

## FEL gain calculation based on measured magnetic field of KU-FEL undulator

Masatsugu Nakano, Satoshi Sasaki, Takumi Shiiyama, Norihito Ohkawachi, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tesuo Yamazaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, 611-0011

### Abstract

We have constructed KU-FEL system in a mid-infrared region for advanced energy researches. 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. We have measured the magnetic field of the undulator by using a Hall probe. The parameters of both the electron beam and the optical cavity have been optimized to calculate realistic FEL gains by using the measured magnetic field. The expected FEL powers are also calculated. FEL gain decreases by a few % but FEL power is not largely affected.

### 測定磁場データを用いたKU-FELのゲイン計算

#### 1. はじめに

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)は、中赤外域でのFEL発振を目指している。その構成は4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃、3 m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2856 MHz(S-band)で駆動し、40 MeVの電子ビームの生成に成功した。今年度中にアンジュレータと光共振器を設置予定である。

図1にKU-FELで使用するアンジュレータを、表1にパラメータを示す。我々はこれまで表1のパラメータを用いて3次元シュミレーションコードTDA3D[1]から電子ビームパラメータ並びに光共振器の光学パラメータについて最適化を行い、FELゲインを算出した[2]。しかしながら、このアンジュレータは東大(工学研究科附属)原子力施設において、旧FELIと共同で行った発振実験に使用したものであり[3]、製作から年数を経ている、減磁が予測されたため今回磁場強度を測定した。ここでは測定された磁場データを導入して電子ビームパラメータと光学パラメータを最適化し直しFELゲインを算出した。

#### 2. 磁場測定

ホール素子を取り付けた磁場測定器を1 mmステップでアンジュレータに挿入し磁場測定を行った。磁場測定結果を図2に示す。また、測定磁場値をsin関数でフィッティングし、そのピーク磁場値 $B_{p,exp}$ を用いて次式で定義したアンジュレータエラーを算出した。図3にアンジュレータエラーを示す。

$$Error = 1 - \frac{B_{p,exp}}{B_{p,ideal}}$$



図1 Halbach型アンジュレータ

表1 アンジュレータパラメータ

全長	1.6 m
周期数	40
周期長	40 mm
ギャップ長	26 -45 mm
ピーク磁場	0.25 - 0.045T
K値	0.95 - 0.17

$B_{p,ideal}$ は理想ピーク磁場値を表し、エラーの正の値は減磁を表す。図よりアンジュレータ下流部、特にピーク数70-80にかけて減磁が確認される。なお、アンジュレータをギャップ長可変に改造したため、以前よりギャップ長が狭くなり(25.5 mm)ピーク磁場値は0.26 T、K値は0.99となった。

次に測定磁場値を用いて30 MeVの電子のビーム軌道を計算コードSRW[4]で計算した。SRWはnear-field近似をすることで荷電粒子の輻射スペクトルをシュミレーションする計算コードである。図4から電子ビーム軌道は約2 mmずれてしまうことがわかった。この歪みを補正するため、アンジュレータ入射前にステアリングコイルを設置してビーム軌道を約1.5 mrad偏向させる必要がある。ビーム軌道を偏向させた時のビーム軌道を図5に、自発放射光スペクトルの基本波部分を図6に示す。測定値のスペ

