

## DEVELOPMENT OF THZ LIGHT SOURCE USING PRE-BUNCHED FEL

Mafuyu Yasuda, Masayuki Kawai, Kittipong Kasamsook, Akira Kurihara,  
Yoshinobu Shibasaki, Sigenobu Takahashi, Kenichi Nanbu, Hiroyuki Hama, Fujio Hinode  
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University  
1-2-1 Mikamine Taihaku-ku, Sendai, 982-0824

### Abstract

A project of pre-bunched FEL as a Terahertz (THz) light source using short electron bunch less than 100 femto-second has been progressed at Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. We expect FEL with shorter electron beam generates shorter light pulse than conventional FEL with long electron beam. By choosing appropriate initial electron phases (bunch length is less than wave length of FEL field), the FEL gain will be higher. We have developed a numerical simulation code using 1-D FEL equations. We report on a time structure of FEL field and trajectory of electron in separatrix.

## プリバンチドFELを用いたテラヘルツ光源の開発

### 1. はじめに

テラヘルツ光 (波長  $30 \mu\text{m} - 3 \text{mm}$ ) は光波と電波の中間領域にあたり分子の回転、振動運動など種々の励起エネルギーに対応し、分子科学、生命科学、医療、農業などの分野において様々な応用を持つと考えられている。東北大学原子核理学研究施設では現在加速器を用いた高強度テラヘルツ光源計画が進められている。

具体的にはアンジュレータを用いた共振器型FEL装置である。最も特徴的である点は入射する電子ビームとして、バンチ長 100 フェムト秒程度の非常に短い電子ビームを用いる点である。従来のFELでは発振波長に対し十分に長い電子ビームとの相互作用を考えるのが一般的である。それゆえバンチ長が波長以下の電子ビームとのFEL相互作用においてどのような電場パルスが生成するかを知らずには興味深い。またバンチ長を波長以下にすることで電子の電場に対する初期位相を任意に選択できるので、電子初期位相に依存する電場パルスの形状変化や増幅率の違いが予想される。

本研究の目的は1次元FEL方程式を用いてバンチ長が波長以下の電子ビームを用いたFEL相互作用を数値計算によって調べることである。

### 2. 東北大学プリバンチドFEL計画

アンジュレータに入射する電子ビームとして、バンチ長100フェムト秒以下という非常に短い電子ビームが必要である。このような短バンチ電子ビームを生成するために我々は独立空洞型熱陰極高周波電子銃 (ITC RF-gun) とアルファ磁石を用いたバンチ圧縮器の開発を行っている。シミュレーションから電子ビームの規格化エミッタンスは $2\pi \text{mmrad}$ 程度と考えられる。加速後の運動エネルギーを12 MeVとし、バンチ長は100 fs以下 (プリバンチド) を目標としている。

#### 2.1 ITC RF-Gun

ITC RF-gunは2つの空洞からなり、それぞれ独立なRF入力ポートを持っている[1]。そのため入力する電力、位相を独立に変化させることができ、位相空間の操作を可能にすることでバンチ圧縮器に最適な電子ビームを生成する。

#### 2.2 バンチ圧縮器

現在アルファ磁石を用いたバンチ圧縮器を計画し、数値計算を進めている。アルファ磁石を用いることで電子軌道を短くし装置全体を小さくすることができる。

### 3. 数値シミュレーションの詳細

#### 3.1 計算で使用したパラメータ

以下に今回の計算で使用したパラメータを示す。表1は電子ビームをバンチ長、 $\sigma = 100 \text{ fs}$ の長方形ビームと仮定してバンチ長を発振波長 ( $\lambda_r$ ) の3分の1としている。

表1: パラメータ一覧

電子の運動エネルギー	$E=12 \text{ [MeV]} (\Delta E=0)$
アンジュレータ周期	$\lambda=0.08 \text{ [m]}$
アンジュレータ周期数	$N=20$
アンジュレータ磁場	$B=0.3 \text{ [T]}$
共鳴波長	$\lambda_r=2.56 e^{-4} \text{ [m]}$
電子ビームの総電荷	$C=20 \text{ [pC]}$
電子ビームの横広がり	$S=2\pi (0.01)^2 \text{ [m}^2\text{]}$
電子ビームのピーク電流	$I=80 \text{ [A]}$
FELパラメータ	$e^{-3}$

### 3.2 計算コードの詳細

今回用いた計算コードは1次元FEL方程式を無次元化し、オイラー法を用いて有限長電子ビームとFEL場の相互作用(電場エンベロープ、電子位相(位置)、エネルギー等)を計算する。なお電場振幅はなめらかに変化するものとし、波長単位で計算する。さらに以下のことを仮定している。

