

Optimization Design of Optical Cavity for Upgrading of KU-FEL

Satoshi Ueda^{#A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Keiichi Ishida^{A)}, Naoki Kimura^{A)}, Kyohei Yoshida^{A)}, Masato Takasaki^{A)}, Ryota Kinjo^{A)}, Choi Yong Woon^{A)}, Mahmoud.Bakr^{A)}, Taro Sonobe^{A)}, Kai Masuda^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}

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

Abstract

We have constructed an infrared (5~20 μm) FEL facility for advanced energy researches in Kyoto University. The system consists of an S-band linac which accelerates an electron beam up to 40 MeV, a Halbach type undulator, and an optical cavity. With this facility, A 13.2 μm saturated FEL has been successfully oscillated, however, the FEL gain has been disturbed by undulator capability and electron beam quality, and be not enough high to oscillate more short wavelength FEL. In order to obtain expanded wavelength range, we are preparing for replace of undulator for JAEA 1.8 m undulator. Because of the requirement of the replacement, it is needed that redesigning of the optical cavity. The numerical study of the FEL gain on the redesigned optical cavity, which was optimized for 12.3 μm FEL was carried out. In this conference, we will present the result of the mirror optimization, and the change of the FEL gain after upgrading of KU-FEL.

京都大学自由電子レーザー装置改修における光共振器の最適化設計

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所の中赤外自由電子レーザー装置 (KU-FEL) では、中赤外域レーザーのエネルギー科学等への応用等を目指し、発振レーザー波長域の拡大及びスペクトルの狭帯化を目的とした研究開発を行っている。

既存の1.6 mアンジュレータを元原子力研究機構の1.8 mアンジュレータに交換することで、発振されるFELのゲインの上昇とこれによる波長域の拡大が可能となる。この装置更新に際して、光共振器の再設計を行った。加速器運転周波数が2856 MHzであり、将来のフォトカソード高周波電子銃導入を考慮にいれ、共振器長を現在の4.516 mから5.042 mへと変更し、89.25 MHzの励起レーザーでのFEL増幅を目指す。

2. KU-FEL

2.1 現在の状況

KU-FELでは2856 MHz(S-band)で駆動する4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃を使用し、電子銃出口で、マイクロパルス長5.2 μsec 、最大エネルギー約11 MeVの電子ビームが生成される。加速管までのビーム輸送系はDOG-LEGと呼ばれる形をしており、45°の偏向電磁石2台とトリプレット型四重極電磁石が配置されている。

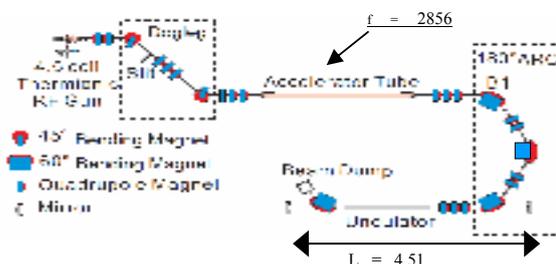


図1. KU-FELの概観図

加速管はS-bandで駆動し、有効長は2.9 mで、20 MWの高周波源により最大40 MeVまで加速可能である。加速された電子ビームは60°の偏向電磁石3台とダブレット型四重極電磁石を配置した180°アークによってバンチ圧縮され、マッチング用トリプレット型四重極電磁石を通過してアンジュレータへと入射される。

既設のHalbach型アンジュレータは全長1.6 m、周期数は40、最大K値は0.99である。また、光共振器の全長は4.52 mであり、ここに金コート銅ミラーが上流下流に1枚ずつ設置されている。それぞれの曲率半径は、3030 mm及び1872 mmであり、上流ミラーには直径2.00 mmのFEL取り出し用カップリングホールがあげられている。

現在までに12~13 μm でのFEL発振を確認している。[1], [2]

2.2 今後の改修計画

現在KU-FELでは、発振されるFELの波長域の拡大と、出力上昇を目的とした装置改修計画が進行し

ている。

アンジュレータ交換計画では、既存の1.6 mアンジュレータを元原子力研究機構の1.8 mアンジュレータへ交換することで、現在の2倍程度のFELゲインが見込まれている。^[1]導入予定のアンジュレータの仕様を以下に示す。^[4]

表1. アンジュレータ諸元

全長	1.8 m
周期数	52
周期長	33 mm
最小ギャップ長	15 mm
軸上最大磁場	0.5 T
最大K 値	1.54



図2. 1.8 mアンジュレータ

また、電子銃の交換計画では、現在の熱陰極型高周波電子銃からフォトカソード型電子銃に交換する事で、ピーク電流の増加やマクロパルス長の伸張、パルス構造の恣意的な操作が可能となることが期待されている。

