

First Lasing of Mid Infrared Free Electron Laser in Kyoto University

Toshiteru Kii^{1,A),B)}, Heishun Zen^{A)}, Ryota Kinjo^{A)}, Keisuke Higashimura^{A)}, Kai Masuda^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A),B)},
Young Uk Jeong^{C)}

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

^{B)} Institute of Sustainability Science, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

^{C)} Korea Atomic Energy Research Institute
Dukjin-dong 150, Yusong-gu, Daejeon, 305-353, Republic of Korea

Abstract

We have constructed a Mid Infrared Free Electron Laser facility for advanced energy researches in Kyoto University. Beam commissioning has been completed by the end of Mar. 2008 and the first lasing at 12.4 μm has been achieved in Mar. 2008. In the first lasing experiment, due to the inadequate macro pulse duration of the electron beam, power saturation was not observed. To achieve power saturation, we have applied a new beam loading compensation method. As the results, the saturation of the FEL at 13.6 μm was successfully achieved.

KU-FELにおける中赤外FEL発振

1. はじめに

赤外領域の電磁波は分子固有の回転・振動エネルギー準位に対応し、波長選択性を利用した応用研究が期待されている。量子カスケードレーザーといった小型レーザーの開発も進みつつあるが、大強度波長可変赤外レーザーの発生には、自由電子レーザーが最も有望である。京都大学エネルギー理工学研究所では中～遠赤外領域波長可変レーザーによる先進エネルギー研究を推進するために、特に、大学の研究所レベルや産業界での利用を視野に入れた小型で経済的な自由電子レーザー施設(KU-FEL)の研究開発を進めてきた。[1]2007年にはKU-FEL施設が完成し、2008年3月よりFEL発振実験を進めてきた。[2, 3]

KU-FEL施設の概要を図1に示す。Sバンド4.5空洞熱陰極型高周波電子銃により生成される最高9MeVの

電子ビームを、スリットにより低エネルギー成分を遮断した後、3m加速管により最高エネルギー40MeVまで加速し、180度アーク部でバンチ圧縮した後に1.6mハルバツハアンジュレータ(K値:0.99、周期数:40)へ入射する。熱陰極高周波電子銃に固有の過渡的なビームローディングを補償するために電子銃・加速管へは、2本のクライストロンにより独立した電力・位相変調を与えた高周波電力供給を行っている。また、電子銃の共振周波数より数100kHz高い周波数の高周波電力を投入する新しいビームローディング補償法の導入により平均電流100mA以上、マクロパルス長さ最長5.5 μs の電子ビームが生成可能になっている。[4]

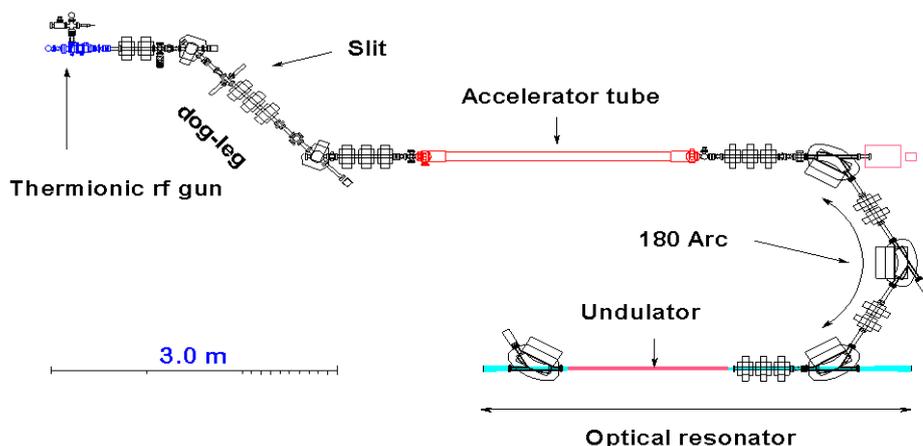


図1 KU-FELの概要

¹ E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

2. First Lasing

施設検査完了後から発振実験を開始し、2008年3月に波長 $12.4\mu\text{m}$ において初のFEL増幅を観測した。図2に示す光出力の時間発展計測結果から見積もられる発振時の増幅率は16%、共振器損失は2.8%、増幅に寄与した電子ビームマイクロパルス長は $1\mu\text{s}$ であった。このときの電子ビーム平均電流は90mA、マイクロバンチ長計測から見積もられるピーク電流は17Aであった。またFEL出力は自発放射光の50倍程度と低く、出力飽和には至らなかった。エネルギー分布計測の結果、図3に示すように熱陰極高周波電子銃に特有の非一様なビームローディングの影響により加速管出口で最大5%のエネルギー変動が生じ、有効マイクロパルス長が $1\mu\text{s}$ と短かったことが飽和に至らなかった主な原因と判明した。[3]これは、First lasing 実験の際には加速管用高周波電力に振幅・位相変調を導入できていなかったためである。

