

## SATURATION PROPERTY OF THE TERAHERTZ FEL AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

Ryukou Kato<sup>1,A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>A)</sup>, Yutaka Morio<sup>A)</sup>, Yoshikazu Terasawa<sup>A)</sup>, Kenichiro Furuhashi<sup>A)</sup>,  
Shoji Suemine<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>B)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

<sup>B)</sup> Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

### Abstract

We have been developing a Terahertz FEL based on the 40 MeV, L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. The linac was extensively remodelled in 2002 - 2004 to realize higher stability and reproducibility of operation. At this opportunity, we added a new operation mode for FEL, in which the pulse duration of the RF power is extended to 8  $\mu$ s from 4  $\mu$ s in the normal mode, so that the FEL power can reach saturation. After re-commissioning of the linac, we have conducted FEL experiments again and have observed lasing at the wavelength region from 70  $\mu$ m to 120  $\mu$ m (4.3 - 2.5 THz) with the high peak power. The peak power in the macropulse is roughly estimated to be over 80 W. We will report the recent progress of the FEL experiments conducted with the L-band linac.

## 阪大産研テラヘルツFELの出力飽和特性

### 1. はじめに

我々は、阪大産研Lバンド電子ライナックを用いてテラヘルツ領域のFELの開発研究を行っている<sup>[1][2]</sup>。昨年夏（2007年8月）に、加速RFパルスの位相・振幅を制御し、FEL発振に用いるエネルギー分散の小さいマルチバンチ電子ビームを生成する事により波長70  $\mu$ mにおいてFELの出力飽和を達成した。その後、電子ビームエネルギーやウイグラー磁場を変化させ、発振波長70-120  $\mu$ mでFEL発振実験を行っている。FEL実験では、分光器と高速の遠赤外検出器（GeGa半導体検出器）を組み合わせて用いる事により、光パルスの特性測定を行っている。GeGa半導体検出器の応答速度（約10 ns）はFEL光出力のパルス幅（3~4  $\mu$ s）に比べ十分短いので、光パルスの時間プロファイル測定に用いる事ができる。

本研究会では、これまでに行ったFEL光パルス特性測定の結果について報告する。

### 2. FELの光特性

#### 2.1 FEL発振波長と波長可変性

電子ビームエネルギー約16 MeVのときにウイグラーギャップを30~35 mmまで変化させたときのFEL波長スペクトルを図1に示す。FEL光は回折格子型分光器（Cross Czerny-Turner型）で単色化し、焦電素子検出器（日本分光製、DTGS）を用いて測定した。

スペクトルのピークは前述のギャップの変化に対応して、波長107~74  $\mu$ mの範囲で連続的に変化させることができる。このピーク波長は、電子ビームのエネルギーとウイグラーのK値から求められる共鳴波長とほぼ一致する。

#### 2.2 偏光特性

我々が使用しているウイグラーはHalbach型の磁石配列3周期の後にエッジフォーカス型配列を1周期加えたものを1セルとし、それを8セルならべた強集束型である<sup>[3]</sup>。電子ビームは水平平面内で蛇行する

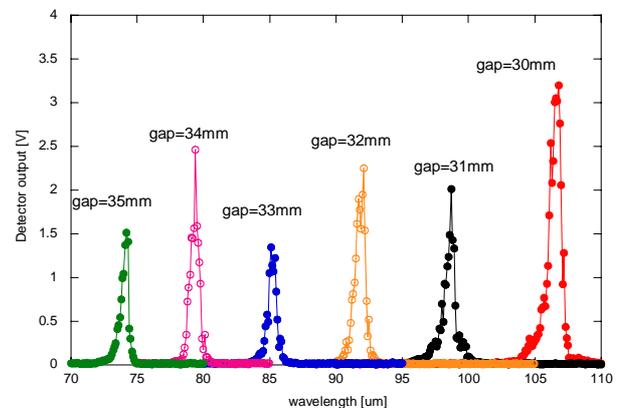


図1：ウイグラーギャップ間隔を30~35mmで変化させたときのFELの波長スペクトルの変化。電子ビームエネルギーは約16 MeV。

<sup>1</sup> E-mail: [kato@sanken.osaka-u.ac.jp](mailto:kato@sanken.osaka-u.ac.jp)

