

Yb hybrid laser system of DAW RF gun for SuperKEKB

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

Abstract

SuperKEKB is a planned upgrade to the KEKB accelerator with higher luminosity. Corresponding to the reduction of dynamic aperture and beam life, the photocathode DAW-type RF gun for high-current, low-emittance beams will be employed in the injector linac. The electron beams with a charge of 5 nC and a normalized emittance of 10 μm are expected to be generated in the RF gun by using the laser source at A-1 unit. Introducing the Ytterbium (Yb) hybrid laser system that includes Yb-doped fiber and Yb:YAG solid system, generates mJ pulses with a center wavelength of 258 nm and a pulse width of 30 ps. 1.0 nC beam generation from the RF gun was achieved.

SuperKEKB に向けた DAW 型 RF 電子銃用 Yb 系ハイブリッドレーザーシステム

1. 背景

SuperKEKB のアップグレードでは高ルミノシティを得るために電子銃の低エミッタンス化が求められている。電子陽電子入射器では極低エミッタンス電子ビーム生成を目的として、フォトカソード RF 電子銃を導入している^[1]。必要な電荷の 5nC とエミッタンスの 10 μm により、数十 ps 以上の長い初期バンチ長が必須であり、レーザーシステムも数十 ps のパルス長が必要である。

そして、フォトカソードの長期間運転に対応するため、十分な量子効率(Max QE: $\sim 10^{-4}$)と寿命を合わせ持つ Ir₅Ce カソードを選択した^[2]。5 $\times 10^{-5}$ の量子効率に対する安定なパルスエネルギー mJ レベルのレーザー光源が必要であることが判る。

将来的に SuperKEKB において長期の常時入射に対応するためには、非常に安定なレーザーが求められる。

後段の加速において時間方向にガウシアン分布にするより一様分布にしたほうはエネルギー分散が抑制される。従って、レーザーパルスの周波数領域の制御を可能にするため広帯域のレーザーが望ましい。

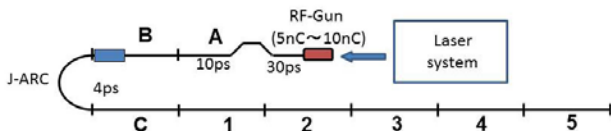


Figure 1: Schematic of SuperKEKB injector linac

昨年、Nd:YAG レーザーを 3-2 ユニットの設置し、DAW 型 RF 電子銃のテスト実験を行った^[3]。今年は Yb-doped レーザーシステムを開発し、A-1 ユニットの設置した (図 1)。より高いパルスエネルギー及び高安定度が望まれる。

2. レーザー光源の開発

2.1 Yb 系レーザーシステム

Table 1: Characteristic of Lasers

	Ti	Nd	Yb
Type	Solid	Solid	Fiber&Solid
Energy-extraction Efficiency	0.5%	3%	3%
Gain Spectrum	Broadband	Narrowband	Broadband
Cost	High	Low	Low
Maintenance	Often	Less	Less

高強度超短パルス紫外光源の生成には一般的にカーレンズモード同期 Ti:Sapphire レーザーが用いられている。Ti:Sapphire 結晶をポンプするため、もう一台レーザー光源が必要なので、低エネルギー変換率と頻繁メンテナンスのデメリットがあり、応用のため小型化、低コスト化の実現は困難といった問題がある。

一方、超短パルス Nd:YAG レーザーは半導体レーザーダイオード (LD) による直接励起なので、Ti:Sapphire の構造より簡単になり、電気光変換効率が良くなる。しかし、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。

近年、帯域が広く周波数領域で制御できるイッテルビウム (Ytterbium:Yb) 系レーザーが注目されている。Yb 系は 3 準位系で、上準位寿命が長く、エネルギー蓄積効果大きい。Nd 系に比べ、LD 直接励起しでも、励起状態吸収が生じない。吸収波長が 915nm・940・976nm であり、吸収帯域が広く、蛍光帯域が 1020-1120nm であり、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造りやすい。また吸収波長と増幅波長の差が少ないため、非