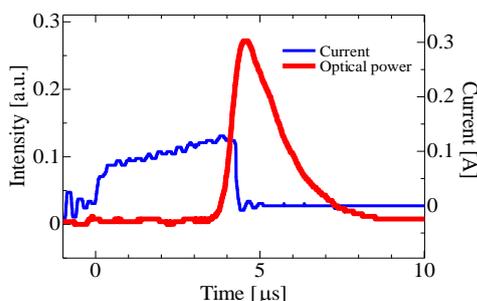


図2 First Lasing実験時のFEL光出力の時間発展
電子ビームパルスの終端部で光出力の増加が観測された。

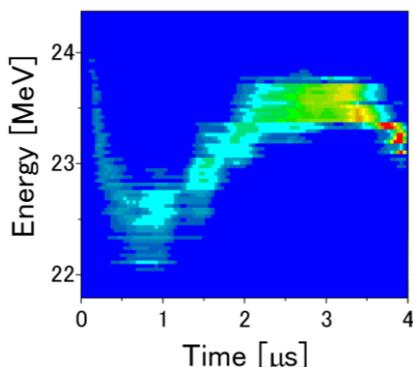


図3 First Lasing実験時の加速管出口におけるエネルギー分布

3. FEL飽和

3.1 ビームローディング補償

FEL飽和を達成するため2008年4月以降、高周波電力供給系・計測系の整備を行い、加速管への入射高周波電力へも振幅・位相変調を導入するとともに、新たに開発した周波数デチューニング法[4]による電子銃でのビームローディング補償を行った。更新後の電力供給系のダイアグラムを図4に示す。

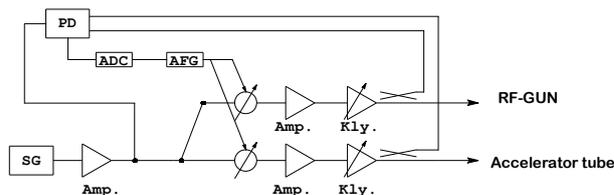


図4 改良後の電力供給系

これらの改良により加速管出口におけるエネルギー幅は6%から0.8%に減少し、電子ビームマイクロパルス長は $4\mu\text{s}$ から $5.5\mu\text{s}$ に増大し、電子ビーム平均電流も90mAから115mAに増大した。図5に加速管入射電制御によるビームローディング補償前後のエネルギー分布の時間発展を示す。

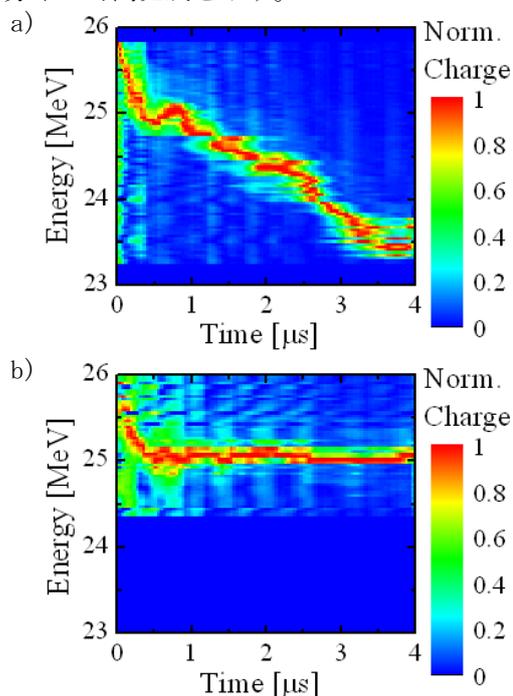


図5 加速管出口での電子ビームエネルギーの時間発展
a) 電力補正なし b) 電力補正あり

3.2 FEL光特性

これらの改良によりアンジュレータへ入射される1マイクロパルス当たりの電荷は450nCから630nCへと大幅に増加し、2008年5月には波長 $13.6\mu\text{m}$ においてFEL飽和を達成した。このときのスペクトル幅は0.6% (σ)であった。図6に発振時のFEL光出力および電子ビーム電流の時間発展を示す。また、図7に示すように光出力の時間発展よりゲインは22%、ロス11%と見積もられた。マイクロパルス後半(図中 $12.5\mu\text{s}$ 以降)においてはFEL飽和に伴うゲインの低下が観測されている。ただし、熱陰極高周波電子銃においてはマイクロパルス内で陰極温度が上昇し続け、ビーム電流が増加し続けるため、FEL飽和後も出力の増大が観測されている。このときのマイクロパルス当たりの光エネルギーは4.6mJであった。干渉法により求めた光パルス幅 σ_t は280fs、マイクロパルスピーク出力はおおよそ6MWであった。

