

# 高周波電子銃中 LaB<sub>6</sub> 陰極からのマルチバンチ光電子ビーム発生とそれを用いた中赤外自由電子レーザー発振

## MULTI-BUNCH PHOTOELECTRON BEAM GENERATION FROM LaB<sub>6</sub> CATHODE IN AN RF GUN AND ITS UTILIZATION TO MIR-FEL OSCILLATION

全 炳俊<sup>#A)</sup>, 黒田 隆之助<sup>B)</sup>, 平 義隆<sup>B)</sup>, Sikharin Suphakul<sup>A)</sup>, 紀井 俊輝<sup>A)</sup>, 増田 開<sup>A)</sup>, 大垣 英明<sup>A)</sup>  
Heishun Zen<sup>#,A)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>B)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>B)</sup>, Suphakul Sikharin<sup>A)</sup>, Toshiteru Kii<sup>A)</sup>,  
Kai Masuda<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

<sup>B)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

### Abstract

Mid-infrared Free Electron Laser (FEL) called as KU-FEL has been developed in the Institute of Advanced Energy, Kyoto University to promote energy related sciences and researches. The FEL has been driven by an RF gun with a thermionic cathode made of LaB<sub>6</sub>. For increasing the peak power and widening the tunable range of the FEL, multi-bunch photoelectron beam has been generated from the LaB<sub>6</sub> cathode by irradiating multi-bunch UV laser beam. The dependence of bunch charge, peak energy and energy spread on the laser injection phase has been measured to determine operational condition of the RF gun under the photocathode operation. As the result of phase dependence measurement, the laser injection phase of 20-30 degree was selected. At the laser injection phase, we have succeeded in generating multi-bunch photoelectron beam with bunch charge of 150 pC, bunch repetition rate of 29.75 MHz and macro-pulse duration of 4 μs. This bunch charge is three times as high as that with thermionic operation of the LaB<sub>6</sub> cathode. The FEL lasing with the multi-bunch photoelectron beam has already been achieved. The micro-pulse energy of the FEL was about 6 times as high as that with thermionic operation. The performance of the FEL has been improved by photocathode operation of the RF gun.

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、エネルギー科学分野への応用を目指して、京都大学小型中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)の開発を進めており、熱陰極高周波電子銃(RF Gun)を用いて波長 5-22 μm において中赤外レーザーを発生する事に成功している<sup>[1]</sup>。2009 年度以降、研究所内外のユーザーに光の供給を開始し、色々なユーザー実験に利用されている。KU-FEL 装置の更なる高度化、即ちピークパワーの増強、発振波長域の拡大を目指して、光陰極 RF Gun の導入を 2006 年より開始している。2007 年に光陰極 RF Gun 用 1.6 セル高周波空洞の製作を完了した<sup>[2]</sup>。また、2010 年に光陰極励起用レーザーの開発を開始し<sup>[3]</sup>、2014 年に開発を完了した<sup>[4]</sup>。2013 年に計画変更により、上記の 1.6 セル RF Gun は小型 THz-FEL 駆動用の電子源として使用する事が決定され、KU-FEL の高度化は既存 RF Gun を光陰極運転する事で達成する事となった。

KU-FEL の熱陰極 RF Gun の熱陰極としてこれまで使用してきた LaB<sub>6</sub> 陰極は光陰極としても利用可能である事が知られている<sup>[5]</sup>。本研究では、この点に着目し、既存の RF Gun に設置された LaB<sub>6</sub> 陰極に外部から光陰極励起用 UV レーザを照射し、電子供給法を熱電子放出から光電子放出に変える事で、FEL の性能向上を目指した。これまでにマルチバン

チ光電子ビームの発生とそれを用いた中赤外 FEL 発振に成功しているのです、ここに報告する。

### 2. 実験装置

#### 2.1 高周波電子銃(RF Gun)

図 1 に RF Gun と LaB<sub>6</sub> 陰極の写真を、表 1 に主要パラメータを示す。この RF Gun は 4.5 空洞のサイドカップル定在波型の RF Gun であり、特徴として、空洞間のアイリスを小さくすることで、シャントインピーダンスを高め、加速効率を高めている。また、陰極が設置される第一空洞の電界強度が他の空洞の半分となる様に設計されている。これは熱陰極を加熱した際のガス放出により、第一空洞の真空が悪化し、放電しやすくなることを考慮に入れ、放電頻度を下げる為に採用された対策である。また、陰極温度の測定や光陰極励起用レーザー入射の為に、下斜め 70 度方向にサイドポートが 2 つ設置されている。本実験では、1 つを陰極温度測定に、1 つを光陰極励起用レーザー入射に用いた。光陰極励起用レーザー入射用真空窓には波長 266 nm にて最適化された反射防止膜のついた合成石英窓を使用した。陰極温度は放射温度計(IR-FAQHNL、Chino)を用いて測定した。