3. アンジュレータ交換後のFEL発振シミュレーション

2.1 計算コード

計算コード GENESIS1.3を利用してFELゲインを計算した。ここで GENESIS1.3は、共振器型のFELには対応しておらず、1パスでの計算しかできなかったため、これを元に当研究グループで改良したものを利用した。その際、出力された数値を新たな入力値とすることでマルチパスのシミュレートを行っている。また、アンジュレータを出た光は共振器内の自由空間を伝播し、一對の共振器ミラーに反射して、再びアンジュレータに戻ってくる。この一連の計算を繰り返すことで、FELの増幅過程をシミュレートした。ミラーのアウトカップリングによる損失の計算において、回折損失と同様にホール内の電場をゼロにすると数値計算上の問題が生じる。一方で、損失の算出をホール上の光パワーを積分し、それとミラー上の全光パワーの割合から算出する透過型とすると、正確に取り出した光の特性を評価で

きないため、今後の調査に支障が生じる場合がある。このためここでは、強度分布に干渉縞が発生する問題はあがあるが、ホール径内の電場をゼロにし、ホール近傍を反射率として次式で表される緩やかな関数を用いて計算した。^[5]

$$R(r) = 2 \left(\frac{r}{R_a} \right)^4 - \left(\frac{r}{R_a} \right)^8$$

計算コードに取り入れたダクト構造を、図3に示す。また、ゲイン計算には、表2に示す実測値をベースにアンジュレータパラメータに最適化された電子ビームパラメータを用いた。

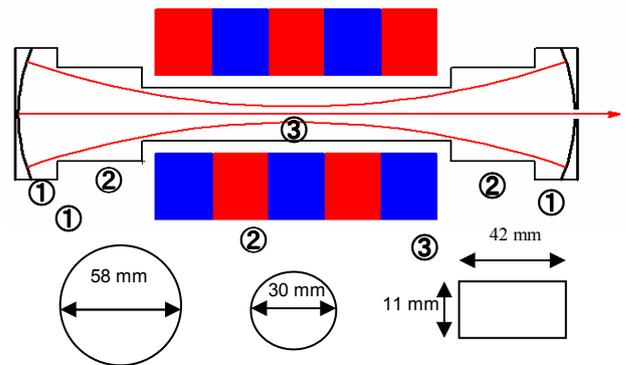


図3. 算に取り入れたダクトの形状

表2 電子ビームパラメータ

規格化エミッタンス(x)	3.5 π mm-mrad
規格化エミッタンス(y)	3.5 π mm-mrad
エネルギー幅	0.5 %
x方向ビーム半径	0.6 mm
y方向ビーム半径	0.4 mm
Twiss parameter α_x	3.6
Twiss parameter α_y	0

2.2 光共振器の設計

前節の計算コードを用いて、光共振器ミラーをアンジュレータ交換のために最適化する。将来的なフォトカソード高周波電子銃導入において、89.25 MHzの励起レーザーを利用するために、共振器全長は5.042 mとする。今回は、最適化を行うための発振可能波長域の調査及びその時のゲインの計算を行うための共振器であるため、比較のために計算は現在のKU-FELで発振が確認されている波長12 μ m付近で行った。ここで設計した際のミラーのgパラメータは0.86とした。計算を行う共振器の仕様を以下(表3)に示す。

図3. 共振器パラメータ

共振器全長	5.04 m
上流ミラー曲率半径	3.45 m
下流ミラー曲率半径	1.74 m
カップリングホール径	2.00 mm

カップリングホールから共振器外へ出る光は増幅に寄与しないため、FELのゲインは損失部分でレイリー長に大きく依存する。レイリー長は光の波長に反比例して変化するため、短波長ではアウトカップリングによる損失が大きくなり、長波長では回折損失が増大する。上記の共振器ミラーは、KU-FELの短波長側の目標値である5 μm 付近でのFEL発振が可能となるように、12.3 μm にてレイリー長が0.410 m、ビームウェスト位置が上流ミラーから3.403 mとなるように設計したものである。

2.3 FELゲイン計算

図4に以上の条件によるFEL出力計算の結果を示し、図5にそのときの1パスでのゲインを示す。ここで、アンジュレータパラメータ K は最大の1.54で固定とし、電子ビームのエネルギーを変化させることでFEL発振波長を変化させるものとする。それぞれの場合の発振波長を表4にまとめた。図中のpresent statusは、既設のアンジュレータに25 MeVの電子ビームを入射し、 K 値を0.99として12.1 μm のFELを発振した場合の出力変化を表している。