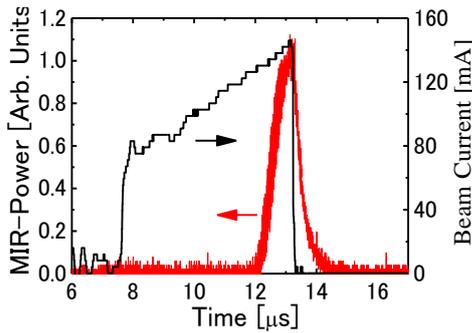


図6 アンジュレータ出口での電子ビーム電流波形と光出力の時間発展 (波長: 13.6μm)

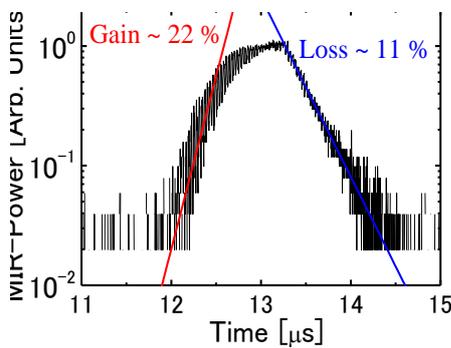


図7 FEL光出力の時間発展 (LOGスケール)

3.3 電子ビームマイクロパルス特性

FEL飽和時のピーク電流および電子ビームマイクロパルス長は、実験から得たFELゲインとGENESIS1.3を元に共振器の構造を正確に取り入れた計算に対応できるように改良した計算コード[2]によるFELゲインとの比較を行い決定した。

図7より飽和に到達する前の時刻12~12.5μsにおけるシングルパスFELゲインは、共振器損失およびアウトカップリングによる損失を考慮すると33%であったことがわかる。一方、GENESISによるゲイン計算は表1に示す条件で行った。

表1 計算で用いた電子ビームパラメータ

ビームエネルギー	24.7 MeV
エネルギー分散	0.43 % (rms)
ビーム半径(x方向)	0.6 mm
ビーム半径(y方向)	0.4 mm
規格化エミッタンス(x)	3.5π mm mrad
規格化エミッタンス(y)	3.5π mm mrad
Twiss parameter α_x	3.6
Twiss parameter α_y	0

計算により得られたFELゲインとピーク電流の関係を図8に示す。

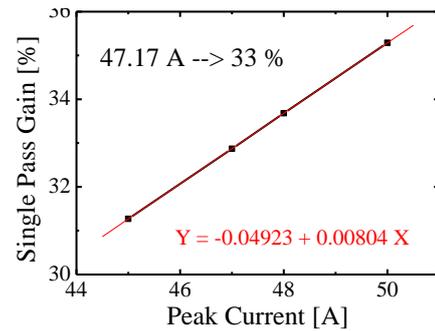


図8 ピーク電流とFELゲインの関係

図8より、FELゲイン33%を与えるピーク電流はおよそ47Aであることがわかる。また、時刻12~12.5μsでの平均電流は135mAであったため、電子ビームマイクロパルス長として1.0ps(σ)を得る。エネルギー・位相補償および新たに開発した周波数デチューニング法の併用によりFirst Lasing実験時と比較しおよそ3倍の高いピーク電流が達成されており、ビームローディング補償はFEL飽和に対しきわめて有効であったことが確認できた。

4. まとめ

京都大学エネルギー理工学研究所において小型中赤外自由電子レーザー施設が完成した。熱陰極高周波電子銃固有の時間的に非一様なビームローディングを高周波電力制御により補償することでFEL発振に必要なピーク電流およびマイクロパルス長を実現し、波長13.6μmにおいてFEL飽和を達成した。今後は発振波長領域の拡大を目指すとともに、先進エネルギー研究への応用を展開していく予定である。

謝辞

最後にKU-FEL建設当初よりご尽力いただいた山崎鉄夫京都大学名誉教授、吉川潔京都大学名誉教授をはじめ、Spring-8花木博文教授、元京都大学吉田絃二氏、日新電機(株)大下英二氏らの多くの方々のご協力に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 大垣英明、紀井俊輝、増田開、吉川潔、山崎鉄夫、"京都大学小型量子放射発生装置の現状"、加速器 Vol.5, No.1, pp.21-26(2008).
- [2] Satoshi Sasaki, et al., "Present Status of the KU-FEL in Kyoto University", Proc. of FEL2007, August 27-31, 2007, Novosibirsk, Russia, 394-397 (2008)
- [3] Hideaki OHGAKI, et al., "Lasing at 12 μm Mid Infrared Free Electron Laser in Kyoto University", Japanese Journal of Applied Physics, Accepted for publication, (2008)
- [4] Heishun Zen, et al., "Beam Loading Compensation in Thermionic RF Gun by Using RF Detuning", In these proceedings