

Numerical study on the undulator of KU-FEL

Toshio Fukui, Yoko Nakai, Heishun Zen, Kohichi Kusakame, Toshiteru Kii, Kai Masuda,
Hideaki Ohgaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Abstract

We have constructed KU-FEL system for 4~13 μm FEL oscillation for bio/chemical energy researches which consists of a thermionic RF gun and a 3-meter accelerating tube at the Institute of Advanced Energy, Kyoto University. A 30 MeV electron beam has been successfully accelerated and studies on the beam characterization have also been carried out. In parallel, evaluation of an FEL oscillation in KU-FEL has been performed. We will report our present expectations and future visions about undulators in KU-FEL. The former is the numerical studies on the expected FEL gain of the existing Halbach type undulator in the KU-FEL based on experimental beam parameters. The latter is the upgrade plan of the undulator to obtain higher gain. These undulator parameters are calculated by simulation code TDA3D.

京都大学赤外自由電子レーザーにおけるアンジュレータの性能評価

1. はじめに

自由電子レーザー(FEL)は様々な分野での応用が期待されるが、装置が大型にならざるを得ないという欠点があった。京都大学エネルギー理工学研究所の自由電子レーザー(KU-FEL)では、生物学や化学などの幅広い分野での応用が見込まれる4~13 μm の赤外領域での波長・偏光可変FEL発振を目指し、小型で経済的なFEL装置を建設中である。現在の装置の概観図を図1に、アンジュレータの写真を図2に示す。KU-FELの加速器は高周波電子銃と3 mの加速管からなっており、前年度までにほぼ建設を終えるとともに、30 MeVの電子ビーム加速に成功した[1]。現在は実験棟移転のために装置を再建設中である[2]。この移設の際に加速器ビームラインの変更を行っており、これまでに得られたビームパラメータと併せて、今後のFEL発振のためには既設のHalbach型アンジュレータの再評価が必要となっている。

そこで本稿では、まず先に得られた加速管後のビームパラメータ[3]を基にして現状のKU-FELで得られるFELゲインを計算機シミュレーションによって検証する。また現状のビームパラメータでは、既設のアンジュレータ長1.6 mでは得られるゲインが不足することが予測されるが[4]、一次元ゲイン計算の場合、ゲインはアンジュレータ長の3乗に比例することから[5]、アンジュレータ長を伸ばす事がゲインを大きくする手段として考えられる。現在のアンジュレータを元にした改造を考えると、周期数40を周期数50、アンジュレータ長2.0 mに伸ばすことが可能であり、これによるFELゲインについて検証をし、その有効性を確かめる。

2. KU-FEL

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、マクロパルス長3 μsec 、最大エネルギー約11 MeVの電子ビームが生成される。現在、マクロパルス長を伸ばすべく研究を行っており、この経過から5 μsec 程度のマクロパルス長が期待されている[6]。加速管までのビーム輸送系はDOG-LEGと呼ばれる形を

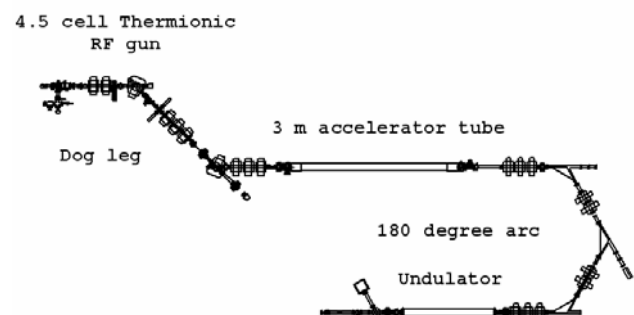


図1：KU-FELの概観図



図2：KU-FELのアンジュレータ

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。

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°アークによってパンチ圧縮され、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旧自由電子レーザー研究所(FELI、現大阪大学工学研究科自由電子レーザー研究所iFEL)と東大原子力施設のリニアックにおける発振実験の折に使用したものをギャップ長可変にしたものである。アンジュレータ長は1.6 m、周期数は40、K値は0.95～0.17である。

3. 計算方法

3.1 ゲインの計算方法

KU-FELでのFELのゲインを計算するために、軸対称3次元モデルシミュレーションコードTDA3D[7]を用いた。表1は加速管出口の実験値を基にして、アンジュレータ入射直前までをPARMELA[8]で計算した電子ビームパラメータである[3]。KU-FELが加速可能な25 MeV、30 MeV、35 MeVの三種類の電子ビームが入射された場合について計算を行った。また、アンジュレータのK値に関しては、電子ビームのパラメータから、ある程度ゲインが確保できるK値の大きな0.60、0.70、0.80、0.90、0.95の5種類に関して計算を行った。