放射緩和過程によるエネルギーの損失が低い。さらに、熱エネルギーの放出が低いので、冷却装置が簡単という利点がある。(表1)

2.2 Yb系ハイブリッドシステム

光ファイバーに希土類元素を添加させることによって光増幅することができる。ファイバーレーザーは、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。さらに Yb ファイバーは添加濃度が高くすることができ、高効率で増幅できる。超短パルスレーザー発振器、増幅器の利得媒体として使われる。

ファイバーレーザーには高信頼性があり、発振器及び高繰り返し・高平均パワーの増幅において採用される。一方、ピーク強度が高すぎると増幅できないため、固体レーザー増幅を採用した。Thin-disk型結晶には排熱が容易で熱レンズ効果が低減できるので、mJレベルの増幅に適合している。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。

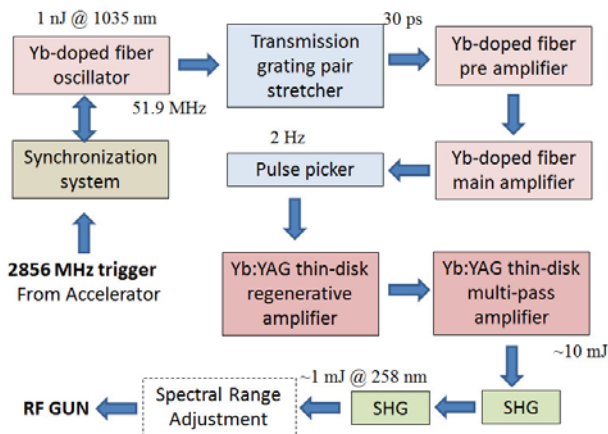


Figure 2: Layout of Laser system.

そこで Yb 系増幅媒質とする安定な $1\mu\text{m}$ 帯超短パルスハイブリッド増幅器の開発を行っている(図2)。まず、Yb ファイバー発振器から 51.9MHz のパルスを生成して、Linac の 2856MHz トリガーによって同期を行った。そして、時間幅 fs レベルのパルスを透過型回折格子により $\sim 30\text{ps}$ 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 μJ レベルパルスを電気光学効果 (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。mJ レベルまで増幅するため Yb:YAG thin-disk 増幅システムを行った。再生増幅及びマルチパス増幅による多重アンプを行い、2段階の第2高調波発生 (SHG) により mJ レベル 258nm 紫外超短光源が得られた。今後、紫外パルスの整形することを行う。

2.3 ファイバー発振器

我々は、超短パルス Yb ファイバー発振器を開発した^[4]。図3のように、980nm、300mW の LD ポン

プを用い、WDM(wavelength division multiplexed coupler)によって単方向のリング共振器を構成する。ファイバーの2次分散を補償するために、共振器内に回折格子対を用いている。波長板で非線形偏波回転によって受動モード同期(Passive mode locking)により、共振器長で決まる繰り返し周波数のフェムト秒パルス列が発生する。LD を含む全部の装置を幅 $30\text{cm} \times 60\text{cm}$ の基板に据えている。生成されたパルスの中心波長は 1040nm、スペクトル幅 20nm、出力 50mW に対して、パルスエネルギーが 1nJ である。ファイバーレーザーでは時間幅 200fs の超短パルスが得られた。

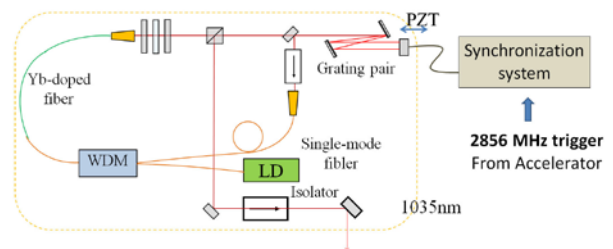


Figure 3: Layout of Oscillator.