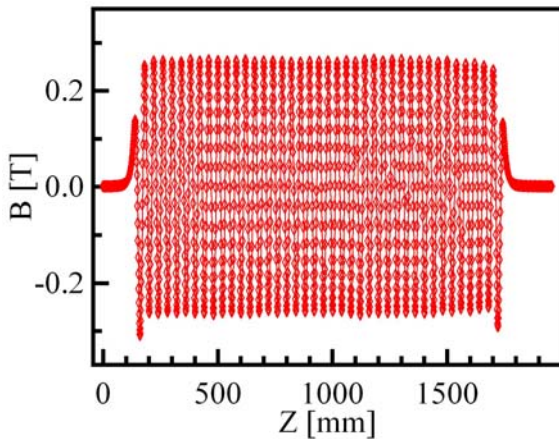


図2 磁場強度分布

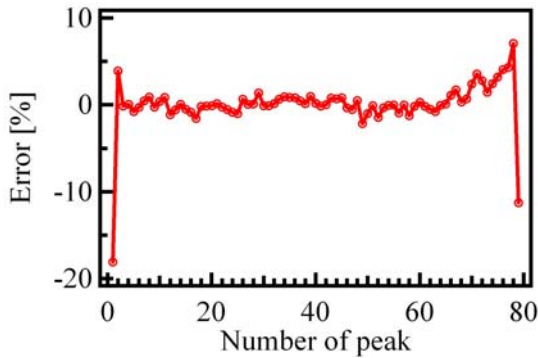


図3 アンジュレータエラー

クトルは理想値と比べ5%程度の減少であり、アンジュレータエラーにより波長がシフトすると共にスペクトルが非対称になった。また測定値の自発放射光の半値幅(FWHM)は2.3%であり、単色性を悪くするものではなかった。

### 3. FELゲイン

我々はこれまでアンジュレータのピーク磁場強度を一様に0.25 Tであると仮定して、TDA3Dを用いてFELゲイン計算を行ったが[2]、今回測定された磁場値を導入してFELゲインを算出し直すことでFEL性能を再評価した。表2、表3に理想磁場値を用いた時、測定磁場値を用いた時の最適化された電子ビームパラメータ、光学パラメータ及びFELゲインをそれぞれ示す。測定磁場値は図3のアンジュレータエラーのみを用い、またTDA3Dはピーク磁場数がアンジュレータ周期数の2倍の2Nを仮定しているが、KU-FELで用いるアンジュレータの周期数は39.5周期であるため、測定磁場値を導入して計算する場合は39周期とした。測定磁場値を導入したFELゲイン計算は表2の各パラメータを初期値とした。まず波長について最適化を行い、次にアンジュレータエラーにより電子ビームとレーザー光のオーバーラップに変化が生じるため、電子ビーム半径 $\sigma$ とTwissパラメータについて最適化を行った。ただし、 $\alpha_y$ はアンジュレータ磁場によりnatural focusするため $\alpha_y = 0$ とした。この結果を用いて最適なレイリー長とビー

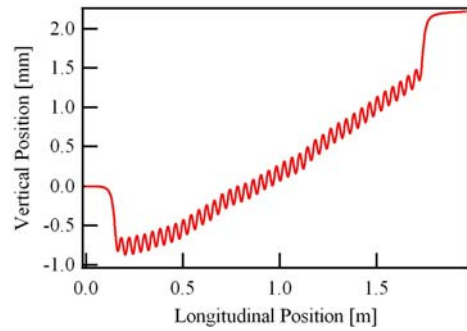


図4 測定値を用いた電子ビーム軌道

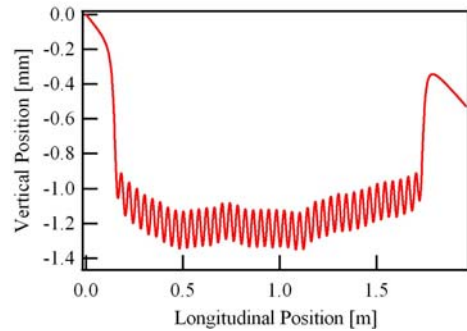


図5 補正をした時のビーム軌道

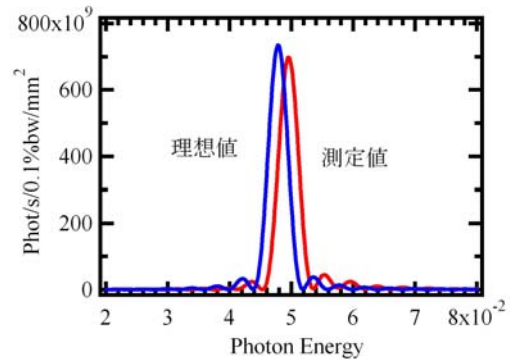


図6 自発放射光スペクトルの基本波部

ムウエスト位置を算出しFELゲインを計算した。表3に示すように最大ゲインを与える波長が長波長側にシフトし、測定磁場値を用いたFELゲインは理想磁場値を用いた時よりも数%減少した。

現状のKU-FELでのFELの発振の可能性を検討するため、FELゲインの飽和過程を計算した。TDA3Dは光が複数回往復する場合に対応していないため、電子ビームが一回通過した際のレーザー強度の出力から光損失分を差し引いた値を次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で得られるレーザーパワーとして計算し、図7に示す。光損失分はレーザー光をガウスビームと仮定して計算した。なおカップリングホールは1 mmφである。図7より測定値を用いて計算をした場合は理想値で計算した時よりもパワーが約5%減少し、また飽和に達する時間が0.2 μs延びることがわかった。一方、高周波電力を制御することで電子

