パルスを 30ps まで伸ばした。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、利得スペクトル幅を約 10nm を保持することができた。

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。増幅したパルスはポッケルスセルパルスピッカーにより繰り返しを 2Hz に変更した。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。

2.4 Thin-disk 固体増幅の改造

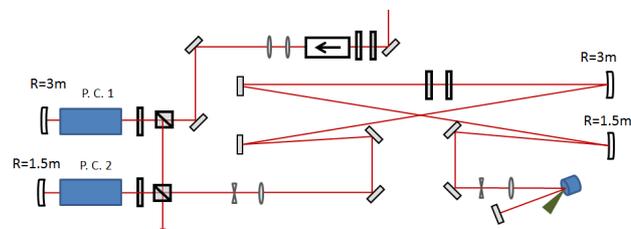


Figure 3: Thin-disk Yb:YAG再生増幅

Thin disk レーザーでは薄い結晶の増幅率を上げるため、再生増幅を行った。電子銃の間隔 100ns の double パルスを連続入射するためにポッケルスセルの反応を含めて一周の長さは 36m とした。図 3 のように、共振器長が 9m で、2 回往復して、1 周になる。共振器中にパルス光を閉じ込め、利得飽和直後に共振器から取り出す。2 台のポッケルスセルによって、パルスの出入をコントロールする。

LD ポンプ光は 4.8kW、片方に Yb:YAG thin disk 結晶に入射する。最初に、Yb:YAG は高反射コーティング (HR) が施されて、エンドミラーとして使ったが、多重反射が起こってしまった。この問題を解決するため、結晶に角度を付けて、繰り返し構造とした。その結果、シグナル光が 2 回通過し、十分な励起フルーエンスが得られた。この段階で、平均 1mJ の出力が得られた。

更に高エネルギーを取り出すため、2-pass の増幅を行った。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、十分な励起フルーエンスが得られた。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。そのあと、もう一段アンプによって、出力は 20 mJ まで上げた。

その後、SHG を行って、紫外パルスを生成した。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 258nm、1.5mJ のパルスを得た。変換効率は約 10% である。

2.5 RF 電子銃試験

生成した紫外レーザーパルスを RF 電子銃カソー

ドに 60° 斜入射した。結果として 2Hz、1.5mJ のレーザー出力に対して最大 5.6nC の電子ビームを観測した[4]。

3. 25Hz ダブルバンチレーザー光源の開発

3.1 25Hz レーザーシステム

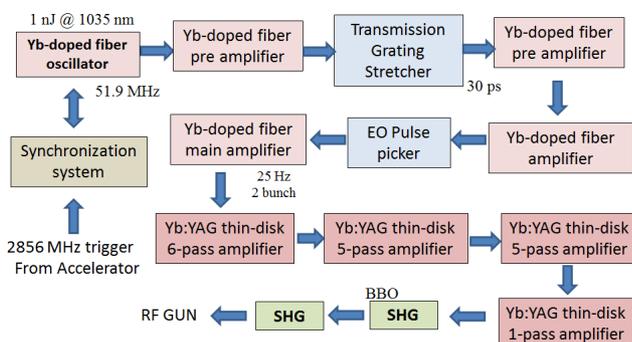


Figure 4: Layout of 25 Hz laser system.

熱レンズ効果とはレーザーを照射することにより媒質が局所的に温度上昇することで、平行ビームを集光する効果を持ち、ビーム品質の劣化の原因となる。Thin disk の場合、利得媒質の厚さが薄く、端面冷却により熱レンズ効果を抑制できる。しかし、繰り返し周波数が 25Hz に上がると、連続使用による熱蓄積が熱レンズ効果を引き起こし、レーザー光路に悪影響を与える。従って、ポンプ LD の繰り返し周波数を 25Hz にする場合は、レーザーシステムを改造する必要がある。

図 4 は 25Hz レーザーシステムである。まず 51.9MHz のパルスを Yb ファイバー発振器で生成し、同期した後透過型回折格子により ~ 20 ps まで伸ばし、2 段階の Yb ファイバー増幅を行った。増幅したパルスを 2 台ポッケルスセルパルスピッカーにより 25Hz ダブルパルスに変換した後、もう一段階のファイバー増幅を行った。4 段階の thin disk Yb:YAG マルチパス増幅による増幅を行った。最後に 2 段階の SHG により 258nm 紫外超短光源が得られた。

