

[13A-02]

## ANALYSIS OF GAIN MEASURED FOR THE ISIR-FEL USING TDA3D

M. KUWAHARA<sup>\*)</sup>, R. KATO, Ravi A. V. Kumar and G. ISOYAMA

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
Mihogaoka 8-1, Ibaraki, Osaka, 567-0047 JAPAN

### Abstract

We have analyzed the FEL gain measured in the wavelength region from 100 to 140  $\mu\text{m}$  for the far infrared FEL based on the L-band linac using the one-dimensional (1-D) model and a three-dimensional simulation code, TDA3D. The gain with the 1-D model using the measured beam characteristics is around 10 % in the wavelength region, while the measured gain increase from 60 % to 90 % . The FEL gain calculated with TDA3D is two times higher than that with 1-D model, but it is still much lower than the measured one. The dominant factor reducing the FEL gain is the energy spread of electron beam, 4.4 % . The measured gain can be reproduced by TDA3D with an energy spread of 1 % . It is suggested that the discrepancy may be due to a small local energy spread in the macropulse.

### 阪大産研 FEL で測定した増幅利得の TDA3D を用いた解析

#### 1. はじめに

我々は阪大産研 L バンドライナックを用いて赤外領域における自由電子レーザー(FEL)の研究を行っている。1994年に最初のFEL発振に成功して以来、より長波長側へ波長の拡大を目指し装置の改造を進めた結果、現在 150  $\mu\text{m}$  での発振を得ている。FEL のダイナミクスを理解する為に、増幅利得(ゲイン)及び回折損失(ロス)を測定しその評価を行ってきた。ロスに関しては、回折損失の理論で実験値を良く説明できた[1]。しかし、ゲインに関しては、一次元モデルを用いた理論値は実験で得られたゲインと一致しない。そこで、電子ビームのベータatron振動やエネルギー広がり、光ガイドング等の高利得領域の効果が取り入れる事が出来る三次元シミュレーションコード TDA3D[2] を用いてゲインの評価を行った。

#### 2. FEL の主要なパラメーター

L バンドライナックで加速された電子ビームと FEL 装置の主要なパラメーターを表1に示す。L バンドライナックの加速周波数は 1.3GHz であるが、1/6 と 1/12 サブハーモニックパンチャーを使い、マイクロパルス間隔を 9.2 ns に拡大している。電子ビームエネルギーは 19 MeV から順次低くし波長を長くしている。アンジュレーターは永久磁石

(NdFeB)を使った平面振動型で、K 値は 1.472 まで連続的に大きく出来る。光共振器は長さ 5.531 m のニアコンセントリック共振器で、アンジュレーター中心でウエストを持つ。時間分解能が 200 ns の高速型 Ge:Ga 半導体検出器で FEL 光を測定して、波形の立ち上がり及び立ち下がり部分からゲインとロスを求めた。この結果、波長 90 ~ 140  $\mu\text{m}$  において 60 ~ 90 % 以上の高いゲインが得られている。

#### 3. ゲインの理論計算

##### 3.1 一次元モデル

FEL 発振波長は近似的に式 (1) で表される。

表 1. 電子ビームやアンジュレーター及び光共振器の主要なパラメーター

electron beam	
RF frequency	1.3 GHz
micropulse spacing	9.2 ns
electron energy	10 ~ 19 MeV
energy spread	4.4 ~ 5 % (FWHM)
peak current	40 A
normalized emittance	200 mmmrad
undulator	
period length	60 mm
number of period	32
K-value	0.013 ~ 1.472
optical resonator	
Rayleigh length	1 m
cavity length	5.531 m
beam size at waist	5.6 mm (100 $\mu\text{m}$ )

<sup>\*)</sup>M.KUWAHARA, 06-6879-8486, m-kuwa25@sanken.osaka-u.ac.jp

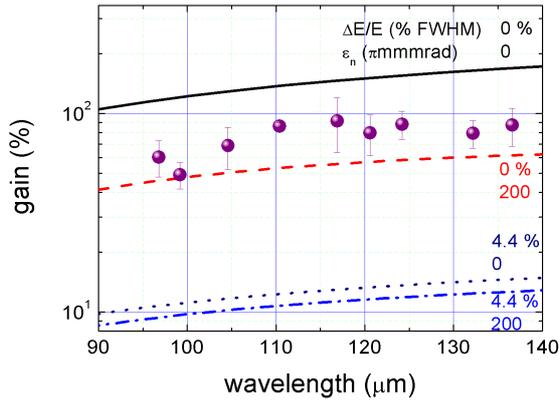


図 1. 一次元モデルによるゲイン。曲線が理論値、黒丸が実験値を表す。エネルギー広がりは半値全幅である。

$$g_n \approx \sqrt{2n} \frac{K^2}{1+K^2} \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (1)$$