1. スリッページ効果により、生成するFEL光のパルス長は  $(N+B)\lambda_r$ 。ここでNはアンジュレータの個数、電子バンチ長を  $B\lambda_r$  とする。
2. 光共振器損失は0と仮定し、 $n+1$ ターン目の初期値は  $n$ ターン目のアンジュレータ出口の値を用いる。
3. 1ターン目の電場初期値  $A(0)$  は任意に与えている。(  $A(0)=0$  として自然放射光から計算しているわけではない。)
4. detuning長は0と仮定する。

### 3.3 1次元FEL方程式

電場エンベロープは

$$\frac{\partial a(\zeta, \tau)}{\partial \tau} = ij_e(\zeta) \langle \exp^{-i\psi_i(\tau)} \rangle \quad (1)$$

であり、ここで  $\langle \exp^{-i\psi_i(\tau)} \rangle$  はバンチングファクター。電子エネルギーは

$$\frac{d\mu_i}{d\tau} = \text{Re} [ ia(\zeta_i, \tau) \exp^{-i\psi_i(\tau)} ] \quad (2)$$

であり、電子位相は

$$\frac{d\psi_i}{d\tau} = -\mu_i(\psi) \quad (3)$$

より求める[2, 3]。

## 4. 計算結果

バンチ長が1波長(一様初期位相)と3分の1波長の場合について光共振器中を300ターンした後の電場増幅、電子の位相空間を計算した。さらに電子のバンチ長を波長以下にすることで電子は電場に対してある特定の初期位相を持つようになるので、電場のパルス形状、振幅の初期位相値依存性を計算

した。

### 4.1 300ターン後の電場パルス形状

バンチ長が  $\lambda_r/3$  の場合、数ターン ( $< 15$ ) までは電子の初期位相により電場の増幅または減少領域があるが(一様位相の場合の位相空間の電子のエネルギー変化からの類推と一致)、次第にあらゆる初期位相値で電場の前方が増幅し短パルスの光が得られた。電子のバンチングとともに電場後方が増幅する(レサジー効果)バンチ長が1波長程度の場合の計算結果と大きな違いが見られた。

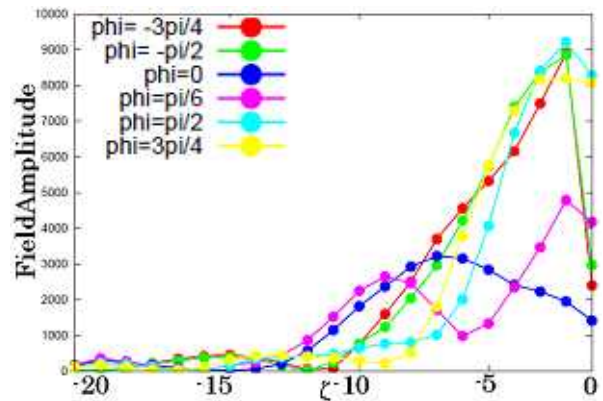


図1: 電場パルスの形状変化(300ターン)

### 4.2 300ターン後の電子軌道

300ターン目のアンジュレータ入り口から出口までの位相空間中の電子の時間変化を計算した。計算結果より、バンチ長の短い電子ビームを用いたFELでは電子はターン数とともにセパトリクス内で回転運動をしなくなる。それでも一様位相の場合、セパトリクス内の電子はエネルギーを失うもの、得るものの両者が存在し回転運動に非常に近い動きを続ける。(図2上) それに対し特定位相を持つ場合、電子はセパトリクスの下方に移動し、すべての電子はエネルギーを失う。(図2下)

また最も特徴的であるのは位相空間(中の電子軌道)が電子の初期位相値によらないことである。各ターン毎のアンジュレータ入り口での電場(セパトリクス)に対する電子位相は、多くの初期位相値で  $\pi/2$  に近づいていく。(図3参照) この現象は電子が特定の初期位相を持つ場合特有の現象であった。このことが前方にピークを持つ電場パルスを生じさせる原因の1つであると考えられる。この現象について記述している論文もあり<sup>[4]</sup>今後さらに物理的意味を考えていく必要がある。