3.2 ファイバー増幅システムの改造

前段のファイバーEO モジュールには、30mW 以下のパルス強度しか対応しないので、デメリットが多くて、使わないことにした。その結果ファイバー段階増幅効率を改善された。前段 EO モジュールの代わりに、メインのパルスピッカーには 2 台ポッケルスセルを並べることにより、シグナルの繰り返し周波数及びバンチの個数を自由に換えられる。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。

3.3 disk 増幅システムの改造

再生増幅システムでは、光パルスが数十回繰り返

されるので、非常に長い共振器が必要である。装置的に複雑化し、メンテナンスがしにくい。ファイバー増幅段階の出力が上がったので、直接にマルチパス増幅することが可能になった。従って、再生増幅器をやめてし、4 段階のマルチパスアンプによって、増幅することにした。

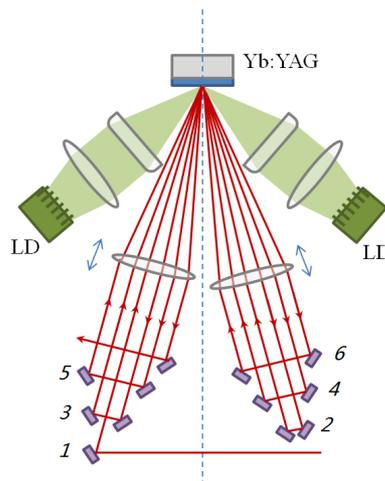


Figure 5: Multi-pass amplifier system.

熱レンズ効果を補償するため、マルチパス増幅でも共振器構造になる。図 5 のように、2 枚凸レンズによる共振器として安定条件を満たす。そこで、熱レンズ以外の集光光学系をマルチパス増幅器に加えて、熱レンズの補償を行う。さらに、増幅パス数を 2 倍に増やすことが可能である。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。

ポンプ光源の繰り返し周波数を 25Hz に固定し、熱レンズ効果も変更しない。そして、ポッケルスセルパルスピッカーによって、レーザー光源の繰り返しは 25Hz 以下、シングルとダブルバンチを自由に変更できる。

3.4 RF 電子銃試験

ダブルバンチのシグナルを作る場合、ポンプエネルギーが減るため、2 バンチ目の出力が弱くなった。この問題を解決するため、ポッケルスセルのタイミングの調整によって、1 バンチ目のシグナル強度を抑制する。

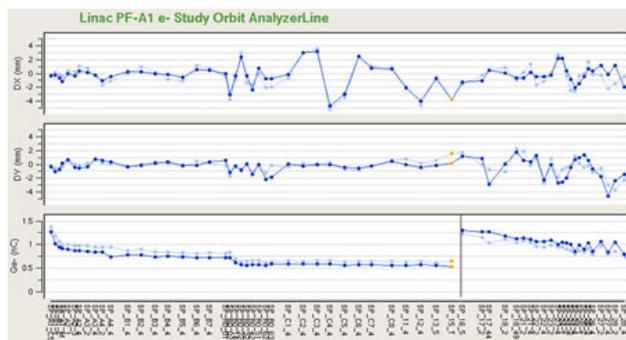


Figure 6: Linac study orbit.

図 6 のように、 $800\mu\text{J}$ の紫外ダブルレーザーパルスに対して、 1.3nC のダブル電子バンチを得た。上段 2 段がビーム軌道で下段が電荷量を示す。濃い色が 1 バンチ目、薄い色が 2 バンチ目である。

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行っている。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。2 段階の第 2 高調波発生を行い、変換された紫外光源を Ir_5Ce カソードに入射した。2Hz のシングルバンチのレーザー光源に対して、最大 5.6nC の電子ビームが得られた。

その後、SuperKEKB 入射要件の 25Hz、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た。ノイズを抑制するため、2 段のポッケルスセルにより、52MHz の光パルスを 25Hz、ダブルパルスに変換する。そして、thin-disk 再生増幅器をやめて、ファイバー増幅と thin-disk マルチパス増幅を用いて光パルス増幅を行った。さらに、繰り返し周波数の増加に伴う熱レンズ効果を避けるため、マルチパス増幅システムを改造した。増幅効率が上がるとともに、レーザーシステムの安定化と単純化も改善した。その結果、25Hz、 1.3nC のダブルバンチを得た。

参考文献

- [1] T. Natsui et al., MOPRI033, IPAC14, Dresden, Germany, 2014.
- [2] T. Miura et al., MOPRO001, IPAC14, Dresden, Germany, 2014.
- [3] X. Zhou, et al., SAP106, 第 10 回加速器学会、名古屋、2013.
- [4] X. Zhou, et al., WEPME061, IPAC14, Dresden, Germany, 2014.