陰極は Applied Physics Technologies 社製、半径 1 mm の LaB<sub>6</sub> 単結晶(100 面)であり、図 1 右の写真の様に陰極マウントに設置された後、電子銃背面から RF Gun に装填される。この LaB<sub>6</sub> 陰極は直接電流を流すことで発生するジュール熱により加熱される

<sup>#</sup> zen@iae.kyoto-u.ac.jp

直熱型であり、約 2 A 程度の電流を流すことで熱電子放出可能な温度まで昇温する事が可能である。通常の熱陰極動作時の陰極表面温度は約 1600~1700 度程度であるが、光陰極動作時には一度、陰極温度を 1600 度に昇温した後、LaB<sub>6</sub> の表面温度を熱電子放出が殆ど生じない 1100 度に保った。

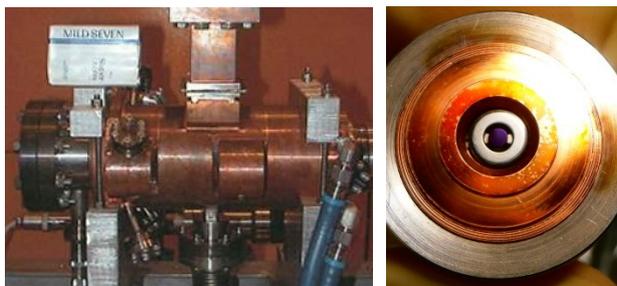


Figure 1: Photograph of the 4.5-cell RF Gun (Left) and Photograph of the LaB<sub>6</sub> cathode mounted on the cathode holder (Right). The purple disk on the center in the right figure is the LaB<sub>6</sub> cathode with the radius of 1 mm.

Table 1: Parameters of the UVSOR-III Storage Ring

Model	MG-500
Resonant Frequency	~2856 MHz
Coupling Coefficient $\beta$	2.8
Quality Factor of Cavity	12500
R/Q	980 $\Omega$
Structure	4.5-cell side couple
Accelerating Mode	$\pi$ mode
Cathode Material	LaB <sub>6</sub> (100 面)
Cathode Radius	1 mm

## 2.2 光陰極励起用レーザ

光陰極励起用レーザには昨年度まで開発してきたマルチバンチ UV レーザを用いた。システムの詳細は参考文献<sup>[4]</sup>を参照されたい。本実験では、更に UV ビームエキスパンダーを追加し、陰極上でのレーザービーム径を 1.4 mm-FWHM に調整した。開発した励起用レーザシステムには制限が有り、発生させるマイクロパルス数を増加させると、各マイクロパルス当たりのパルスエネルギーが低下する。これは光増幅器内の増幅に使用可能なエネルギーが限られている為である。本実験では、光陰極励起用レーザシステム中のレーザ発振器の繰り返し周波数(89.25 MHz)が FEL 発振用光共振器の周波数(29.75 MHz)の 3 倍と、高すぎる事から、レーザ発振器に内蔵の Acousto-optic modulator(AOM)を用いてレーザパルスを三分の一に間引き、FEL 発振器用光共振器の周波数と同一にした。これにより、マイクロパルスエネルギーを保ったまま、3 倍以上のマクロパルス長

(=FEL 増幅回数)のマルチバンチレーザを発生する事が可能となっている。

## 2.3 全体構成と各コンポーネント

KU-FEL の全体構成を図 2 に示す。加速管・アンジュレータ・FEL 光共振器・電磁石等はこれまでに用いてきた物と同一の物を使用した。加速管は有効長 2.9m の進行波加速管である。アンジュレータ・FEL 光共振器などの情報は参考文献<sup>[1]</sup>に詳細が記載されているので参照頂きたい。

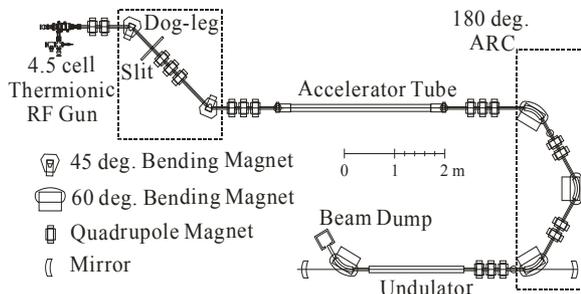


Figure 2: Schematic diagram of KU-FEL.

