

## t-ACTS 電子銃の光陰極化に向けたレーザーシステムの構築

### DEVELOPMENT OF A FIBER LASER SYSTEM FOR A PHOTO-INJECTOR OF t-ACTS FACILITY, TOHOKU UNIVERSITY

工藤滉大<sup>#</sup>, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 南部健一, 長澤育郎, 高橋健, 柴田晃太郎, 山田悠樹,

Anjali Kavar, 安彦颯人, 濱広幸

Kodai Kudo <sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi,

Kotaro Shibata, Hiroki Yamada, Anjali Kavar, Hayato Abiko, Hiroyuki Hama

Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (RARiS), Tohoku University

#### Abstract

The test accelerator t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source) at the Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (formerly Research Center for Electron Photon Science), Tohoku University has employed an ITC (independently tunable cells) RF electron gun with a CeB<sub>6</sub> thermionic cathode. We are planning to introduce a photocathode of CeB<sub>6</sub> or Cu cathode to increase the bunch-charge and synchronize with the round-trip frequency of an FEL optical resonator. Currently, t-ACTS supplies the bunch-charge of 5 pC, whereas the goal is to increase it more than 50 pC. Since the effect of back-bombardment is stronger with the bunch-charge, it turns to be difficult to operate the electron gun stably with higher bunch-charge as a result. The photo-injector is an attractive solution to avoid back-bombardment in the higher bunch-charge operation. By providing appropriate laser pulse duration and RF phase, the bunch charge will be increased without the back bombardment effect. The number of bunches per macro-pulse decreases in the photocathode operation because it is difficult to operate the driving laser at RF frequency (2856 MHz). However, since the intensity of coherent radiation is basically proportional to the square of the bunch-charge, an increase of the bunch-charge may be much effective. The laser system consists of a Yb fiber laser oscillator (wavelength is around 1047 nm), AOM (acousto-optic modulator), a multi-pass amplifier, and two set of BBO crystal which is used for forth harmonic generation (262 nm). The assembly of the oscillator has almost been completed, and work for synchronization with RF is on the way. In this paper, we will report on the progress of laser system development for the photocathode operation in t-ACTS.

#### 1. はじめに

東北大学先端量子ビーム科学研究センターでは、高輝度テラヘルツ光源の開発として、試験加速器 t-ACTS によるテラヘルツ領域におけるプリバンチド FEL の原理実証を計画している。プリバンチド FEL とは、放射波長程度に集群した電子ビームを用いる FEL である。これによりプリバンチド FEL では一般的な FEL よりも放射光と電子の相互作用が効率的になり、放射光強度の非線形増幅が期待される[1]。

t-ACTS は主に熱陰極 RF 電子銃と 3 m 加速管で構成され、速度圧縮により 100 fs 以下の極短バンチを生成することができるため、バンチ長については原理実証のための要件を十分に満たしている。しかし、原理実証においてバンチ電荷量については少なくとも 20 pC/bunch 程度が必要であると見積もられているのに対し、現在の t-ACTS の運転ではバンチ電荷量は 5 pC/bunch 程度までしか得られない。これは、t-ACTS では熱陰極 RF 電子銃を採用しているため、バンチ電荷量を現在より増加させようとするとバックボンバードメントの影響が無視できないためである。また、原理実証に用いる FEL 共振器は約 4 m を想定しており、放射光と電子の相互作用を効率的にするため、共振器内で光パルスが 1 往復したタイミングで次の電子ビームを供給したいので、t-ACTS が用いて

いる S バンドの RF 周波数(2856 MHz)では、光パルスが 1 往復する前に電子ビームが過剰に供給されてしまう。

我々はこれらの問題を t-ACTS 電子銃の光陰極化によって解決しようと考えている。光陰極であれば、レーザーの照射タイミングを RF の加速位相に限定することでバックボンバードメントを回避できる。また、照射レーザーの繰り返しを FEL 共振器長に対応させることで効率的な相互作用が実現できる。

したがって、プリバンチド FEL の原理実証において光陰極化は有効な手段であると考えている。現在は光陰極に照射するためのレーザーシステムを構築しており、本稿ではその進捗状況について報告する。

#### 2. レーザーシステム

##### 2.1 要求されるレーザーシステム

t-ACTS の光陰極化に向け、新たに Cu カソードの採用を検討している。金属カソードは半導体カソードに比べて真空環境の取り扱いがしやすく、寿命が長いという特徴がある。Cu の仕事関数は 4.6 eV、量子効率<sup>2</sup>は  $4 \times 10^{-5}$  である[2]。