ここで  $n$  は高調波次数、 $\lambda_u$  はアンジュレーター周期長、 $K$  は  $K$  値を示す。高利得領域に対する修正を加えた一次元モデルでは、ゲインの最大値  $G_n$  は近似的に以下の式で与えられる[3]。

$$G_n \approx 0.85g_n + 0.19g_n^2 + 0.0042g_n^3 \quad (2)$$

$$g_n = \frac{4\pi}{\gamma} \frac{\lambda_n \lambda_u N}{\Sigma_E} \frac{I_p}{I_A} f F_n(\xi) \left( \frac{\Delta\omega}{\omega} \right)^{-2}$$

$$F_n(\xi) \equiv n^2 \xi \left[ J_{(n+1)/2}(n\xi) - J_{(n-1)/2}(n\xi) \right]$$

$$\xi \equiv K^2 / 2(1+K^2)$$

ここで、 $N$  はアンジュレーター周期数、 $I_p$  はピーク電流、 $\Sigma_E$  は電子ビーム断面積、 $f$  はフィリングファクター ( $\Sigma_E / \Sigma_L$ 、 $\Sigma_L$  はレーザー断面積)、 $I_A$  はアルフェン電流 (=17.04kA)、 $\Delta\omega$  はアンジュレーター自発放射スペクトル幅を示す。表 1 のパラメータで計算した一次元モデルによるゲインを図 1 に示す。この結果、エネルギー広がり及びエミッタンスがそれぞれ 0%(FWHM)、0( mmmrad) で計算すると 100 ~ 200 % のゲインが得られると分かった。また、それぞれ測定値である 4.4%(FWHM)、200( mmmrad) ならばゲインは 10 ~ 15 % となり、ゲインの減少が顕著となること分かった。

### 3.2 TDA3D

TDA3D は、非斉次領域(Inhomogeneous broadening regime) におけるゲインの減少、及び光ガイディングや摂動高次の項等の高利得領域も考慮できる。同

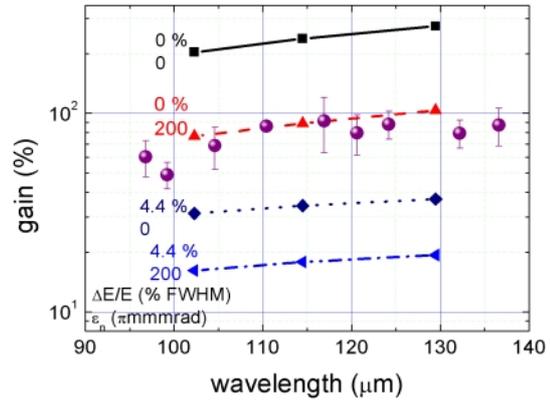


図 2. TDA3D によるゲイン。曲線が理論値、黒点が実験値を表す。

じパラメータを使用した TDA3D による計算結果を図 2 に示す。エネルギー広がりが 0%(FWHM)、エミッタンスが 0( mmmrad) で計算すると、200 ~ 300 % のゲインが得られた。一次元モデルと比較するとゲインは約 2 倍となり、この増大は光ガイディングの効果と考えられる。また、それぞれ 4.4%(FWHM)、200( mmmrad) ならばゲインは 15 ~ 20 % となる。この結果 TDA3D は一次元モデルより大きなゲインが得られることが分かった。

### 3.3 小信号低利得領域における一次元モデルと TDA3D の比較

高利得領域及び非斉次領域において TDA3D で計算したゲインは一次元モデルより約 2 倍大きいことが分かった。この不一致の原因は一次元モデルによる式 (2) が適用出来ない為と考えられる。そこで小信号低利得領域において一次元モデルと TDA3D の比較を行った。その為以下の条件を課し TDA3D を計算した。

- 1) ベータトロン振動が一定であること。
- 2) 電子ビーム特性が斉次領域(Homogeneous broadening regime)であること。
- 3) 摂動低次の項及び光ガイディングの効果が微小であること。

計算の結果得られたゲインスペクトルを波長の関数として図 3 に示す。FEL 光の波長は三次元を考慮すると  $\lambda = \lambda_u / 2 \sqrt{1 - Z_R^2}$  (=0.96 μm ここで  $Z_R$  はレイリー長) だけ長波長側へずれる。このずれは図 3 の波長のずれとほぼ一致する。また最大ゲインは一次元モデルと TDA3D で一致することが分かった。