## 3. 実験結果

### 3.1 Phase Scan

まず、RF Gun へのレーザ入射位相を決定する為、レーザ入射位相を変えた際のバンチ電荷を RF Gun 直後のファラデーカップを用いて測定した。また、ピークエネルギー・エネルギー幅を図 2 の Dog-leg 部の偏向電磁石・スリット・ファラデーカップを用いて測定した。結果を図 3 に示す。

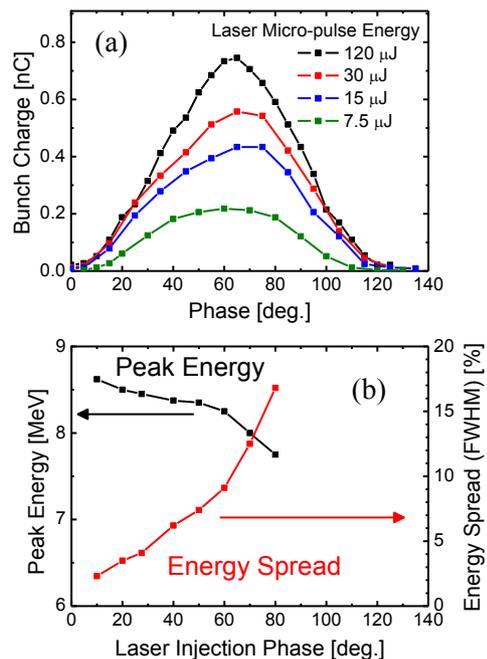


Figure 3: Result of phase scan. (a) Bunch charge dependence on the injection phase. (b) Peak energy and energy spread dependence on the injection phase in case of laser micro-pulse energy of 120  $\mu$ J.

得られた結果より、レーザ入射位相 60 度近辺で最大のバンチ電荷を得られる事が分かったが、この位相ではピークエネルギーが低下し、エネルギー幅が大きく広がる事が分かった。FEL 発振実験には、エネルギー幅の増大が顕著では無く、バンチ電荷もそれなりに得られるレーザ入射位相 20-30 度を実験条件として選ぶこととした。

また、図 3(a)の各データを光陰極励起用レーザのマイクロパルスエネルギーで規格化した結果を図 4 に示す。レーザ強度が上がるに従い、1 レーザ光子当たりの得られるバンチ電荷量が顕著に低下している事が見て取れる。これは、RF Gun の第 1 空洞の電界強度が低い為に、レーザ強度が高い場合に空間電荷効果が顕著に現れ、ビームサイズが大きく広がり、その結果、狭い空洞アイリスにより電子ビームの一部がカットされた為と考えられる。また、得られた最大の量子効率率は約  $1.3 \times 10^{-4}$  であった。陰極半径が 1 mm であり、レーザ径が入射角 70 度、1.4 mm-FWHM なので、陰極に全てのレーザ光が入射している訳では無い。実際の量子効率率は測定された値よりも 2 倍程度高いと考えられる。

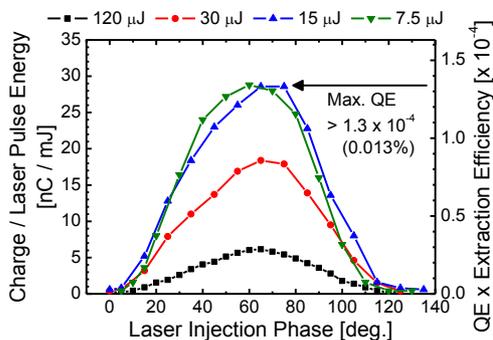


Figure 4: Dependence of normalized charge on the laser injection phase. Right axis is converted to the quantum efficiency multiplied by the extraction efficiency of the gun.