Cu の仕事関数から照射レーザーは UV レーザーが必要となる。さらに、レーザーは RF と同期させなければならないので、レーザーの繰り返しは 39.67 MHz とした。この値は t-ACTS の RF 周波数(2856 MHz)の 72 分周であるため周波数発生が容易である。繰り返し周波数が

<sup>#</sup> kudo@raris.tohoku.ac.jp

39.67 MHz の場合の FEL 共振器長は 3.8 m になる。

目標バンチ電荷量を 50 pC/bunch とすると、UV レーザーの波長と Cu の量子効率から、要求される UV レーザーパワーは >6  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  である。50 pC/bunch は現在得られているバンチ電荷量 5 pC/bunch の 10 倍であり、空間電荷効果による影響が強く懸念されるため、General Particle Tracer(GPT)[3]による数値シミュレーションを行った。数値計算によって得られた縦方向の位相空間分布を Fig. 1 に示す。シミュレーション結果より、50 pC/bunch までバンチ電荷量を増加させたとしても 100 fs 以下の極短バンチを生成できると期待される。

Figure 2 にレーザーシステムを含む全体システムの概

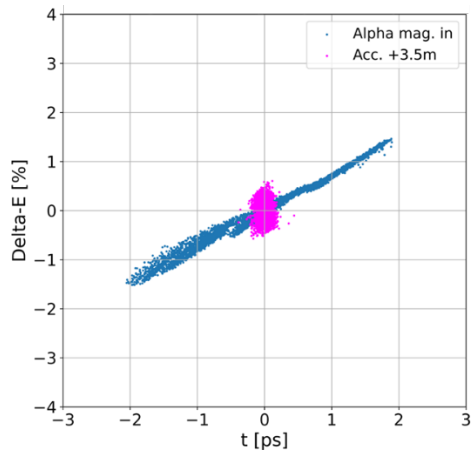


Figure 1: The longitudinal phase space distributions at the entrance of alpha magnet (blue) and the 0.5 m downstream of accelerating structure (pink) simulated by GPT with Spacecharge3D model. The pulse length and spot size of the drive laser are assumed to be 1 ps (Gaussian) and 3 mm (flat), respectively. Simulation results for a 50 pC bunch show that the bunch length of about 70 fs can be obtained with the velocity bunching scheme in t-ACTS.

略図を示す。既存の RF システムに加えて新たにレーザーシステムとそのレーザーとの同期システムを導入する。既存の RF システムは、マスターオシレーターからの 2856 MHz を、RF Switch で 4  $\mu\text{s}$  に切り出し、プリアンプと 50 MW のクライストロンで増幅してから電子銃の 2 つのセルと 3 m 加速管に RF を供給している。このマスターオシレーターからの信号を基準としてレーザーとの同期システムを構築する。レーザーシステムは Yb ファイバーレーザー発振器(発振波長 1047 nm)、音響光学変調器(AOM)、マルチパス増幅器、4 倍高調波発生系(262 nm)で構成され、同期システムを用いて RF システムと同期させる。この同期はマスターオシレーターの 4 分周信号と発振器の 18 次高調波信号である 714 MHz を用いて行う。

## 2.2 Yb ファイバーレーザー発振器

レーザー発振器として Yb ファイバーレーザー発振器を採用した。発振器の概略図を Fig. 3 に示す。中心波長はファイバーに添加されている希土類元素によって決まり、Yb では ~1035 nm である。その繰り返しは発振器の光路長で決まる。ファイバーレーザーは光路の大半がファイバーであるため、大気によるレーザーの揺らぎを最小限に抑えることができる。また、ファイバーでは広帯域な光増幅が可能であるため、短いパルス幅が期待できる。ただし、ファイバーの屈折率は波長依存性を持つため、波長によってファイバー内での光速が異なる。そのためこの発振器では回折格子対によって波長が異なる光の分散補償を行っている[4]。さらに、回折格子から反射する 0 次光はスペクトルや波形のモニターに使用することができるので、これを、RF との同期システムに使用する。

## 2.3 レーザーと RF の同期システム

レーザーと RF の同期システムの概略図を Fig. 4 に示す。同期システムでは 714 MHz の信号を用いる。マスターオシレーターからの信号(2856 MHz)を 4 分周した信号と、39.67 MHz で発振しているレーザー発振器の 18 次高調波をバンドパスフィルターで取り出した信号を、フェ

