

Progress in the FEL Lasing in Kyoto University

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

Abstract

We have constructed an infrared (4~13 μ m) FEL facility for advanced energy researches in Kyoto University. The numerical studies on the expected FEL gain, which was based on the experimental measurements both of the undulator and of the electron beam parameters, were carried out. However, g-parameter of the mirror cavity was located close to the unstable region. In order to obtain a stable FEL, we calculated the FEL gain taking into account the duct shape, the tilt angle, and the offset of the mirror, then for the first lasing the mirror parameter was optimized. At the present stage, we have installed the undulator and the mirror cavity. A measured spectrum of the spontaneous emission was consistent with the result of the calculation obtained with measured magnetic field of the undulator.

KU-FELにおけるFEL発振研究

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では中赤外領域(4 μ m-13 μ m)における自由電子レーザーの発振を目指して研究を進めている。KU-FELの構成は4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃、3mの加速管、ビーム輸送部、Halbach型アンジュレータと光共振器である。

電子銃と加速管は共に2856MHz(S-band)で駆動し、40MeVの電子ビームの生成に成功している。

今回新たに計算コード GENESIS1.3を改良して、ダクト形状を正確に取り入れた計算を行ない、光共振器の最適化を行うとともに、この結果をもとにアンジュレータと光共振器の設置を行った。またアンジュレータ放射光の計測を行い、磁場測定の結果から予測される自発放射光のスペクトルと比較した。現在、FEL発振に向けた実験を進めている。

2. FELゲイン計算

2.1 計算コード

これまで、計算コードTDA3Dを用いてFELゲインとラウンドトリップの計算を行っていた^[1]。しかし、この計算にはダクト形状や、ミラー面での反射・吸収・透過が取り込まれていない。また、共振器型FELでの重要なパラメータであるdetuningについても取り扱いが困難な事から、今回、計算コードGENESIS1.3を元に共振器の構造を正確に取り入れた計算が可能なコードを作成し、より現実的なFELゲインを求めた。計算コードに取り入れたダクト構造を、図1に示す。

ゲイン計算には、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(表1)を用いた。

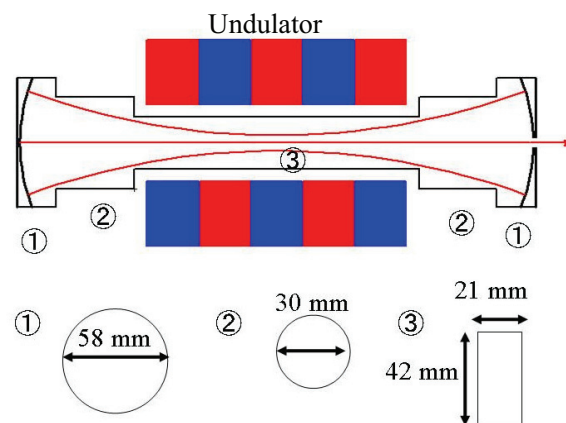


図1 計算に取り入れたダクトの形状

表1 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

今回作成した計算コードを用いて、光共振器ミラーをFEL発振実験のために最適化した。計算はゲインが大きい長波長側の電子ビームエネルギー25 MeV、波長12 μ mで行った。TDA3Dで最適化した際に用いていたミラーのgパラメータは0.93であり、共振器の不安定領域に近いことから、ミラーのミスアライメントによる影響は大きいと考えられる。そのため、gパラメータが0.5付近となるように共振器パラメータを新たにGenesis1.3で算出した。ミラーのホール径は2 mm ϕ 、上流ミラーは3.03 m、下流ミ

ラーは1.87 mとした。

求めた曲率半径とホール径をもつミラーの性能評価を行う。上流ミラー、下流ミラーそれぞれの回転方向、センター位置のずれによるゲインの変化を計算した結果を図2に示す。位置のずれが0.4 mm、傾きが400 μ radの場合でもゲインは完全にアラインしているときの90%を維持している。また、上流ミラーと下流ミラーに設置誤差がある場合は、センター位置のズレが0.4mm以内であれば、ゲインの低下は10%以下に抑えることが出来る。

今回シミュレーションにより求めた曲率半径をもつミラーを実際に作製した。その写真を図3に、仕様を表2に示す。

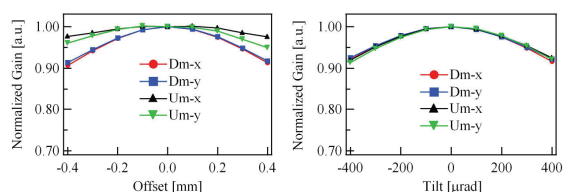


図2 算出したミラーのミスアライメントの影響

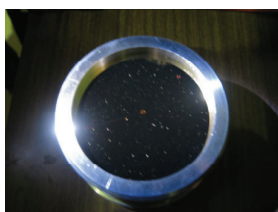


図3 製作されたミラー

表2 設計したミラーの仕様

材質	金コート銅ミラー
総合赤外反射率	99.04 %
下流ミラーの曲率半径	1872 mm
上流ミラーの曲率半径	3030 mm

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、一対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。^[2]そのため、アウトカップリングについてはホール面上でもその他のミラー面上の部分と同様に光は反射をするが、損失の算出は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した。

図4に今回の計算コードによるFELゲインを示す。現状の電子ビームのマクロパルス長(3 μ s)から、ピーク電流40AがFEL飽和に必用な事が分かる。一方、ピーク電流20A以下では、FEL飽和には至らないものの増幅の確認は可能であることが分かる。