表1：電子ビームのパラメータ

エネルギー	25-35 MeV
ピーク電流	40 A
規格化エミッタンス(x)	11 π mm-mrad
規格化エミッタンス(y)	10 π mm-mrad
エネルギー幅	0.5 %
x 方向ビーム半径	0.57 mm
y 方向ビーム半径	0.82 mm

3.2 FELゲインの飽和に関する計算方法

TDA3Dのオリジナルの計算コードでは、光が複数回往復する場合には対応していないため、電子ビームが一回通過した場合の出力として得られるレーザー強度から、光損失分を差し引いた値を次の行程の初期レーザー強度として入力し、これを繰り返し計算したものを、KU-FELで得られる光共振器内の往復回数に対するレーザーパワーとして計算した。今回の計算では光損失を10%と仮定した。KU-FELの装置の条件では光共振器の最小共振器長は3.57 mであり、この場合1 μ secで42回ミラーを往復できる[9]。KU-FELでは4～13 μ mでのFEL発振を目指しているが、長波長領域では比較的高いゲインが

得られるため、波長が最も短く且つ大きなゲインの得られる電子ビームエネルギー35 MeV、アンジュレータのK値0.95の場合に関して、現状のマクロパルス長3 μ secと、今後の高周波電子銃の改善により期待される5 μ secでFELゲインの飽和の可能性を検討する。

4. 計算結果および考察

4.1 既設のアンジュレータ(1.6 m)

FELゲインの計算により、25, 30, 35 MeVの各電子ビームに対して図3の結果が得られた。既設のHalbach型アンジュレータでは、6～12 μ m波長帯域においては40%以上のゲインが得られることがわかる。また、電子ビームエネルギー35 MeV、K値0.95、発振波長6.11 μ mでの光共振器内の往復回数に対するFELパワーは図4のようになる。FELパワーが飽和するためには約150往復必要であり、現在のマクロパルス長3 μ secではFELパワーの飽和は不可能だが、5 μ secに改善されれば、わずかながらFELパワーの飽和が見込まれる。

図3から、K値が減少するとゲインが急激に低下していることがわかる。すなわち、K値が0.1減少(ギャップ長が平均1.9 mm増加)するとゲインは約10%減少している。KU-FELの電子ビームの性質を考慮すると、発振波長選択の際にはアンジュレータのギャップ長の調整は発振波長の微調時にもみ留め、電子ビームエネルギーの調整により行う必要がある。

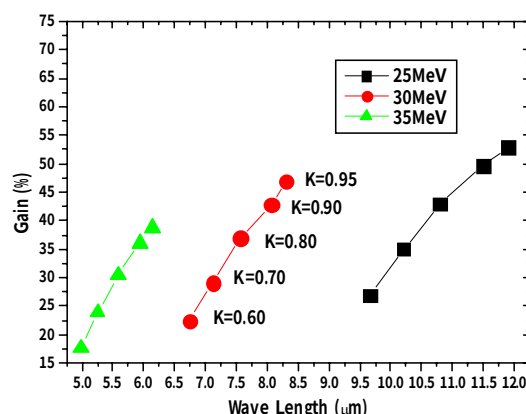


図3：1.6m既設アンジュレータのピークゲイン
K=0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95

4.2 延長したアンジュレータ(2.0 m)

前節と同様の計算によって、25, 30, 35 MeVの各電子ビームに対して図5の結果が得られた。2.0 mに延長したHalbach型アンジュレータでは、6～12 μ m波長帯域において55%以上のゲインが得られ、1.6 mのときよりも17%程度ゲインが向上することがわかる。6.11 μ mでの光共振器内の往復回数に対す

るFELパワーは図7のようになる。この図より、FELのパワーが飽和するためには、約90往復が必要であり、現在のマクロパルス長3 μsec でもFELの飽和が達成可能であり、マクロパルス長が5 μsec に改善されれば十分に安定なFEL発振が期待できる。すなわち、現在のアンジュレータを2.0 mに改造する事で、KU-FELを用いて6~12 μm の波長域における安定なFELが発生可能となることが分かった。

