

# FIBER LASER DEVELOPMENT OF DAW RF GUN FOR SUPERKEKB

Xiangyu Zhou <sup>#)</sup>, Mitsuhiro Yoshida, Yujiro Ogawa  
 High Energy Accelerator Research Organization  
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

For obtaining higher luminosity in the SuperKEKB, the photocathode DAW type rf electron gun for high-current, low-emittance will be employed. Corresponding to the property of 5nC, 10mm mrad by the RF guns, the laser source of center wavelength of 260nm and pulse width of 30ps are required. Fiber laser especially Ytterbium(Yb) fiber have attracted attention as practical alternatives to other solid-state lasers, offering high energy-extraction efficiency, high repetition rate, high output power, low-cost etc.. For corresponds the injection of SuperKEKB, a stable laser amplifier system is developed.

## SuperKEKB に向けた DAW 型 RF 電子銃用ファイバーレーザーの開発

### 1. 背景

SuperKEKB では非常に高いルミノシティを得るため、低エミッタンス化によるダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少はやむを得ない。これに対応して電子陽電子入射器も高電荷・低エミッタンスの電子源として、DAW 型の RF 電子銃の導入を計画している。

電子銃の要求性能としては、5nC、10mm・mrad、10ps であり、これを安定に運転可能な低電界で達成するには、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するために全幅で数十 ps 以上の長い初期パンチ長が必須である。

我々は、東京理科大 FEL 施設用に開発した DAW 型 RF 電子銃を元に最適化を行い、時間幅 60~80ps 程度の初期パンチ長を Alternative Phase Focus(APF) によるビーム収束を用いつつ伝搬し、速度変調及びシンケインを用いてパンチ圧縮を行う方法で 5nC、(σ)5 mm・mrad という計算結果を得ている。またフォトカソードとしては長期間の営業運転に対応するため、高融点・低仕事関数という特殊な性質を合わせ持つ LaB<sub>6</sub> カソードを第一候補として選択した。

これに合わせレーザーシステムも比較的長いパルス長が必要である。将来的に SuperKEKB において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。そこで Yb ファイバーを使ったファイバーレーザーの開発を行っている。Yb は上準位寿命が長い励起効率がよく、さらに帯域が広いので、周波数方向の制御により効率的にパンチ圧縮を行うための時間構造を変化させる事ができると期待できる。

### 2. RF 電子銃用レーザー

空間電荷効果により発生するエミッタンスはビーム軸方向の電場が z 軸上の位置と時間のみの関数であるという仮定のもと Kim<sup>[1]</sup>によって導かれている。 $\epsilon_{x,z}^{SC}$  は

$$\epsilon_{x,z}^{SC} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\alpha\kappa} \frac{1}{\sin\phi_0} \frac{I}{I_A} \mu_{x,z} (A) \quad (1)$$

と表される。ここで

$$\alpha = \frac{eE_0}{2mc^2\kappa} \quad (2)$$

$E_0$  は加速電場の最大値、 $I = \frac{Q}{T_{pulse}}$  はピーク電流、

$$I_A = 4\pi\epsilon_0 mc^3 / e = 17000 A \quad (3)$$

$\phi_0$  はレーザー入射時の RF 位相、 $\sigma_x \sigma_z$  は x 方向と z 方向のビームサイズである。

ビームの分布としてガウス型を仮定すると、

$$\epsilon_{x,z}^{SC} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\alpha\kappa} \frac{1}{\sin\phi_0} \frac{I}{I_A} \frac{\sigma_z}{3\sigma_x + 5\sigma_z} \quad (4)$$

と表される。

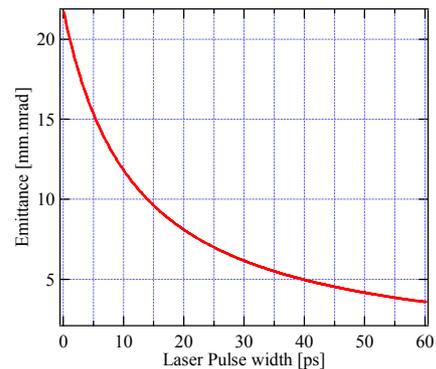


図 1 : エミッタンス曲線

図 1 はレーザーパルス幅によるエミッタンスの曲線である。ここで、 $E_0 = 90MV/m$ 、 $Q = 5nC$ 、 $\sigma_x = 2.5mm$  である。図 1 のように、電子銃の要求性能としては、10mm・mrad であり、これに合わせ