発振器の後、戻り光を避けるためアイソレーターを挿入した。その後、シグナルパルス一部を波長板とポーラライザーにより同期システムに導入した。KEKB の 2856MHz に対して、発振器の繰り返し周波数を 51.9 MHz (10.38×5 MHz) にセットした。共振器内、平面ミラーをピエゾに接着し、同期するため共振器長を電氣的にコントロールする。発振器を 24 時間連続運転した結果、同期したシグナルのジッタが $\sim\text{ps}$ レベルであった。

2.4 透過型回折格子ストレッチャ

前回、ファイバー増幅器において、10m の長い Yb ドープファイバーにより増幅しながらファイバーの分散によりパルス時間幅を 20ps まで伸ばすことを試みていた。しかし、Yb ファイバーが短波長成分を吸収するため、通過した光の中心波長が 1060nm にシフトした。一方、後段の Yb:YAG 結晶では、1037nm 近辺でしか増幅できない。従って、波長シフトを防止するため、増幅用ファイバーをできるだけ短くし、透過型回折格子ストレッチャを挿入した。

図4によって、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。通過したパルスエネルギーの変換効率が約 80%であった。

2.5 ファイバー前段増幅

発振器からのパルスは同期システム及び回折格子に伴う出力低下を補うため、多段構成の増幅器を用いている。1段目の PM(偏波面保持) Yb ファイバーファイバーは、コア径 $10\mu\text{m}$ で、クワッド径 $125\mu\text{m}$ で、2m の長い Yb ドープファイバーにより増幅した。980nm、2.8W の LD 励起光をシグナルと

逆方向にファイバーに導入し、増幅した結果パルスパワーは 80mW であった。増幅媒質のファイバーが短いので、短波長側成分の吸収が少なく、利得スペクトルのピークが 1040nm 近辺になる。

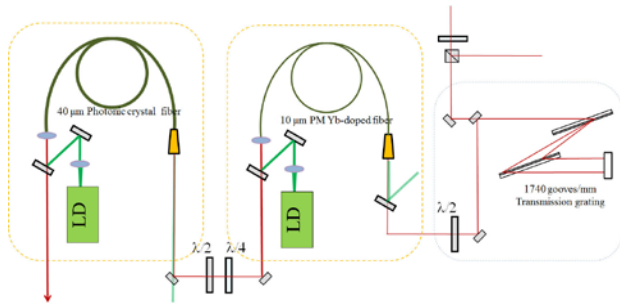


Figure 4: Layout of pre-amplifier.

さらなる高ピーク強度を得るために、もう一段階のファイバー増幅を行った。コア径 40μm 長さ 1.2m の大口径 Yb フォトニック結晶ファイバー (PCF) を用いて、増幅を行う。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。増幅したパルスパワーは 1.1W であった。

図 4 のように、2 段階のファイバー増幅構造はほぼ同じである。

2.6 Thin-disk 固体増幅

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。出力が μJ 以上になると、ファイバーレーザー増幅器では実現できないため、固体レーザー増幅を行った。

通常の固体レーザーでは、熱レンズ効果、排熱効率の問題から超短パルス発振が制限されていた。この問題を抑制するために thin disk レーザーを用いた。Thin disk レーザーでは利得媒質とヒートシンクとを接合させるが、利得媒質の厚さが薄いので、端面冷却により固体レーザーの問題であった熱レンズ効果を抑制できる。そのため高効率、高出力を達成するレーザーが実現可能である。

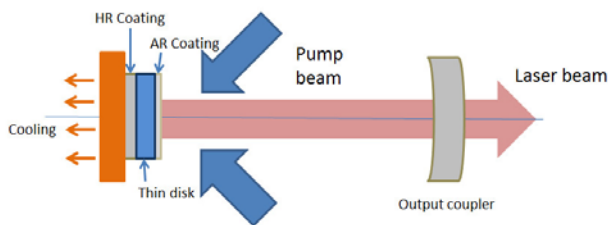


Figure 5: Thin-disk cavity.

