

DEVELOPMENT OF MULTI-BUNCH LASER SYSTEM FOR PHOTOCATHODE RF GUN IN KU-FEL

Kyohei Shimahashi ^{#,A)}, Ryunosuke Kuroda^{B)}, Heishun Zen^{A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Kensuke Okumura^{A)},
Marie Shibata^{A)}, Hidekazu Imon^{A)}, Torgasin Konstantin^{A)}, Hani Negm^{A)}, Omer Mohamed^{A)},
Kyohei Yoshida^{A)}, Yong-Woon Choi^{A)}, Ryota Kinjo^{A)}, Kai Masuda^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

Abstract

We have been developing mid-infrared FEL (MIR-FEL) system, KU-FEL (Kyoto University-FEL), which utilizes a 4.5 cell S-band thermionic RF gun, in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. We plan to introduce a BNL-type 1.6-cell photocathode RF gun to generate higher peak power MIR-FEL. The purpose of this work is to develop the multi-bunch laser system which excites the photocathode in the RF gun. The target values of the system are bunch number of 300 and micro-pulse energy of 1 μJ in the wavelength of 266 nm. The laser system consists of a mode-locked Nd:YVO₄ laser as the oscillator, an acousto-optic modulator, a laser beam pointing stabilization system, a diode pumped Nd:YAG amplifier and 4th harmonic generation crystals.

KU-FEL におけるフォトカソード RF 電子銃入射用の マルチバンチレーザの開発

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て、中赤外自由電子レーザ (KU-FEL) の高性能化を目的とした研究開発を行っている。現在、S-band4.5 空洞熱陰極高周波電子銃、進行波型加速管を用いて、40 MeV までの電子ビームエネルギーを得ることができ、5 ~ 14.5 μm の波長域で発振することに成功している^[1]。

我々はさらに安定かつ高出力な FEL パワーを得るために、BNL 型 1.6 空洞フォトカソード RF 電子銃の導入を予定しており、計算結果では現施設より高性能な FEL が期待できる^[2]。電子銃の製作がすでに完了し^[3]、現在、入射用のマルチバンチレーザのシステム開発を行っている。開発にあたり、ビームアライメントシステムを導入し、赤外光でのマルチパスアンプシステムの構築を行ったので報告する。

2. マルチバンチレーザシステム

2.1 目標値

空間電荷制限領域に達していない場合、フォトカソードから引き出される電子の電荷量 Q は式(1)で与えられる。

$$Q = \frac{\eta e W \lambda_L}{hc} \quad (1)$$

ここで、 η は陰極物質の量子効率、 e は素電荷、 W

はレーザのパルスエネルギー、 λ_L はレーザの波長、 h はプランク定数である。量子効率や寿命を考慮すると現在最も有力な光陰極物質は Cs₂Te である。Cs₂Te のバンドギャップエネルギーは 3.2 eV であり、光電子を得るためには、紫外光による励起を必要とする。本研究では、上記の Cs₂Te の使用を想定し、その量子効率を文献より 1.5%^[4,5] と仮定する。発生させる電荷量を 1 nC としたとき、式(1)から導かれる紫外光レーザのパルスエネルギーは 0.31 μJ /マイクロパルスである。これより、光学損失などを考慮に入れて、カソードに入射する紫外光レーザのパルスエネルギーの目標値を 1 μJ /マイクロパルスとし、マクロパルス内のマイクロパルス数 300 以上、マクロパルスの繰返し周波数 1 ~ 10 Hz を目指す。紫外光レーザの発生には赤外光の Nd:YVO₄ レーザ (1064 nm) を使用するので、4 倍高調波 (266 nm) を発生させる必要があり、2 倍高調波を発生させる非線形光学結晶を 2 個用いることを予定している。BBO 結晶での 1064 nm から 266 nm への変換効率は 10% 程度^[6] と仮定すると、波長変換前の赤外光での目標値は 10 μJ /マイクロパルスとし、マルチパスアンプシステムの構築を行う。

2.2 システム構成

レーザの発振器として、Time-Bandwidth 社製の Nd:YVO₄ モードロック同期レーザ (GE-100-VAN) を用いている。仕様は発振波長 1064 nm、繰返し周