ことにより、FEL光の電場振動面も水平方向となる。光輸送用のミラー類、分光器、光検出器はすべて同一平面内に配置されているため、FEL光の水平偏光は検出器の位置まで保存されているはずである。これを検出器の直前に偏光子を挿入することにより確認した。偏光子としてワイヤグリッド（ワイヤ径10  $\mu\text{m}$ 、ワイヤ間隔25  $\mu\text{m}$ ）を用いて、これを10度ステップで回転させながら光強度を測定した。これを図2に示す。測定点に対して正弦波をフィットし、その最大最小値から偏光度を評価した。得られた偏光度は87.3%となり、検出器位置でもほぼ完全な水平偏光であることが確認できた。

### 2.3 FEL出力と電子ビームからの変換効率

FEL動作により電子ビームのエネルギーの一部が光に変換される。我々はレーザー用のエネルギーセンサー（コヒーレント製、J-25MB-LE）を用いてFEL飽和時の光出力を評価した。このセンサーは今回測定した100  $\mu\text{m}$ を超える波長領域まで十分感度はあるものの、信号強度をエネルギーに換算する較正係数がCO<sub>2</sub>レーザーの波長までしか評価されていない。そのため今回はこの換算係数を用いた。測定されたFEL光のパルスあたりのエネルギーは最大239  $\mu\text{J}$ であった。長波長になるほど感度が低下することが判っているので、実際のエネルギーは測定値よりも若干大きな値になると考えられる。このときGeGa半導体検出器で測定したFEL光のマクロパルスの持続時間は約3  $\mu\text{s}$ であり、これによりマクロパルス内のピークパワーは約80 Wと評価された。マクロパルスの中には9.2 ns間隔でマイクロパルス光が整列しており、この持続時間は大雑把に電子バンチの時間幅（約20 ps）と同程度である。これによりマイクロパルス光のピークパワーは約40 kWと推定される。

他方、光共振器内に蓄積されている光パルスは、上流側共振器ミラーの中央に開けられた3 mm $\phi$ の出力結合穴により取り出され、光輸送路と分光器を経由して検出器まで運ばれる。この出力穴の結合度は

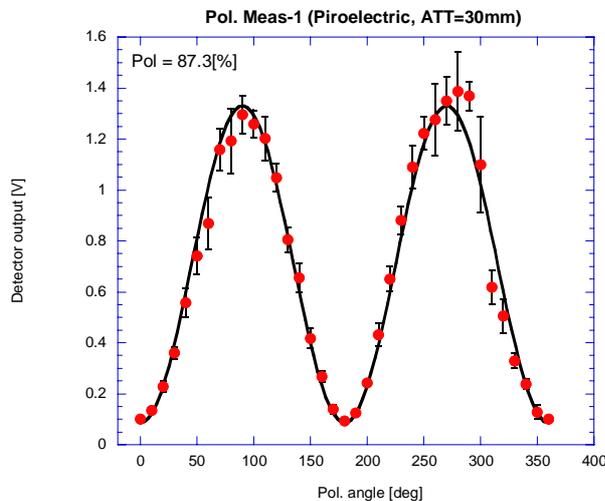


図2：FEL光の偏光特性。マーカーは測定値、実線はそれに正弦波をフィットしたもの。得られた偏光度は87.3%。

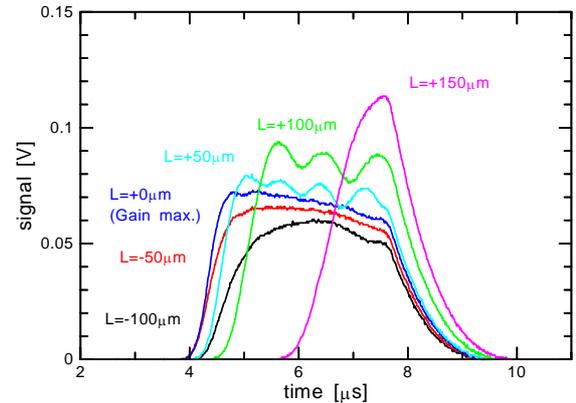


図3：共振器長を変化させたときのFEL光の時間プロフィール。

計算により波長100  $\mu\text{m}$ に対して約1.2%と推定される。また、光輸送路の途中に設置された2つの真空窓（合成ダイヤモンド、単結晶水晶）の波長100  $\mu\text{m}$ に対する透過率は両者とも約70%である。これらを考慮すると光共振器内の蓄積パルスのピークパワーは約6 MWとなる。