図 5 のように、シグナル光が入射する面には無反射コーティング(AR)が施されており、ヒートシンクと接合する方の面に誘電体多層膜による高反射コーティング(HR)が施されている。一方、ポンプビームを両端から斜入射にする。

Yb:YAG 結晶は、励起波長とレーザー発振波長が近いので、励起と発振の光子エネルギーの変換効率

が高く、非常に効率良く発振できる可能性を持つておる。さらに、Nd 系結晶より発熱損失を低く抑えることができ、高出力レーザーには適した媒質である。

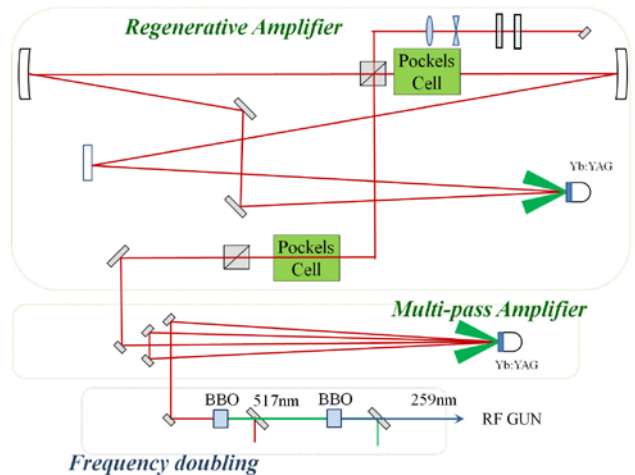


Figure 6: Thin-disk Yb:YAG 増幅

薄い結晶の増幅率を上げるため、光が結晶に繰り返し返される再生増幅を行った。再生増幅とは、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これを取り出す光パルス増幅法である。ファイバー増幅したパルス列を選択的に取り出すため、電気光学効果を用いた Pockels Cell を採用した。

更に高エネルギーを取り出すため、再生増幅したパルスマルチパルス増幅システムに導入した。図 6 のように、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る。

再生増幅では、2.4kW (1.4J) の LD ポンプ光を用いてシリンダリカルレンズで結晶に集光している。また、マルチパス増幅では、4 台の LD ポンプ、およそ 10kW のパワーで結晶を励起した。その結果 10mJ 以上の出力エネルギーが得られた。

その後、SHG を行って、紫外パルスを生成した。BBO 結晶を通して、2 段階シングルショット SHG 波長変換により、中心波長 258nm、1mJ のパルスを得た。変換効率は約 10% である。この出力を、RF 電子銃の励起光源として利用する。

2.7 RF 電子銃試験

生成した紫外レーザーパルスを RF 電子銃の Ir₃Ce カソードに 60° 斜入射した。結果として 1.2nC の電子ビームを観測した。

3. 今後の予定

5nC 電子ビームを生成するため、レーザービームの強度及びビーム品質の更なる改善が必要である。また、同期回路のジッタを fs レベルに下げることが重要である。

電子ビームシミュレーションの結果から、入射

レーザーを矩形パルスにすることで、エネルギー分散を抑制することが分かった。そこで、図 2 のようビーム光源を RF 電子銃に入射する前に、パルススペクトルを調整し、時間領域のコントロールを行い、波形整形することを実験する予定である。

4. まとめ

SuperKEKB の低エミッタンス化に対応して、低エミッタンス RF 電子銃用のレーザーとして中心波長 258nm、パルス長 30ps の Yb レーザー光源の開発を行っている。Yb ファイバー発振器により 51.9MHz、1037nm、fs のシグナル光を生成した。透過型回折格子及び二段階ファイバー増幅により 1W、ps の光ビームが得られた。レーザーパルスを実用ピッカーで 2Hz まで間引いて、Yb:YAG 固体レーザーアンプによって、10mJ までを増幅した。最後にパルス波長変換によって、1mJ 紫外パルスを生じ、RF 電子銃の励起光源として使用した。

参考文献

- [1] T.Higo et al., TUPPR005, IPAC12, Louisiana, USA, 2012.
- [2] T. Natsui et al., TUPPD057, IPAC12, Louisiana, USA, 2012.
- [3] M. Yoshida et al., TUPPD035, IPAC12, Louisiana, USA, 2012.
- [4] X.Zhou, et al., WEPPD056, IPAC12, Louisiana, USA, 2012.