### 3.2 マルチバンチ光電子ビーム発生

レーザ入射位相を 25 度にした条件でマルチバンチ光電子ビームの発生を試みた。光陰極励起レーザの繰り返し周波数は 29.75 MHz、マクロパルス長は 4  $\mu$ s でマクロパルス当たりの光エネルギーは 3.5 mJ、マイクロパルス当たりの光エネルギーは約 26  $\mu$ J である。また、電子銃・加速管に投入する高周波電力とその振幅変調は適宜調整した。RF Gun 直後の CT およびアンジュレータ後の CT で測定した電子ビーム電流波形を図 5 に示す。この CT は熱陰極運転時の電子ビーム電流波形のエンベロープを測定する為に製作されており、時間応答が遅い。また、測定に用いたオシロスコープもアナログ帯域が 100 MHz と低く、サンプリング周波数も 500 MS/s と低い為、正確に電子ビーム電流波形を捉えられているとは言い難いが、RF Gun 直後(図 5(a))では 4  $\mu$ s の間、マクロパルス中でフラットな電流波形が得られた。アンジュレータ後の CT(図 5(b))でも約 4  $\mu$ s のマクロパルスが得られているが、バンチ電荷の均一性が低下してい

る。これは RF Gun 直後での電子ビームエネルギーが一定では無く、エネルギースリットの透過率が変化している為であると考えられる。アンジュレータ通過後の総電荷量をファラデーカップにより測定した所、約 18 nC であり、バンチ数が 119 (4  $\mu$ s  $\times$  29.75 MHz)で有ることから、バンチ当たりの電荷量は約 150 pC であると思われる。これは熱陰極運転時の 3 倍以上のバンチ電荷量である。共振器型 FEL の増幅率はピーク電流に比例する為、バンチ長が変化していないと仮定すると、FEL 増幅率が熱陰極運転時の三倍以上に増大していると考えられる。

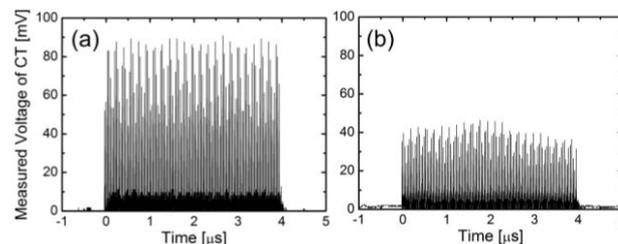


Figure 5: Measured voltage of current transformers at the exit of RF Gun (a) and at the final beam dump after the undulator (b).

### 3.3 マルチバンチ光電子ビームを用いた中赤外自由電子レーザ発振

発生させたマルチバンチ光電子ビームを用いて中赤外自由電子レーザを発振させた。電子銃直後の電子ビームエネルギーは約 8.6 MeV、加速管通過後の電子ビームエネルギーは約 23.8 MeV、アンジュレータギャップは 19.5 mm、FEL 波長は 11.7  $\mu$ m である。発振時の FEL ピークパワーの FEL 光共振器長に対する依存性を熱陰極運転時の依存性と共に図 6 に示す。また、最大ピークパワーが得られる FEL 光共振器長に設定した際の FEL 強度の時間発展を熱陰極運転時の波形と共に図 7 に示す。電磁石等の設定は熱陰極運転時とほぼ同一の設定で良い発振条件が得られたが、RF Gun 直後の 2 台の四重極電磁石を強くする必要があった。これはバンチ電荷が増大したことにより初期ビーム発散が強くなった為だと考えられる。

図 5 に見られる様に、熱陰極運転時には 30  $\mu$ m も共振器長をずらすとピークパワーが 1/10 程度に低下してしまうのに比べて、光陰極運転時には、約 2 倍の -60  $\mu$ m 程度までずらさないと 1/10 程度までピークパワーが低下しない。これは、熱陰極運転時に比べて光陰極運転時の FEL 増幅率が遙かに高い事を示している。

図 7 では、光陰極運転の場合、マクロパルス長 1.5  $\mu$ s 近辺で既に FEL パワーが立ち上がってきている事が見てとれる。一方、熱陰極運転の場合は FEL パワーの立ち上がりまでに 4  $\mu$ s 程度を要している。これも FEL 増幅率の違いに起因するものである。

光陰極運転時、熱陰極運転時のマクロパルス当たりの光エネルギーはそれぞれ 0.8 mJ と 13 mJ であり、それぞれ約 2  $\mu$ s のマクロパルス長を持つとすると、1 マイクロパルス当たりの光パワーはそれぞれ 13  $\mu$ J

と  $2 \mu\text{J}$  と推定される。以上の事をまとめると、光陰極運転により、マクロパルスエネルギーは約  $1/16$  に低下したが、マイクロパルス数が  $1/96$  に低下している為、マイクロパルスエネルギーを約  $6$  倍に増強できた事になる。

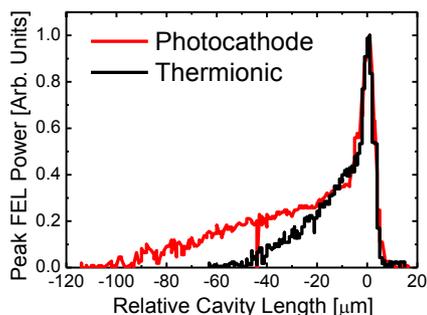


Figure 6: Normalized FEL peak power dependence on the relative change of the FEL cavity length.