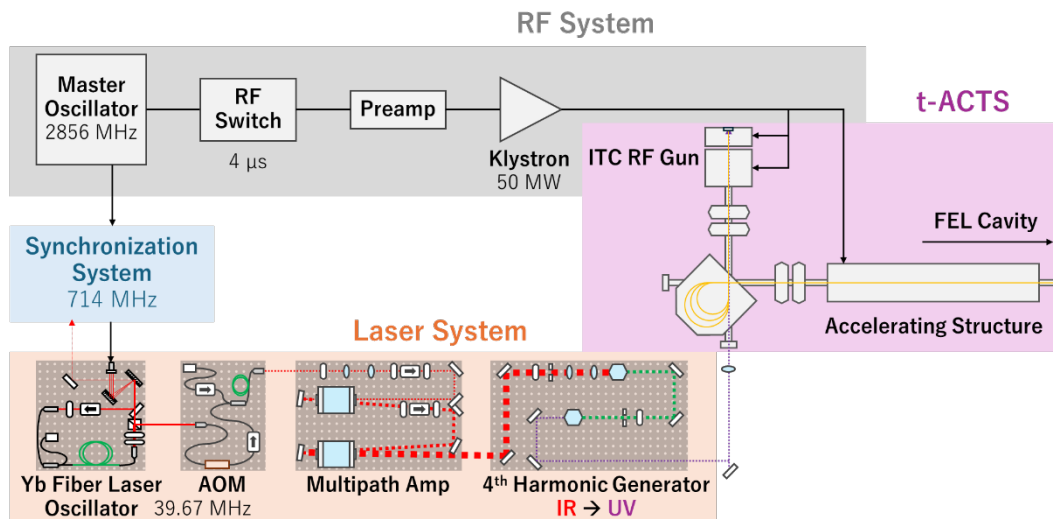


Figure 2: Schematic diagram of the entire system. AOM (Acousto-Optical Modulator) converts the laser light from CW (39.67 MHz) to pulse train (~2  $\mu\text{s}$ ). In the fourth harmonic generator, the second harmonic is generated twice to obtain the fourth harmonic (262 nm).

ーズディテクターにそれぞれ入力して位相差信号を検出する。その位相差信号は PID コントローラー、ピエゾドライバーを通して発振器内のミラーに付けられたピエゾ素子にフィードバックされることで同期をとることができる。同期精度は、プリバンチド FEL 実証実験のためには光パルスの重ね合わせから電子ビームのバンチ長である 100 fs 程度が必要であると考えられるため RF(2856 MHz)に対して 0.1 deg を目標とすることにした。

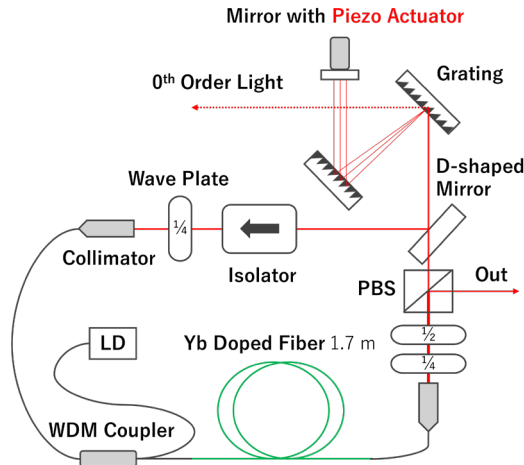


Figure 3: Schematic diagram of Yb fiber laser oscillator. LD (laser diode) that pumps the fiber and the oscillation light are connected by WDM (wavelength division multiplexing) Coupler. PBS (polarizing beam splitter) separates the s-polarized light. The movement range of piezo actuator is  $\sim 15 \mu\text{m}$ .

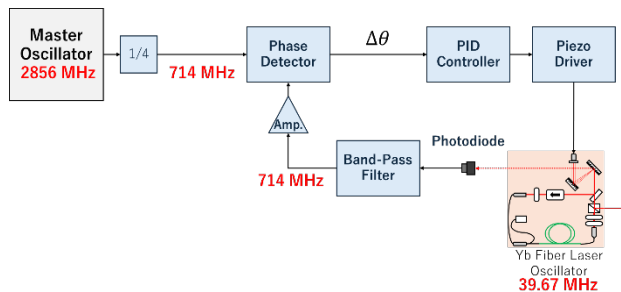


Figure 4: Schematic diagram of synchronization system.