[#] kyohei@iae.kyoto-u.ac.jp

波数 89.25 MHz (時間間隔 11.2 ns)、平均出力 600 mW、パルス幅 7.5 ps (FWHM)である。繰返し周波数は KU-FEL の加速周波数である高周波信号 (2856 MHz) の 32 分周波を参照信号とし、モードロックレーザの共振器長を制御して、加速高周波と光陰極励起レーザの時間同期をとる設計となっている。レーザ発振器には AOM (acousto-optic modulator) 光変調素子が内蔵しており、任意の振幅変調を持ったマクロパルスの切り出しが可能である。しかし、AOM 光変調素子のドリフトにより、ビーム位置の揺らぎがあることがわかった。そこで、発振器直後にビームアライメントシステムを導入し、位置、角度とともに安定化を図った。次に、LD (laser diode) 励起アンプに 4 パスさせるシステムを構築した。アンプのモジュールは CEO 社製 REA5006-2P1 を使用し、 $\phi 5 \text{ mm} \times 12.6 \text{ cm}$ の Nd:YAG ロッドを含んでいる。以上におけるシステムの全体構成を図 1 に示す。また、図 1 (a) はレーザ発振器からビームアライメントシステムまで、図 1 (b) はアンプシステムの概略図を示している。

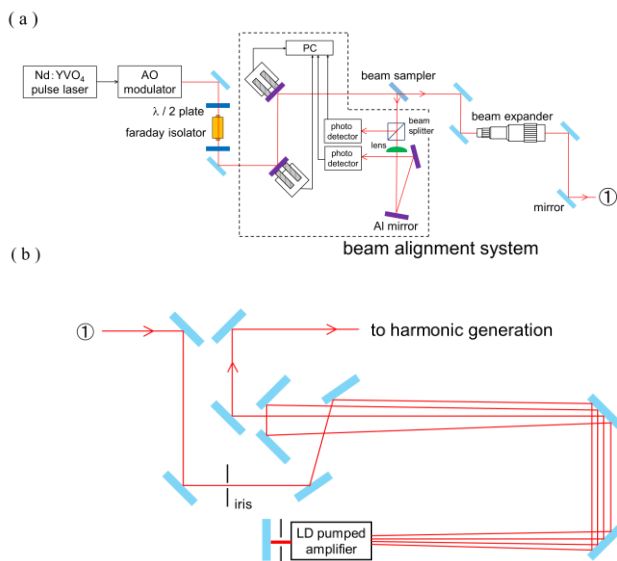


図 1 (a), (b) : マルチバンチレーザシステムの概略図。

3. ビームアライメントシステムの導入

レーザの発振器から波長変換部までの距離が約 8 m と距離が長いので、少しでもビームに角度がついていると大きな位置のずれが生じる。特に、波長変換結晶における入射位置がずれると、変換効率にも影響することが想定される。そこで、本システムの構成にあたり、発振器の直後にビームアライメントシステムの導入を行った。装置は TEM 社製の Aligna4D を用いている。Aligna4D は二つの自動ミラーマウント、検出部で構成されている。検出部の中には、二つの位置検知型検出器、ビームスプリッター、平凸レンズが入っている。これより、検出器の直前に入射されるビームの位

置、角度を知ることができ、それぞれが中心の位置に来るように自動ミラーマウントのレギュレータ (モータ、 piezo 素子) により調整を行い、ビームのアライメントを図る。

3.1 ビームの安定度測定

ビームアライメントシステムの位置検知型検出器を用いて、レギュレータ ON、OFF 時のビーム位置、角度の安定度を測定した。初めに、AOM 光変調素子の急激な温度上昇による不安定さをできるだけ無くすために、1 時間連続発振を行った。連続発振を保ちながら、レギュレータを OFF、ON、OFF という動作を約 20 分の間隔で行い、ビームの水平、垂直方向の角度、位置を測定した。なお、マクロパルス内のマイクロパルス数は 300、マクロパルスの繰返し周波数は 10 Hz、マクロパルスエネルギーは 6 nJ で行っている。測定結果を図 2, 3 に示す。それぞれの結果より、レギュレータを ON した時の 20 ~ 40 分間において、ビーム位置、角度の変動が小さく抑えられていることが確認できる。表 1 に、各測定における標準偏差を示す。角度については水平方向で 18%、垂直方向で 40%、位置については水平方向で 28%、垂直方向で 60% まで変動値を抑えることができた。また、長期のドリフトが大きく低減できていることも見てとれる。以上の結果から、波長変換部 (位置検知型検出器から約 7 m) での位置変動は水平方向で 38 μm 、垂直方向で 98 μm の範囲内に収めることができたといえる。