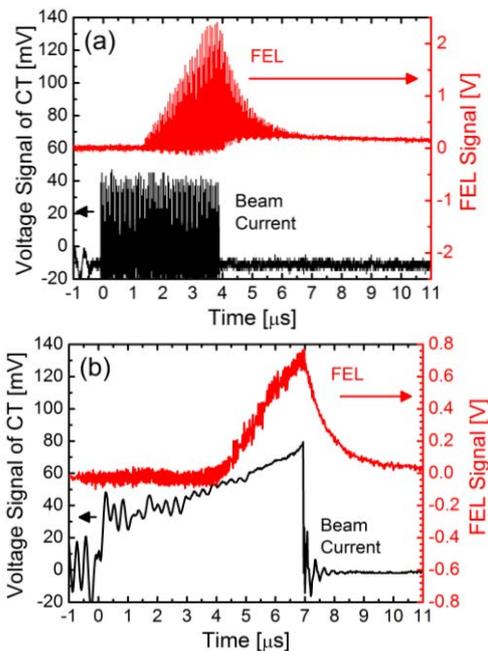


Figure 7: Temporal evolution of FEL pulse under the (a) photocathode and (b) thermionic cathode operation of the RF gun.

#### 4. まとめ

本研究では、これまで中赤外 FEL を発振させるために使用してきた熱陰極 RF Gun 中の  $\text{LaB}_6$  陰極にマルチバンチ UV レーザを照射し、光電子放出を起こさせる事で、マルチバンチ光電子ビームを発生させた。レーザ入射位相を変え、電子ビームのバンチ電荷・ピークエネルギー・エネルギー幅を測定し、電荷量は減少するが、エネルギー幅が狭い為、レーザ入射位相  $20\text{-}30$  度が FEL 駆動に利用可能である事を見出した。また、レーザ強度が大きい場合、空間電荷効果が顕著になり、RF Gun 中で電子ビームの一部が空洞壁に衝突し、失われている事が示唆された。

レーザ入射位相を  $25$  度に設定した条件下でマルチバンチ電子ビーム発生を行い、マクロパルス幅  $4 \mu\text{s}$ 、バンチ繰り返し周波数  $29.75 \text{ MHz}$ 、バンチ数  $119$  のマルチバンチ電子ビームの発生に成功した。この際、アンジュレータ通過後のバンチ電荷は  $150 \text{ pC}$  であり、これは熱陰極運転時の約  $3$  倍のバンチ電荷量である。

光陰極運転により発生させたマルチバンチ電子ビームを用いて FEL を発振させたところ、熱陰極運転時よりも広い光共振器デチューニング特性が得られると共に、FEL マクロパルスの立ち上がりも早くなった。これらのことから、FEL 増幅率が高くなっていることが示唆される。光陰極運転時のマイクロパルスエネルギーは熱陰極運転時の約  $6$  倍であり、光陰極運転の導入により KU-FEL のマイクロパルスエネルギーが大幅に向上したという事が出来る。

#### 5. 今後の予定

今後は光陰極運転時の FEL ミクロパルス長を測定し、ピークパワーを明らかにすると共に、FEL 光共振器や運転条件の最適化による更なる性能向上を目指す。また、光陰極運転時の発振可能波長域を調査し、より幅広いユーザー利用に向けて準備を進める。

#### 謝辞

本研究は平成 26 年度京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー共同利用/共同研究プログラム(A-22)および京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構センター共同研究の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] H. Zen et al., Proc of FEL2013, 2013, p.711-714.
- [2] <http://www.f.waseda.jp/washiom/rfgun/presentation/Kii2.pdf>
- [3] K. Shimahashi et al., Proc. of FEL2012, 2013, p.173-176.
- [4] H. Zen et al., Proc. of FEL2014, 2014, p.828-831
- [5] M. Aasakawa et al., Nucl. Instrum. Meth. **A331**, 1993, p.302-306.