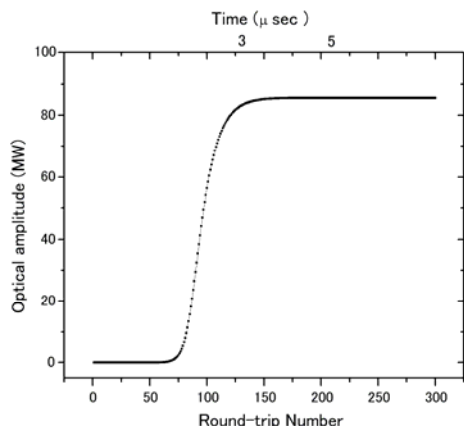


図4：1.6 m既設アンジュレータでのレーザーパワーの飽和の様子

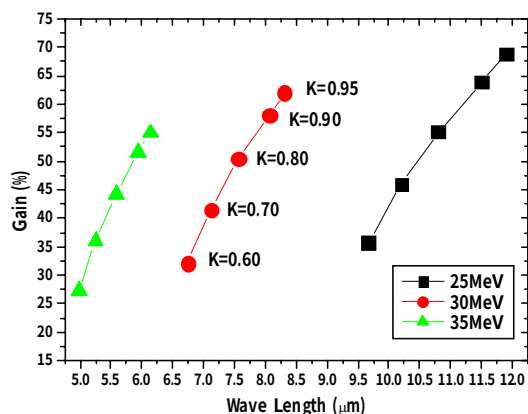


図5：2.0 mに延長したアンジュレータのピークゲイン K=0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95

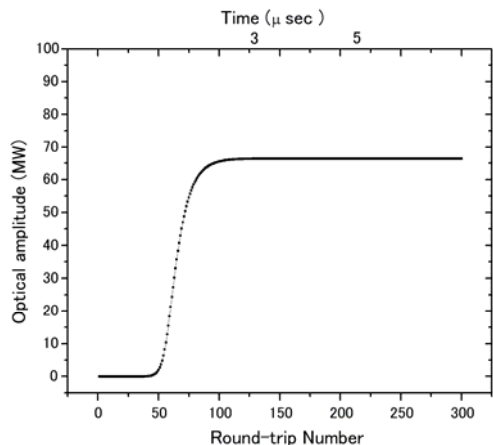


図6：2.0 mに延長したアンジュレータでのレーザーパワーの飽和の様子

5. 結論と今後の課題

KU-FELでのFELのゲインと、FELゲインの飽和に関する計算を計算機シミュレーションにより行った。この結果、現状のビームパラメータの下では、既設のHalbach型アンジュレータでは6~12 μm の波長帯域においてFELのゲインが40%程度であり、FELの飽和のためには十分でないことがわかった。この状況を改善するための方策として、アンジュレータ長を1.6 mから2.0 mに延長することを考えて、同様の計算を行った結果、アンジュレータ長が2.0 mであれば6~12 μm の波長帯域ではゲインが55%程度となり、6~12 μm でのFELの飽和が十分に可能であることがわかった。また、KU-FELの電子ビームパラメータの特性から、主に電子ビームのエネルギーを変化させることで発振波長を調整し、アンジュレータのギャップ長による調整はその微調整に使う必要があることがわかった。

今後の課題として、まず既設アンジュレータのみを使用する場合は電子ビームの改善と光共振器の工夫が求められる。さらに偏光可変FEL発振を目指すために、ヘリカルアンジュレータの設計を行う予定である。

参考文献

- [1] K. Masuda, et al., Proceedings of the 2004 FEL conference, (2004).450.
- [2] T. Kii, et al., Proceedings of the 2004 FEL conference, (2004).447.
- [3] H. Ohgaki, et al., Proceedings of the 2004 FEL conference, (2004).454.
- [4] H. Ohgaki, et al., NIM A507 (2003) 150.
- [5] Charles A. Brau: *Free-Electron Lasers*. (Academic Press, Inc, 1990) Chap6.
- [6] Y.Nakai, et al., "Improvement of the performance of thermionic RF gun by controlling RF power" in these proceedings.
- [7] J.S. Wurtele T.M. Tran. Computer Physics Comm., Vol.54, p.263, 1989.
- [8] Loyd M. Young, James H. Billen : LA-UR-96-1835 (2002).
- [9] 留高烈：京都大学エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻修士論文(2003)