

ELECTRON BEAM DIAGNOSTICS FOR FIRST LASING OF KU-FEL

Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, Takumi Shiiyama, Satoshi Sasaki, Toshiteru Kii, Kai Masuda
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

A mid-infrared free electron laser (MIR-FEL, wavelength : 4-13 μ m) device for the energy science named KU-FEL has been constructed in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The bunch length of the electron beam was measured using a streak camera to find the optimum operational condition for the highest peak current. Two operational conditions (7.5MeV and 9.0MeV) of RF gun were examined. As a result, the minimum measured bunch length was 2.0ps which was equal to the resolution of the measurement system. On the other hand, the bunching properties are evaluated with PARMELA to find the minimum bunch length. The simulation result indicated that the minimum bunch length was 0.6ps and maximum peak current was 23A. The result also indicated that the gun should be operate around 7.5MeV.

京都大学自由電子レーザ発振に向けた電子ビーム計測

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への応用を目指し、中赤外自由電子レーザ(初期目標波長 4~13 μ m)の開発を行っている[1]。装置の概観図を図1に示す。陰極材料として、半径3mmのバリウム含浸型タングステンを使用したS-band 4.5空洞熱陰極型高周波電子銃、3m進行波加速管を用いて電子ビームを40MeVまで加速することに成功している[2]。また、FEL増幅・発振に必要な高ピーク電流、長マクロパルスを得るためにはバンチ圧縮が不可欠であり、本装置には180度アークを用いたバンチ圧縮部が設けられている。

本研究では、加速管後でのバンチ長を計測すると共に、最適な電子銃運転条件、バンチ圧縮条件を求め、FELゲインが最大となるピーク電流最大の運転条件を見つけることを目的とする。

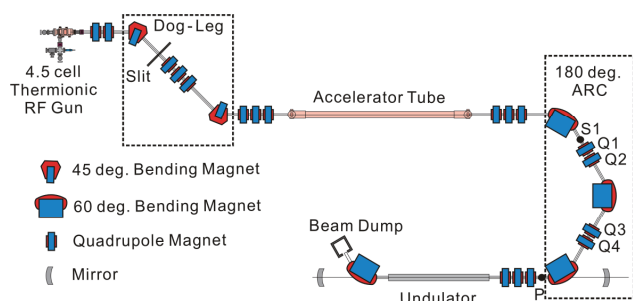


図1：京都大学エネルギー理工学研究所自由電子レーザ装置概観図

2. 実験装置・条件

2.1 バンチ長計測

図1の位置Pに遷移放射光発生用ミラーターゲットを挿入し、発生させた遷移放射光をストリークカメラ(C6138S、浜松ホトニクス)により計測した。伝送光学系には図2の様に

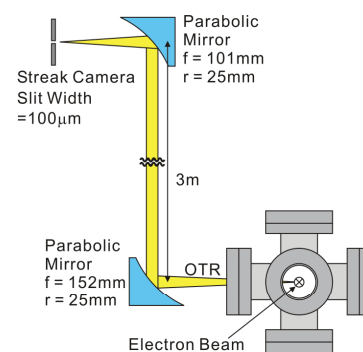


図2：バンチ長計測光学系概略図

一對の非軸放物面鏡を用い、光量を減らさずに波長分散による時間分解能の悪化を最小限にした。また、光量の制限から、ストリークカメラのスリット幅は約100 μ m以上に制限された。測定にはフルスケールで54psのレンジを用い、この際の時間分解能は約2psである。ストリークカメラ用トリガのダイアグラムを図3に示す。電子銃への入射高周波を分周した信号をトリガ信号とし、電子ビームとストリークカメラのトリガタイミングとを同期させている。

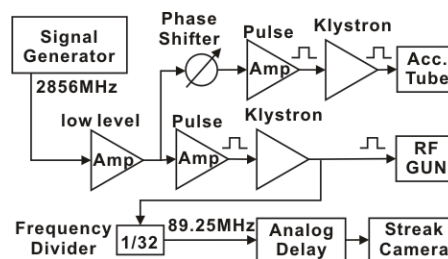


図3：トリガダイアグラム

一方、バンチ圧縮は図1の180度アーク部により行った。その際には、180度アーク部の特定の R_{56} に対する四重極電磁石Q1、Q2、Q3、Q4の磁場強度をアクロマティックになるようにElegantを用いて決定した。

2.2 実験条件の選定

電子軌道計算コードPARMELAにより、我々が用いている高周波電子銃から加速管までの電子軌道を計算し得られた加速管直前での縦方向位相平面図を図4に示す。また、図5にその縦方向エミッタンスと電流量のピークエネルギー依存性を示す。図4から分かるように、ピークエネルギーが大きくなると9.0MeVの結果の様に折れ曲がってしまい、結果として図5の様に縦方向エミッタンスが増大する。一方、スリットを通り抜ける電荷量はピークエネルギーが大きくなれば大きくなり、図5の様に加速管入り口において、多くの電流が得られる。高いピーク電流を得るためにはバンチ当たりの電荷量を多く、バンチ圧縮効率を高くする必要があるが、現在の我々の電子銃ではその両立は困難である。