表2 理想磁場値を用いた時の各パラメータ

電子ビームパラメータ

ピーク電流	40 A		
エミッタンス(x)	11 $\pi$ mm-mrad		
エミッタンス(y)	10 $\pi$ mm-mrad		
エネルギー幅	0.50 %		
エネルギー	25MeV	30MeV	35MeV
$\sigma_x$ (mm)	0.73	0.65	0.59
$\sigma_y$ (mm)	0.32	0.37	0.37
Twiss Parameter $\alpha_x$	2.3	2.2	2.0
Twiss Parameter $\alpha_y$	0	0	0

光学パラメータ

レイリー長	0.46 m		
ビームウエスト位置	0.6 m		
波長 ( $\mu$ m)	12.0	8.4	6.2
回折損失 (%)	4.5	1.4	0.4
out coupling (%)	5.5	6.5	7.6
光学損失合計 (%)	10.0	7.9	8.0
gain (%)	89	65	49

ビームのマクロパルス長が8  $\mu$ sに増加するシュミレーション結果を得ており[5]、この場合各エネルギーにおいて飽和に達することがわかった。

5. まとめ

測定磁場データを用いてKU-FELでのFELゲイン計算とFELゲインの飽和に関する計算を行った結果、アンジュレータエラーによるFELゲインが数%減少、また飽和に要する時間が0.2  $\mu$ s延びるが、FELパワーに与える影響はほとんどなく、8  $\mu$ sのマクロパルス長により波長6-12  $\mu$ mのFELの取出しが可能であるとの結論を得た。

参考文献

[1] J.S. Wurtele T.M. Tran. Computer Physics Comm., Vol.54, p.263, 1989.  
 [2] T. Fukui, et al, Proc. of FEL2005 (2005).  
 [3] E. Nishimura, et al., Nucl. Instrum. Methods, A341(1994) 39.  
 [4] O. Chubar, et al., Proc. of EPAC98, p.1177, 1998  
 [5] N. Ohkawachi, et al., "Production of electron beam with constant energy by controlling input power into a thermionic RF gun", in these proceedings.

表3 測定磁場値を用いた時の各パラメータ

電子ビームパラメータ

ピーク電流	40 A		
エミッタンス(x)	11 $\pi$ mm-mrad		
エミッタンス(y)	10 $\pi$ mm-mrad		
エネルギー幅	0.50 %		
エネルギー	25MeV	30MeV	35MeV
$\sigma_x$ (mm)	0.65	0.60	0.55
$\sigma_y$ (mm)	0.33	0.36	0.36
Twiss Parameter $\alpha_x$	1.9	2.0	1.9
Twiss Parameter $\alpha_y$	0	0	0

光学パラメータ

レイリー長	0.40 m		
ビームウエスト位置	0.6 m		
波長 ( $\mu$ m)	12.3	8.6	6.3
回折損失 (%)	4.0	2.5	0.8
out coupling (%)	5.6	6.0	7.0
光学損失合計 (%)	9.6	8.5	7.8
gain (%)	87	64	49

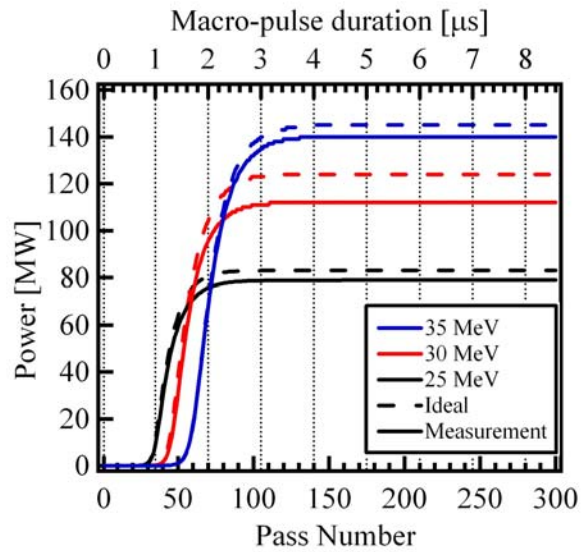


図7 FEL飽和