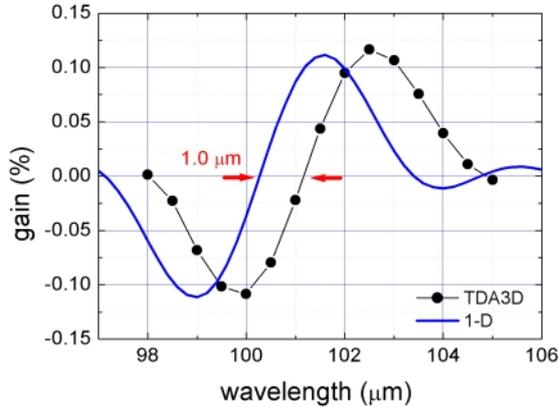


図 3. 小信号低利得領域における一次元モデルと TDA3D によるゲインスペクトル。

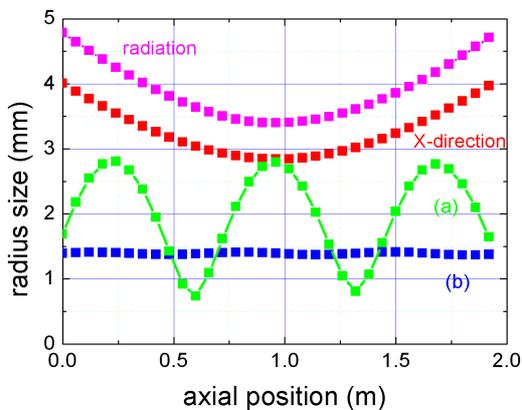


図 4. アンジュレータ中のビーム半径の変化。  
a), b) は Y 方向のベータトロン振動であり、それぞれシミュレーションの結果、ゲインは 8%, 16% であった。

#### 4. TDA3D による実験値の解析

##### 4.1 FEL 発振時のベータトロン振動

電子の三次元運動を考慮すると、ベータトロン振動の寄与が重要になることが分かった。その振幅を変化させながらシミュレーションを行った結果、振幅が最小である図 3 の b) の状態においてゲインが最大となる事が分かった。理由として、非斉次領域におけるゲインの減少が緩和される事、及び電子密度が増大する事が考えられる。実験では、FEL 光強度が最大となるようビーム調整を行っているので、b) の状態が再現されていると考えられる。

##### 4.2 実験値と TDA3D の比較

図 4 の b) の状態のもと実験値との比較を行った。実験値と計算値のそれぞれのゲインを波長の関数として図 5 に示す。同時に、順次エネルギー広がりを小さくした場合の計算値も示す。

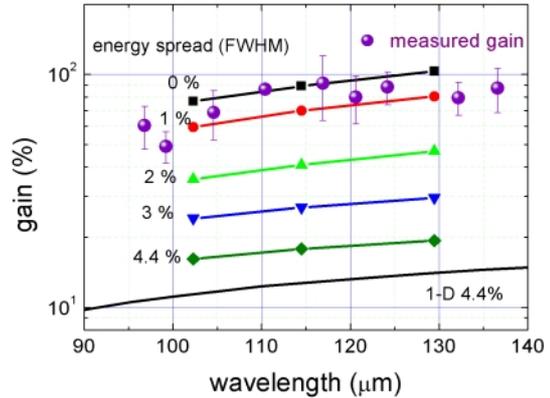


図 5. TDA3D 及び測定されたゲイン。  
エネルギー広がりを 1% で計算すると実験値を再現する。

りを小さくした場合の計算値も示す。エネルギー広がりが測定値である 4.4 % (FWHM) で計算すると TDA3D が実験値を大きく下回った。実験値を再現する為にはエネルギー広がりが 1 % (FWHM) 以下でなければならない。実験で測定した 4.4 % はマクロパルス全体を時間積分して求めた値である。他方、測定されたゲインはマクロパルスの後半部分での FEL 光の立ち上がりから求めている。従って、この部分のエネルギー広がりは全体の広がりよりかなり小さい可能性がある。

#### 5. まとめ

高利得領域及び非斉次領域において TDA3D のゲインが一次元モデルのゲインを上回ることが分かった。小信号低利得領域において比較した結果、一次元モデルと TDA3D のゲインは一致した。次に FEL 発振時のパラメーターを使いシミュレーションを行った。その結果、ベータトロン振動が一定であれば最大ゲインを示すと分かった。また、TDA3D のゲインは測定されたゲインを下回ることが分かった。エネルギー広がりが 1% で計算すると測定されたゲインを再現する。この不一致については現在検討中である。

#### 参考文献

[1] R. Kato, et al., Proc. 24th the Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo (1999) p54.  
[2] T. M. Tran, J. S. Wurtele, TDA –A three-dimensional axisymmetric code for Free-Electron-Laser (FEL) simulation, Computer Physics Comm. **54** (1989) 263.  
[3] W. B. Colson, C. Pellegrini, A. Renieri, Laser Handbook, **6** (1990) North-Holland Pub. Co.