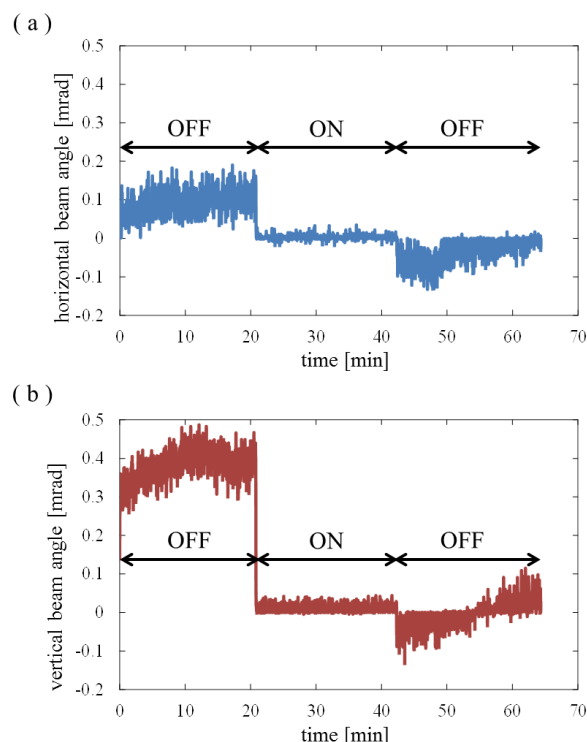


図 2 : レギュレータ ON、OFF 時でのビーム角度変動の比較 (a) 水平方向 (b) 垂直方向。

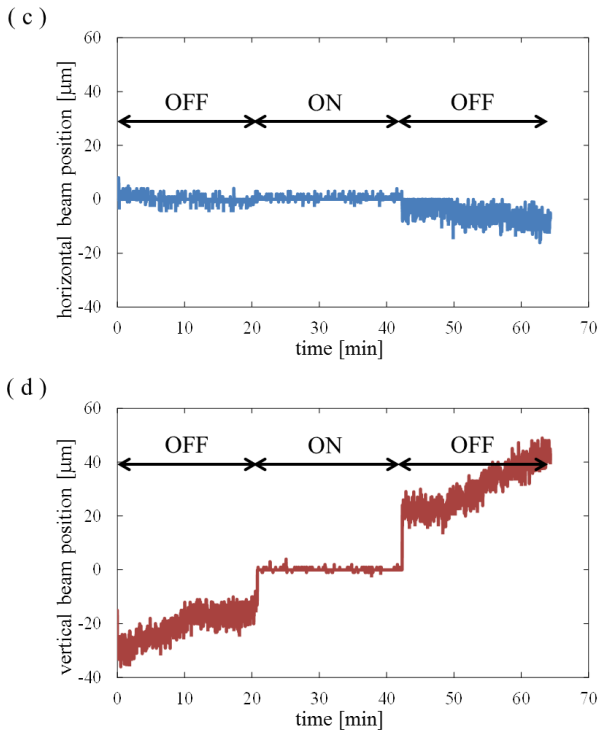


図 3：レギュレータ ON、OFF 時でのビーム角度変動の比較 (c) 水平方向 (d) 垂直方向。

表 1：変動値の標準偏差比較。

	OFF	ON
角度 (水平方向)	30 μrad	5.4 μrad
(垂直方向)	35 μrad	14 μrad
位置 (水平方向)	2.0 μm	0.56 μm
(垂直方向)	6.7 μm	0.40 μm

4. マルチパスアンプシステムの構築

図 1 (b)に示した通り、LD 励起アンプにレーザ光を 4 パスさせるシステムを構築した。アンプは約 250 μs 程度の時間幅で結晶を励起し、230 μs の時間タイミングで Seed パルス列を入射する。なお、マクロパルスの繰返し周波数は 10 Hz、マクロパルス内のマイクロパルス数は 300、AOM 光変調素子に入力する変調信号は振幅 4 V の矩形波である。以上の条件下のもとで、アンプに 4 パス通過させた位置でのレーザ光の信号を PD (photo diode) で測定した。アンプの電流値を増加させることで PD の信号強度が増大していくが、電流値 60 A を超えた時点でアンプ自身が発する光による自励発振が起きていることがわかった。オシロスコープで観測した PD 信号の波形を図 4 に示す。

ここで、図 1 (b)に示した通り、アイリスを設置して発散角の大きい自励光を遮ることにより、アンプ電流値 80 A までの自励発振を抑えることができた。このときの PD 信号の波形を図 5 に示す。また、アンプ電流値を変化させたときのパルスエネルギーを