レーザーシステムも中心波長 260nm、パルス長約 30ps が必要である。

30ps と長いパルス長であるが、低いエミッタンスを得るには矩形のパルスが望ましく、さらに時間構造を制御できるレーザーの開発が望まれる。

そこで本研究では、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) ファイバー光源を用いて多重アンプを行う。そして、2 段階の第 2 高調波発生 (SHG) による 2 バンチ、50 Hz 繰り返し、258 nm 紫外超短光源の開発を行う。

### 3. Yb レーザー光源の開発

#### 3.1 Yb ファイバー

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、さらには高ビーム品質といった利点を備えておる。他の固体レーザーよりファイバーレーザーは 2 つの有利な特徴がある：(1) 高繰り返し周波数 (高平均出力パワー)、(2) 直接 LD ポンプ励起による高効率なエネルギーの抽出。Yb ファイバーはほかのファイバーに比べて添加濃度が高くすることができ、高効率で増幅できる。Yb ファイバーは 3 準位系で、吸収波長が 976nm で増幅波長が 1020-1120nm である。これより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。特に Yb ファイバーは広い利得スペクトルがあるので、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。

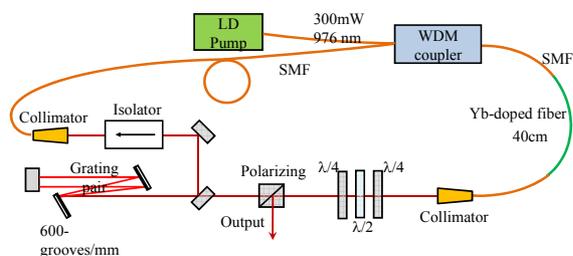


図 2：発振器

#### 3.2 ファイバー発振器

我々は、114MHz 超短パルス Yb ファイバーレーザーの開発を行っている。図 2 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<sup>[2]</sup>。Yb ドープファイバーの長さは約 40cm である。Yb から出ている光を collimator で平行光にし、自由空間に出ている。戻り光が LD に戻ってこないように Isolator で共振器内の進行方向を定めている。共振器内ファイバーの 2 次分散を補償するために、共振器内にグレーティング対を用いている。補償したパルスを collimator によって、fiber に入れる。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。



図 3：発振器装置

図 3 は Yb ファイバー発振器の実験装置である。LD を含む全部の装置を幅 30cm×60cm の基板に据えている。生成されたパルスの中心波長は 1040nm 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。

#### 3.3 ファイバー前段増幅

我々は Yb を増幅媒質とする安定な 1μm 帯超短パルス増幅器の開発を行う。パルスの間引きに伴う出力低下を補うため、多段構成の増幅器を用いる予定である。

発振器と増幅器の間にパルスピッカーまたは AO による繰り返し周波数 10.38MHz のパルスを作る。超短パルスの光を増幅するとビーム強度が大きくなり、光非線形効果による増幅媒質の破壊、自己位相変調などの現象が発生する。高エネルギーを得るため、ファイバー発振器から得る fs パルスを時間的に伸ばす必要がある。一般的にはストレッチャーによるパルス幅を ps までチャープさせる。ストレッチャーの欠点は光透過率が低いので、ストレッチャーの代わりに、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伸ばす。

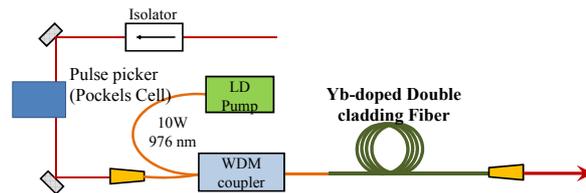


図 4：前段増幅器

図 4 のように、長さ 10m の PM(偏波面保持) Yb ファイバーを増幅媒質として使う。980nm、10W の LD 励起光を用い、増幅したパルスをパワー 1W、パルス幅 20ps を目指す。

#### 3.4 主増幅

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と固体レーザー増幅を行う予定である。コア径 25 ミクロン長さ 2.5m の大口径 Yb ファイバーを用いて、90W の LD ポンプで増幅を行う。大口径ファイバーの採用とパルス時間幅の増大により増幅出力で