このときの電子ビームのエネルギーは約16 MeV、ピーク電流は20~30 A程度と推定されるので、電子ビームパワーは約400 MWとなる。電子ビームから光パルスへの変換効率は約1.5%と評価される。この変換効率はDCビームの場合の値（ウイグラー周期数を $N_w$ とすると） $1/4N_w = 0.78\%$ よりも大きな値となる。

### 2.4 デチューニング特性

FELの光パルスの時間発展は共振器長に強く依存し、FEL利得や飽和出力、波長スペクトルが変化する。図4は共振器長を変化させたときのFEL光の時間プロフィールを示している。実験時のビームエネルギー約16 MeV、波長105  $\mu\text{m}$ であった。この時間プロフィールの光パルスの立ち上がりの勾配からFEL利

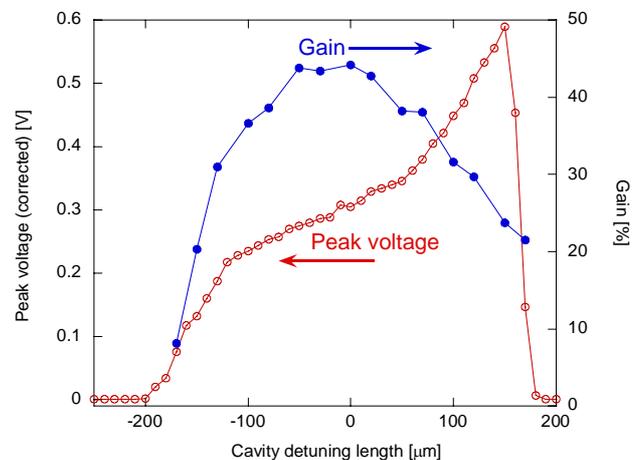


図4：共振器長を変化させたときのデチューニング曲線（最大信号強度）とFEL利得。

得を、立下りの勾配からの共振器損失を評価できる。この時の最大利得は約45%で、共振器損失は8~9.5%であった。FEL光出力の最大信号強度と利得を共振器長の関数として図4に示す。我々のFELシステムでは光共振器内で光と電子ビームが完全に同期するときの共振器長(ゼロ・デチューニング)を確定できない。そのため、共振器長の変化として最大利得時の共振器長からのずれを表示している。最大利得時の共振器長(L=+0 $\mu$ m)の前後で利得は減少し、光パルスの立ち上がりは時間的に遅れるようになる。共振器長が減少する側ではFEL光出力の最大信号強度が減少するが、共振器長が増加する側では最大信号強度は増大し、さらに光パルスの平坦部で信号強度が時間的に一定周期で振動するようになる。

図5は前述の時間プロファイルと同時に測定した波長スペクトルである。最大利得時よりも共振器長が短い場合には、幅の狭い単一スペクトルであるが、最大利得時(L=+0 $\mu$ m)のときにスペクトルは2ピークが観測されている。またこれよりも共振器長が長い側ではスペクトル幅が増大するが、その拡がり方は対称ではなく、長波長側へのスペクトル幅の増大がより顕著である。