図 6 に示す。今回測定に用いたエネルギーメータ (Ophir Optonics 社製 PE10BB) ではアンプ電流値 63 A までしか測定することができなかった。図 6 よりアンプ電流値を変化させることで、指数関数的にパルスエネルギーが増大していることが確認できる。しかし、パルスエネルギーの最大値は 360 μJ であるので、マクロパルス内のマイクロパルス数 300 より、マイクロパルスあたりのパルスエネルギーは 1.2 μJ と 2.1 節に示した目標値に達することができなかった。原因としては、アイリスによってレーザ光が遮られることにより、十分な入力光パワーが得られなかったと考えられる。以上より、チョッパーなどを用いて、自励発振を抑えることが必要であるとされる。

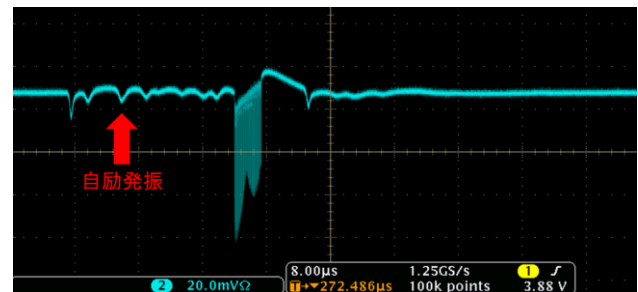


図 4：自励発振が起きている時の PD 信号の波形。

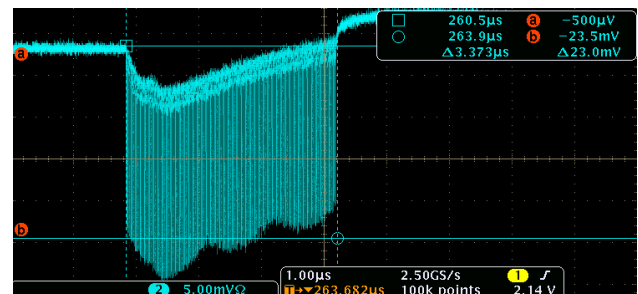


図 5：アンプ電流値 80 A での PD 信号の波形。

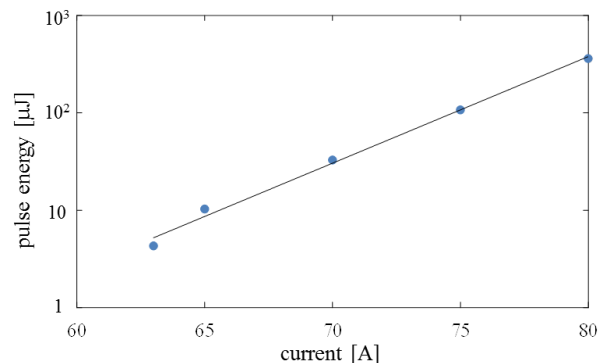


図 6：アンプ電流値とパルスエネルギーの関係。

5. まとめと今後の予定

フォトカソード RF 電子銃の導入に向け、入射用マルチバンチレーザの開発を行っている。開発にあたり、レーザ発振器直後にビームアライメントシス

テムを導入することで、最大 60%の AOM 光変調素子のドリフト変動を抑えることができた。また、マルチパスアンプシステムを構築し、1.2 μJ / ミクロパルスまで増幅させることができた。今後は目標値の達成に向けて、自励発振が起こらないシステムを構築しパルス強度を増大させるとともに、紫外光への波長変換を行う予定である。

謝辞

本研究は「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研究拠点 共同利用・共同研究プログラム A-25」の援助を受けた。

参考文献

- [1] H.Zen, et al., “Present status of Kyoto University MIR-FEL facility”, THPS006 in these proceedings.
- [2] H.Ohgaki, et al., “Numerical evaluation of oscillator FEL with multi-bunch photo-cathode RF-gun in Kyoto University”, Proceedings of FEL 2007, 390-393, (2007).
- [3] 紀井 俊輝 他, “京都大学・S バンド光陰極高周波電子銃の製作”, 第 5 回高周波電子銃研究会, (2007).
- [4] N.Terunuma, et al., “Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photocathode for the KEK-ATF”, Nucl. Instrum. Method A **613**, 1-8 (2009).
- [5] 山崎良雄, “小型高輝度硬 X 線源開発 - (1) マルチバンチフォトカソード RF ガン - ”, 第 27 回リニアック技術研究会, 7P-51, (2002).
- [6] M.Yoshida, et al., “Laser development of high charge and low emittance DAW RF gun for SuperKEKB”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2011).