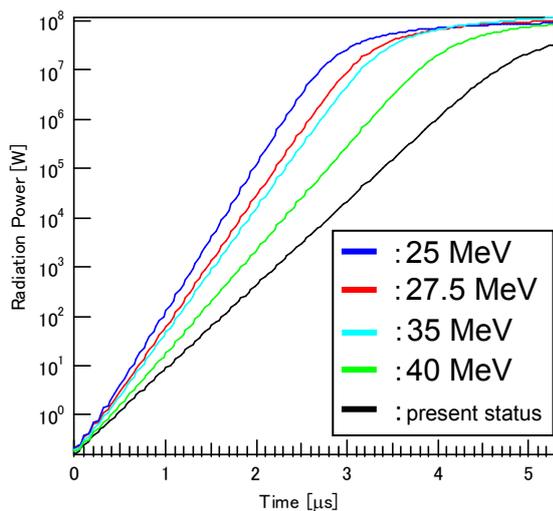


図4. FEL出力の時間発展

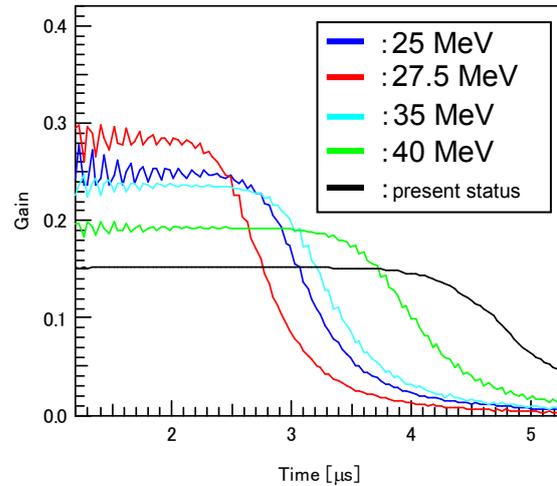


図5. FELゲインの時間発展

表4. ビームエネルギーと発振波長

電子ビームエネルギー	発振波長
25 MeV	14.47 mm
27.5 MeV	12.28 mm
35 MeV	7.47 mm
40 MeV	5.74 mm

これらの結果から、アンジュレータの交換によってFELゲインは上昇し、6~14 μm にて飽和FELの発振が期待される。

2.4 可変波長域の評価

電子ビームエネルギーが一定の状況下で、アンジュレータのギャップ長変化による発振波長の可変性について調査した。電子ビームエネルギーが27.5 MeVであるとき、アンジュレータ K 値を変化させた場合のFEL出力を図6に示す。また、このときの発振波長は表5にまとめた。

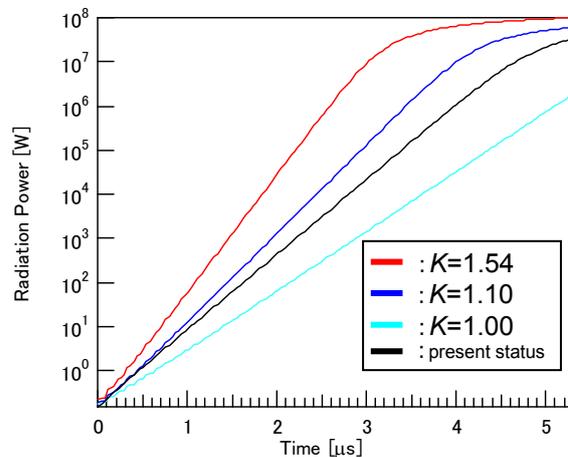


図6. 発振可能波長域

表5. K 値と発振波長

K 値	発振波長
1.54	12.28 mm
1.10	9.00 mm
1.00	8.43 mm

計算に利用した場合、40 MeVの電子ビームを利用した状態で K 値を下げるとゲイン不足からFEL発振にいたらなかったため、前節で示した以上の波長域拡大は見込めなかった。しかし、図6に示した結果から、一定の範囲内でFEL発振中の連続的な波長変更が可能であると言える。

5. まとめ

改良した計算コードGENESIS1.3による、光共振器の構造を取り入れたFELのゲイン計算により、アンジュレータを既設のものから1.8 mのものへ変更した場合、短波長側に特に有利に発振波長域を拡大できることが確かめられた。

今後、現実的に最適化された共振器を設計するために、今回は考慮しなかったミラーのミスアライメントの影響を組み込む必要がある。また、発振波長とビームウェスト位置・径の関係をモデル化し、レイリー長の変化をより詳細に追跡することで、今回の計算で判明した発振可能波長域内において必要十分なゲインを確保した共振器の設計が求められる。これと同時に、slippageを考慮した時間依存のシミュレーションを実施し、detuningを取り入れた設計も必要となる。

参考文献

- [1] H. Ohgaki et al., Jap. Jour. of Appli.Phys., Vol.47, No.10, pp.8091-8094(2008)
- [2] T. Kii, et al., Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, (2010)
- [3] Mahmoud A. Bakr, et al., International and commemorative symposium in establishing the Applied Laser Technology, 2010.2.17
- [4] R. Nagai, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 358 (1995) 403-406
- [5] B. Fattz et al., J. Phys. D.: Appl. Phys. 26(1993)1023.