### 3. レーザー開発状況

#### 3.1 Yb ファイバーレーザー発振器

発振器の組み立てには、モード同期 Yb ファイバーレーザーキット(FL-MLYb-kit、株式会社光響製)を用いた。発振器の繰り返しが 39.67 MHz になるよう光路長を調整した。回折格子からの 0 次光のスペクトルを Fig. 5 に示す。図に示す通りファイバーレーザーの特徴である広い波長幅で発振していることが確認された。

#### 3.2 同期システムの動作確認

同期システムを構成している各機器の動作確認を行った。機器の準備の都合上、まずはマスターオシレーターからの信号を 4 分周せずに直接 714 MHz で発振させ、

その信号とレーザー発振器の同期を図った測定結果を Fig. 6 に示す。

同期精度は位相差信号の RMS によって評価した。RMS は 1.57 deg であり、2856 MHz に対しては 6.28 deg である。同期システムの動作を確認することができたが、目標に対しては十分な同期精度は得られていないという結果になった。これは同期に用いている各モジュールの設定がまだ不十分であることからさらなる調整を行い、目標精度を目指していく。

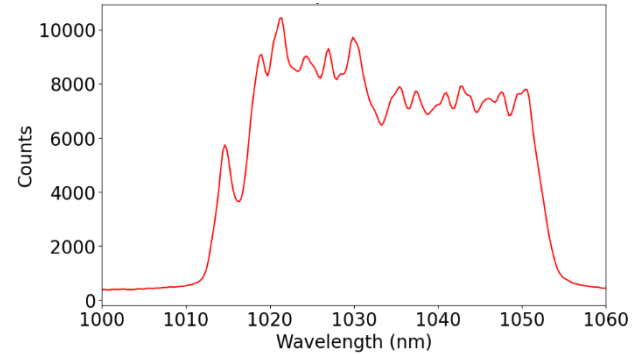


Figure 5: Spectrum of the 0th order light from the Yb fiber laser oscillator. The spectral width and center wavelength are 37 nm and 1033 nm, respectively.

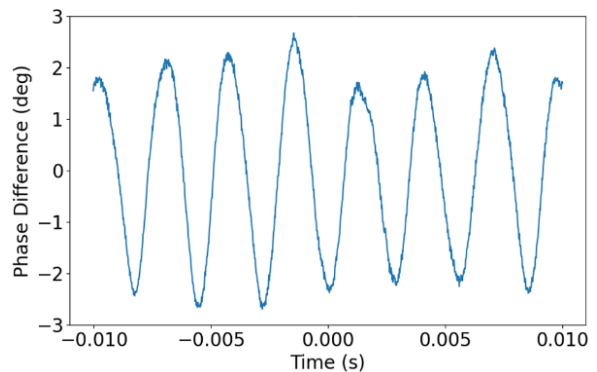


Figure 6: Phase difference signal from phase detector.

## 4. まとめと今後の予定

東北大学先端量子ビーム科学研究センターでは、プリバンチド FEL の原理実証に向け、t-ACTS 電子銃の光陰極化のためのレーザーシステムを構築している。今回は、レーザー発振器を組み立て、同期システムを構成する各機器の動作確認を行い、6.28 deg の同期精度が得られた。今後、各機器を調整して目標精度である 0.1 deg を目指す。また、マルチパス増幅器や 4 倍高調波発生用の光学素子などレーザーシステムに必要な機器は既に保有しているため、同期システムの精度向上に平行して発振器以下のレーザーシステムの組み立てを進めていき、レーザーシステムの完成とビーム生成を目指す。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費挑戦的研究(開拓)23K17306 の助成を受けたものです。

本研究において、早稲田大学の鷲尾方一教授と東京

**PASJ2024 WEOT06**

大学の坂上和之准教授にご協力をいただいたことを感謝いたします。

**参考文献**

[1] H. Hama *et al.*, “Intense coherent terahertz generation from accelerator-based sources”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, pp. S57-S61.

[2] D. H. Dowell, J. F. Schmerge, “Quantum efficiency and thermal emittance of metal photocathodes”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 074201 (2009).

[3] Pulsar Physics and the General Particle Tracer (GPT) code, <https://www.pulsar.nl/gpt/>

[4] Optipedia produced by 光響, <https://optipedia.info/>