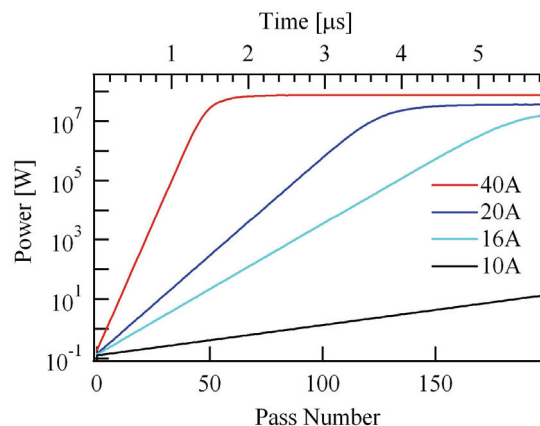


図4 ピーク電流とFELゲインの時間発展

3. アンジュレータ放射光の分光計測

一昨年度行った磁場測定の結果および、電子ビームパラメータの確認のために、光検出器 (Judson, J15D12, 図5) と分光器 (Digikrom, DK240, 図6) を用いて、アンジュレータ放射光の分光計測を行った。

アンジュレータ光は下流ミラーのアウトカップリングより取り出し、放物面鏡により分光器入射口で集光して計測した。その計測系を図7に示す。



図5 InSb光検出器



図6 分光器

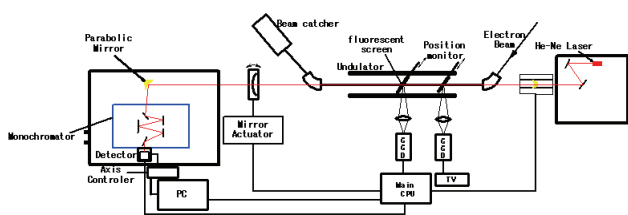


図7 計測系概要図

電子ビームのエネルギー29.5MeVにて自発放射光を観測した。電子ビーム条件は表1のパラメータを引き続き用いて計測を行った。観測結果を図8に示す。観測された自発放射光は波長9.2 μm でピークを持ち、半値幅270nmであった。表3には測定により得られたアンジュレータ磁場と、計算コードSRW[3]で計算したアンジュレータ放射光の計算値も観測値と合わせて示している。これより、測定値と計算値の一致は非常に良く、各種パラメータについて、問題が無いことが確認された。

表3 Halbach型アンジュレータのパラメータ

全長	1.6 m
周波数	40
周期長	4 cm
ギャップ長	25.5~45 mm
ピーク磁場	0.26~0.0045 T
K値	0.99~0.17

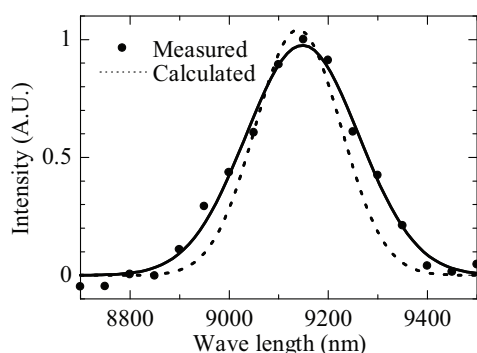


図8 アンジュレータ放射光スペクトル

4. FEL発振実験

FEL発振を目指し、ビームエネルギー26.5MeV、マクロパルス長5 μs (アンジュレータ部では約3 μs)、平均電流60mA、FEL波長11 μm の条件下で、FEL増幅実験を開始した。

光共振器長は、リニアックのRF周波数2856.02 MHzに合わせ4.513mに設定し、長尺のマイクロメータを用いてmmの単位まで追い込んでいる。また、ミラーのアライメント調整はCWレーザーを行い、レーザー光の蓄積、並びに自発放射光の蓄積に成功している。

一方、ストリークカメラを用いたバンチ長測定実験の結果から、アンジュレータ部を通過する電子ビームのピーク電流は7A程度と見積もられている^[4]。

この条件で、FELゲインを計算すると、カップリングホール等からの損失が上回っており、現状でのFELの増幅は認められていない。ピーク電流の増大を図るため、電子銃のカソードをバリウム含浸タングステンからLaB6に変更し、電子銃からの引き出し電流量の増加を試み、引き続き増幅実験を行う予定である。

5. まとめ

計算コードGENESIS1.3を改良して、光共振器の構造を取り入れたFELのゲイン計算を行えるようにした。これを用いて増幅実験に適した共振器パラメータを算出し、共振器を組んだ。ゲイン計算の結果、マクロパルス長3 μs では、ピーク電流40AでFELの飽和に達することが確かめられた。

計算の過程において、ミラーのアウトカップリングの取り扱いをより現実的に行うため、計算コードの改良を進める必要がある。

アンジュレータ放射光の計測を行った。測定で観測された放射光は、同じ電子ビームパラメータで求められた計算結果と一致し、アンジュレータパラメータ、電子ビームパラメータに問題が無いことが確認された。

現在、FEL発振実験を進めているが、現在の電子ビーム条件ではFEL発振は困難であり、FELの発振を実現するためには、電子ビームのピーク電流の増加が求められる。

参考文献

- [1]M. Nakano, et al., Proceedings of the 2006 FEL conference, (2006)
- [2]B. Fattz et al., J. Phys. D.: Appl. Phys. 26(1993)1023.
- [3]O. Chubar, et al., Proc. of EPAC98, p.1177, 1998.
- [4]H.Zen, et al., "ELECTRON BEAM DIAGNOSTICS FOR FIRST LASING OF KU-FEL", in these proceedings