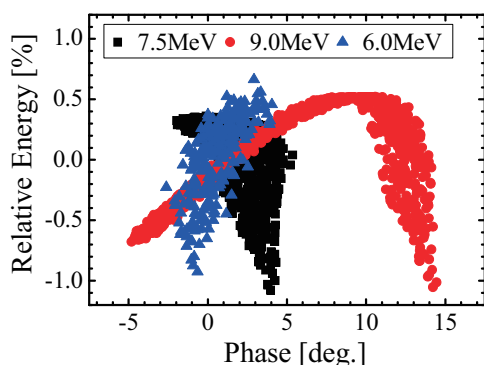


図4：電子銃直後の縦方向位相平面分布計算結果

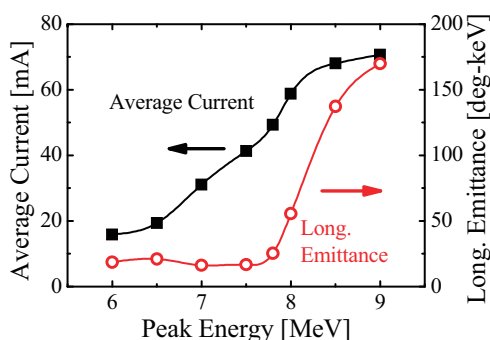


図5：加速管入り口での縦方向エミッタンス、平均電流のピークエネルギー依存性

そこで本研究では、縦方向エミッタンスが最小となるピークエネルギーが7.5MeVの条件と最大の平均電流が得られるピークエネルギーが9MeVの条件との2条件についてバンチ長計測・バンチ圧縮実験を行った。

実験では、電子銃直後での平均電流を320mA、入射高周波電力のパルス幅を3.8 μ sに固定し、電子銃へ入射する高周波電力を変化させピークエネルギーを調整した。加速管では加速後のエネルギーが26MeVになるように入射高周波電力を決定し、電子銃と加速管の位相差は電子ビーム位置モニタS1における水平方向ビームサイズが最も小さくなるように調整した。実験条件をまとめて表1に示す。

表1：実験条件

| Gun Exit | Peak Energy [MeV] | 7.5 | 9 |
|------------------------------|------------------------------|-----|-----|
| | Average Current [mA] | 320 | 320 |
| Macro-pulse Width [μ s] | 3.3 | 3.3 | |
| Acc. Exit | Central Energy [MeV] | 26 | 26 |
| | Average Current [mA] | 40 | 70 |
| | Macro-Pulse Width [μ s] | 2.4 | 2.4 |

3. 実験結果と考察

ストリークカメラのスリット幅が100 μ mと狭く光量が少ないため、同じ条件で10ショット計測し、その時間分布の平均を合わせ積算した結果からバンチ長を判断した。典型的な結果を図6に示す。

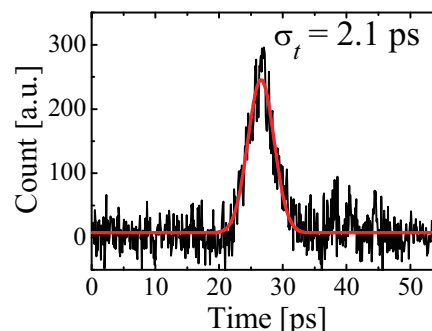


図6：10ショット積算時の時間プロファイル

バンチ長の180度アーク部 R_{56} 依存性の実測結果を図7に示す。条件(i)の場合、実測された最小のバンチ長は2.0psであり、その際の R_{56} は-0.3、-0.4であった。これはスリット幅により決まる分解能と同等であり、実際には更に短いと考えられる。一方、条件(ii)の場合は R_{56} =-0.3、0.0で最小値をとり、その際のバンチ長は2.3psであった。

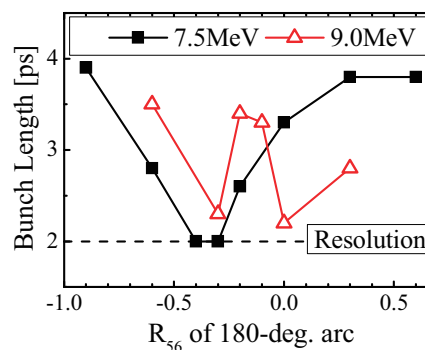


図7：バンチ長の180度アーク部 R_{56} 依存性

実測結果では、ストリークカメラの分解能と同等のバンチ長が得られており、それ以下のバンチ長を論議することができない。そこで、PARMELAを用いて実験条件における最短のバンチ長を求めた。図8にPARMELAにより得られた $R_{56} = -0.3$ の際の縦方向位相平面図を、その時間プロファイルを図9に示す。PARMELAでは、電子銃直後の電流量、エネルギーおよび、加速管後のエネルギーを実験条件と合わせ、加速管と電子銃の位相差はバンチ長が実験結果同様に $R_{56} = -0.3$ で最小となるように選んだ。