図4でパルス平坦部にみられる強度の振動は、最大利得に近い側で振動周期が短く、共振器長が長くなるにつれて振動周期が長くなる傾向にある。また、我々が観測できるパルス長の範囲内でこの振動は減衰しているようには見えない。FEL飽和時のこのような変動はかつてFELIXで観測され、その振動周期のデチューニング長(共振器長のゼロ・デチューニング位置からのずれ)への依存性が理論と良い一致を示すことから、リミットサイクル型の発振であると位置づけられた<sup>[4]</sup>。これを確認するために、共振器長を10  $\mu$ mステップで変化させながらFEL光の時間プロファイルを測定し、その振動周期を測定した。これを図6に示す。図4の強度変化からL=+180  $\mu$ mをゼロ・デチューニング位置と仮定し、そこからのずれをFEL波長105  $\mu$ mで規格化した値を横軸に用いた。図中の黒い実線は文献<sup>[4]</sup>の中で用いられている理論曲線である。これによるとデチューニングを $\delta L$ 、波長を $\lambda$ とすると、強度の振動周期

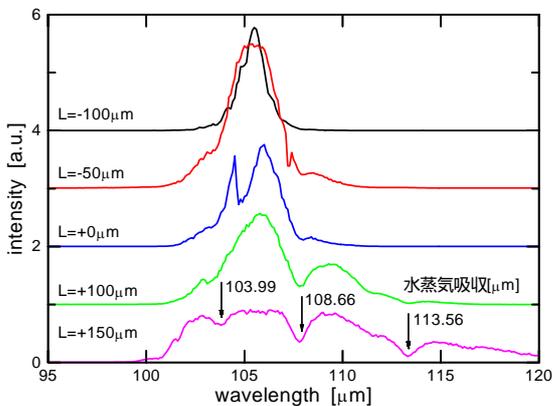


図5：共振器長を変化させたときのFEL光の波長スペクトル。

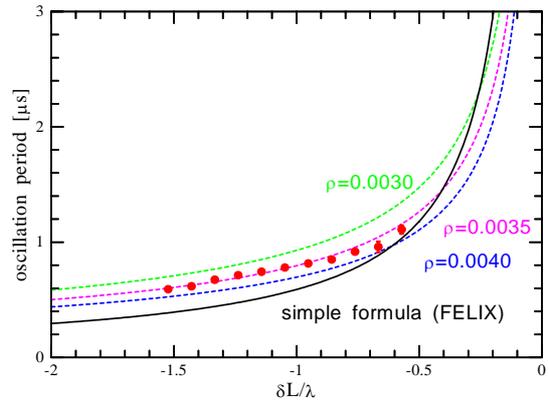


図6：共振器長を変化させたときの振動周期の変化。

は $(-\delta L/\lambda)^{-1}$ に比例する。我々のFELの振動周期もFELIXのデータと同程度に理論曲線と良い一致を示すことが確認できた。また、後に出版されたPiovella等の論文ではこの振動周期は $(-\delta L/\lambda)^{-2/3}$ に比例し、FELパラメータ $\rho$ に逆比例することが示されている<sup>[5]</sup>。図中に点線で示しているのはこの理論曲線である。我々の実験結果では、こちらの式とさらに良い一致を示し、 $\rho=0.0035$ の場合でほぼ完全に説明できることがわかった。これにより我々が観測している強度の振動は、リミットサイクル型のFEL発振として解釈可能であると考えられる。

### 3.まとめ

阪大産研のLバンド電子ライナックを用いたテラヘルツFELは、ライナック改造後、再度のFEL発振を確認するとともに初の出力飽和を達成した。このFEL出力、共振器内の蓄積光のパワー、変換効率を推定するとともに、デチューニング特性などを評価した。

また、今年度からのFELで発生した高強度コヒーレント・テラヘルツ光を試験的に利用するユーザー実験を開始した。

### 参考文献

- [1] S. Okuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A358, 244-247, 1995.
- [2] R. Kato, et al., Nucl. Instr. and Meth. A445, 169-172, 2000.
- [3] S. Kashiwagi, et al., "Study of Focusing Properties of a New Type Wiggler on the ISIR FEL at Osaka University", Proceedings of the 28th International Free Electron Laser Conference, Berlin, Germany, August 27 - September 1, 2006.
- [4] D. A. Jaroszynski, et al., Phys. Rev. Lett. 70, 3412-3415, 1993.
- [5] N. Piovella, et al., Phys. Rev. E 52, 5470-5486, 1995.