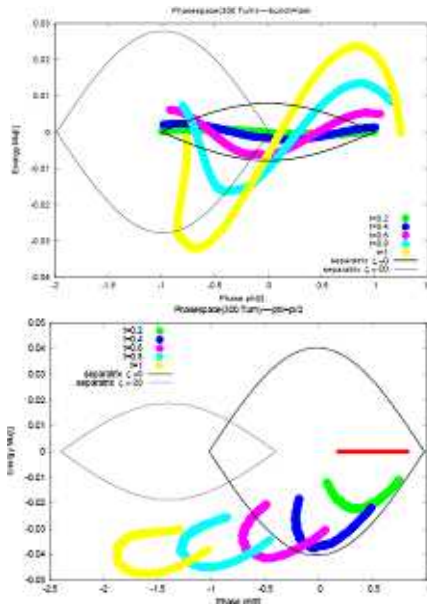


図 2 : 位相空間中の電子軌道 (上) バンチ長 =  $\lambda r$ , (下)  $= \lambda r/3$

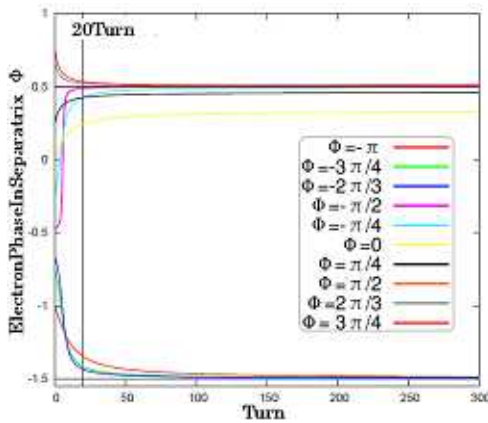


図 3 : ターン毎の電場(セパトリクス)に対する電子初期位相

#### 4.3 電場振幅の電子初期位相依存性

生成した FEL 光の振幅 (パルス全体の積分値) の電子初期位相による変化を計算した。1 ターン目は初期位相により電場の増幅領域、減少領域がある。しかしターン数とともに形状は変化していき約 50 ターン以降ではすべての初期位相値で電場は増幅する。電場振幅は電子の初期位相がセパトリクスの中心付近よりも端側で大きくなる傾向がある。また初期位相値  $< 0$  の領域 (1 ターン目で電場が減少する領域) ほど電場増幅は大きい。さらに図 4 には同じ増幅率 (FEL パラメータ) でのバンチ長 1 波長の場合の計算値も示した。短バンチの場合に比べ電場増幅は小さい。

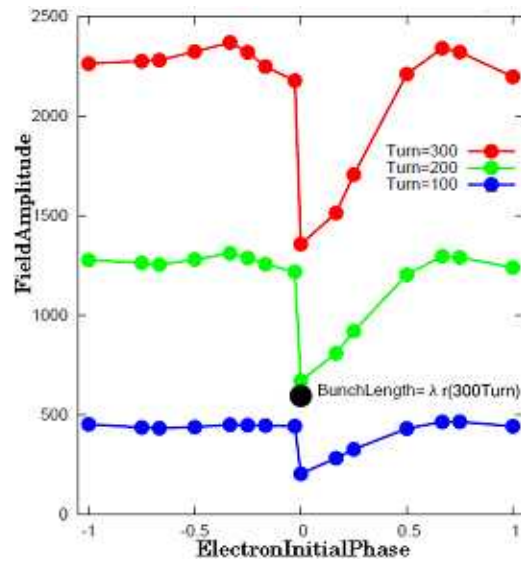


図 4 : 電場振幅の電子初期位相依存性

## 5. まとめと今後

高強度のテラヘルツ光源としてバンチ長 100 フェムト秒以下の電子ビームを用いたプリバンチド FEL の計画を進めている。

数値計算の結果より電子のバンチ長を波長以下にすると、ターン数とともに電場の前方が増幅し、レサジー効果が起きないことが分かった。このことはアンジュレータ入り口での電子と電場の位相関係、位相空間中の電子運動が原因であると考えられる。またあらゆる初期位相値で電場は増幅し、一様位相の場合に比べ増幅率も大きい。

今後の課題としてコヒーレント光の取り扱いがある。バンチ長が発振波長以下と非常に短いため電子はアンジュレータ中でコヒーレント光を出す。このコヒーレント光を種光として発振させることができるか、毎ターンごとにどのように数値計算に取り入れていくか検討する必要がある。また短バンチ電子との FEL 相互作用では電場の値により増幅率が大きく異なるため、コヒーレント光を種光として計算したとき用いている FEL 方程式の適用範囲、計算結果の妥当性を十分に議論していく必要がある。

## 参考文献

- [1] T. Muto et al, Proc. 29th Int. Free Electron Laser Conf. Novosibirsk (2007) pp476 - 479.
- [2] Charles A. Brau, Free-Electron Lasers, Academic Pr. (1990).
- [3] 西森 信行 私信
- [4] Sang June Hahn, Su-Bin Song: JPSJ 69 (2000) pp. 2859-2865