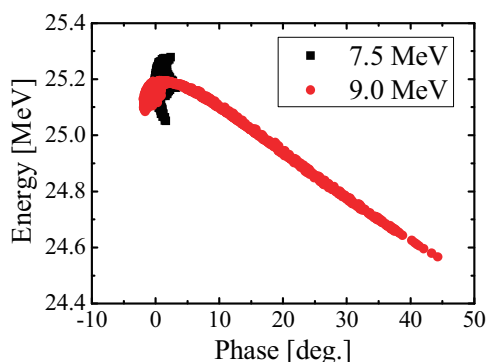


図8 : $R_{56} = -0.3$ での縦方向位相平面分布

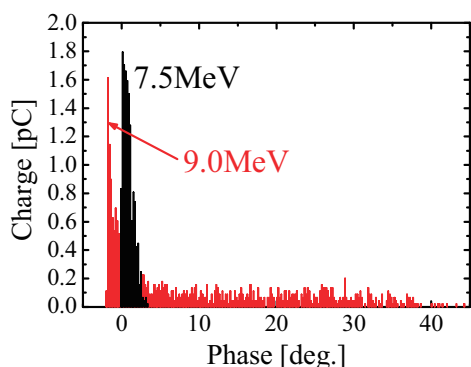


図9 : $R_{56} = -0.3$ での時間分布

9.0MeVの条件では、上手く圧縮されている電荷量は少なく、テイルを引いている。一方、7.5MeVの条件では、上手く全ての電荷が圧縮されている。図9の各分布をガウス分布で最小二乗近似して得られたバンチ長、電荷量、ピーク電流を表2に示す。表2によると、どちらの条件においてもバンチ長は0.6~0.8ps程度であり、ピーク電流は10A以上であるとの結果が得られた。また、7.5MeVの条件と9.0MeVの条件とでは、7.5MeVの条件の方が上手く圧縮される電荷量が多く、高いピーク電流が得られる事が示された。

表2 : 最終的な電荷量、バンチ長、ピーク電流

| Peak Energy @Gun [MeV] | 7.5 | 9 |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| Charge [pC] | 14 | 8.6 |
| Micro-pulse Width (calc.) [ps] | 2.0 (0.6) | 2.3 (0.8) |
| Peak Current (calc.) [A] | 7 (23) | 4 (11) |

5. 結論

京都大学中赤外自由電子レーザー装置において、バンチ長計測実験を行うと共に、最大ピーク電流が得られる条件の調査を行った。電子銃のピークエネルギー7.5MeVの場合と9.0MeVの場合とで実験を行い、計測された最小のバンチ長は7.5MeVの際に2.0psであり、その時の R_{56} は-0.3であった。また、9.0MeVの際には2.3psであり、その時の R_{56} は-0.3と0.0であった。これは計測系の分解能と同程度である。計算上最短のバンチ長を知るため、PARMELAによるシミュレーションを行ったところ、バンチ長は0.6psであり、ピーク電流23Aが得られる可能性がある事が示された。

ピーク電流23AではFEL飽和を得るには不十分であり[5]、今後は陰極材料の交換[6]や三極管構造の導入[7,8]といった電子銃部の改善により、ピーク電流を増大させ、FEL飽和を達成する予定である。また、さらにスリット幅を狭め、時間分解能を上げて測定する予定である。

参考文献

- [1] T. Yamazaki, et al., "KU-FEL: A compact and economical S-band linac based FEL for advanced energy science" in Proc. of 23rd Int'l FEL Conf., North-Holland, Amsterdam, 2002, II-13.
- [2] H. Ohgaki, et al., "Measurement of the beam quality on KU-FEL linac", *Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Res. A* **528**, 366-370 (2004).
- [3] B. McKee, et al., "Optimization of an electron gun" *Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Res. A* **304** (1991) 386.
- [4] K. Masuda, et al., "Transient beam loading effects due to back-streaming electrons onto a thermionic cathode in an RF gun" *Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Res. A* **483** (2002) 315.
- [5] M. Nakano, et al., "Development of the MIR-FEL Facility in Kyoto University - Measurement of the Undulator in KU-FEL", Proc. of the 28th International Free Electron Laser Conference, Aug.28-Sept.1, Berlin, German, 2006, p656-660.
- [6] F. Oda, et al., "赤外自由電子レーザー用熱陰極RF電子銃の性能評価", Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug.1-3, 2001, Tsukuba, Japan, p67-69.
- [7] K. Masuda, et al., "Design Study of RF Triode Structure for the KU-FEL Thermionic RF Gun", Proc. of the 28th International Free Electron Laser Conference, Aug.28-Sept.1, Berlin, German, 2006, p656-660.
- [8] T. Shiyama, et al., "三極管構造熱陰極型高周波電子銃の設計", in these proceedings.