20W 以上、パルスエネルギーとして 25 $\mu$ J を得ることを目指す<sup>[3]</sup>。

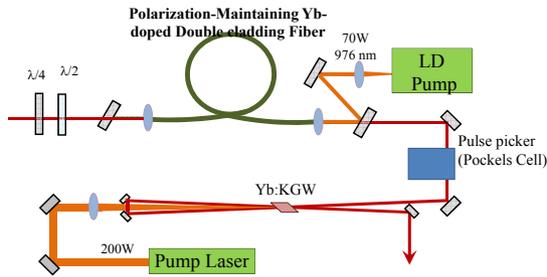


図 5 : メインアンプ

その後、パルスピッカーにより繰り返しを低くした 100Hz のパルスを得る。低繰り返しに対して、従来のファイバーレーザー増幅器では実現できないので固体レーザー増幅を行う予定である。パルスを Yb:KGW 結晶に往復通過し、2 回増幅を行う。Yb:KGW 結晶は大きなエネルギー蓄積量があり、LD 励起との高スロープ効率を実現できる。主増幅システムは図 5 に示す。200W のポンプ光源を用いて、3mJ のパルスを目指す。

### 3.5 波長変換

図 6 のように、最初の SHG 段階については、22.9 °カットで LBO 結晶を使用する予定である。凸レンズで集光することによって、シングルショット第二高調波変換を行い、中心波長 517nm、エネルギー 1.5mJ の SH パルスが得られる。50% の高変換効率を目指す。

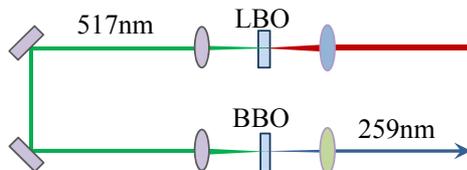


図 6 : SHG ステージ

次に、2 倍波パルスを BBO に通して、第 2 段階シングルショット SHG 波長変換により、0.5mJ のパルスが得られる。変換効率は 30% を目指す。この出力を、RF 電子銃の励起光源として利用する。

### 3.6 整形

入射レーザーを矩形パルスにする事で、エミッタンス増大を抑制することができる。従って、レーザー光源のパルス時間幅はガウス分布から矩形に整形することが望ましい。

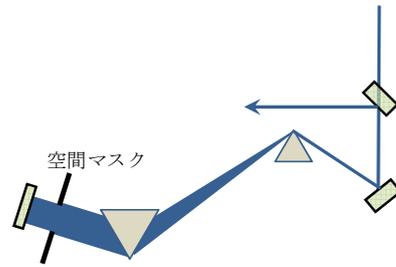


図 7 : 整形ステージ

プリズム対を用いてパルススペクトルを整形する事で時間領域の整形手法を考える。図 7 のように Brewster 入射のプリズムを使用することによって光の損失を最低限に抑えられる。プリズム対は相対する辺が平行となるように対抗させて配置する。プリズム対の後、空間的に広がったスペクトルを空間マスクの入れによって調節する。裾部分を切るため、整形することを行う。

## 4. まとめ

RF 電子銃の要求性能としては、5nC、10mm・mrad であり、これに合わせた中心波長 260nm、パルス長 30ps の Yb レーザー光源の開発を行っている。まず、Yb ファイバー発振器によって 200fs のシード光を生成した。そして、Yb ファイバーアンプおよび固体レーザーアンプによって、パルスを増幅する予定である。最後にパルスを波長変換と整形によって RF 電子銃の励起光源として利用する。

## 参考文献

- [1] Kwang-Je KIM, et al., "RF and Space-charge Effects in Laser-driven RF Electron Guns", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A275, 201-218, 1989
- [2] X. Zhou, et al., "Generation of 28-fs pulses from a mode-locked ytterbium fiber oscillator," Opt. Express 16, 7055-7059, 2008
- [3] X. Zhou, et al., "1 W Average-Power 100-MHz Repetition-Rate 259-nm Femtosecond Deep Ultraviolet Pulse Generation from Ytterbium Fiber Amplifier," Opt. Lett. 35, 1713-1715, 2010