

## DEVELOPMENT OF AN INJECTOR TO GENERATE ULTRA-SHORT BUNCHES FOR COHERENT TERAHERTZ LIGHT SOURCES

Takumi Tanaka, Toshiya Muto, Fujio Hinode, Masayuki Kawai, Kenichi Nanbu, Kittipong Kasamsook,  
Kazushi Akiyama, Mafuyu Yasuda, Yoshinosuke Mori, Hiroyuki Hama  
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University  
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, 982-0824

### Abstract

We have planed intense terahertz light source using coherent radiation from undulator. In order to emit coherent radiation, it is important to generate ultra short electron beam with a bunch length around 100fs. Now we have developed an injector to generate such short bunch beam. The injector consists of Independent Tunable Cells thermionic RF gun(ITC RF-gun) and a magnetic bunch compressor. Longitudinal and transverse phase space distribution can be controlled by changing input power of each cells and phase difference between cells in this gun. The compressor can change compression rate  $R_{56}$  and 2<sup>nd</sup> order dispersion effect. by 2 sets of quadrupoles and a set of sextupoles, respectively. Test model of ITC RF-gun was manufactured and basic parameters were measured. From tracking simulation, it has been turned out the bunch compressor can reduce to bunch length less than 100fs. In this paper, we show overview of the coherent terahertz light source and the detail of ITC RF gun and bunch compressor.

### コヒーレントテラヘルツ光源のための超短バンチ生成用入射器の開発研究

#### 1. はじめに

波長300 $\mu$ m付近の電磁波はテラヘルツ光と呼ばれDNAやたんぱく質等の生体高分子の分析や材料、食品等の幅広い分野での利用が期待されているが近年まで有効な光源が存在しなかった。テラヘルツ光源としてはレーザーを用いたものと加速器を用いたものがあり、われわれのグループでは加速器を用いた高強度のテラヘルツ光源の研究開発を行ってきた<sup>[1]</sup>。現在はアンジュレーターを用いた高強度のコヒーレントテラヘルツ光源の検討を行っている。

コヒーレントテラヘルツ光を生成するためには100フェムト秒以下のバンチ長を持つ電子ビームの生成が不可欠となる。そのため独立空洞型熱陰極高周波電子銃(Independent Tunable Cells thermionic RF-gun; ITC RF-gun)と静磁場型のバンチ圧縮器を組み合わせた入射系の開発を行っている。

ここではコヒーレントテラヘルツ光源の概要、ITC RF gunの試作機で行った性能測定とバンチ圧縮器について報告する。

#### 2. アンジュレーターコヒーレントテラヘルツ光源

光源は入射器、加速管、アンジュレーターからなる。概念図を図1に示す。入射器はITC RF-gunとバンチ圧縮器からなり、エネルギーE~2MeV、規格化エミッタンス $\epsilon_n < 1\pi$ mmrad、バンチ長~100fsの電子ビームを発生させる。入射器で生成した電子ビームを加速管で12MeVまで加速してアンジュレーターを通すことでコヒーレントテラヘルツ光を発生させる。

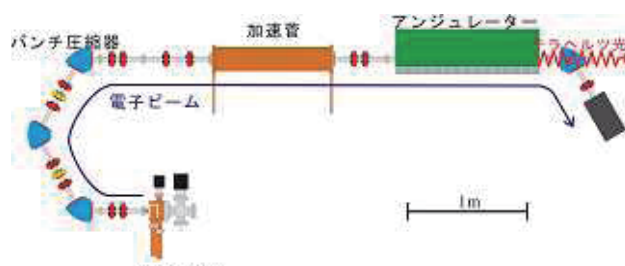


図 1 コヒーレントテラヘルツ光源概念

現在検討している光源パラメーターを表1に示す。

表 1 光源のパラメーター

Energy $E_e$	12 MeV
Normalized Emittance $\epsilon_n$	$< 1\pi$ mm mrad
Bunch length $\sigma_t$	$< 100$ fs
Bunch charge $I_e$	$\sim 20$ pC
undulator	
period length	8cm
# of periods	15
Magnetic field $B_{vmax}$	0.3T

電子ビームのバンチ長 $\sigma_t = 100$ fs,  $N_e = 1 \times 10^8$  electrons/bunch  $\sim 20$ pCの時、このアンジュレーターから生成されるコヒーレントテラヘルツ光のスペクトラムを図2に示す。同時に図2に単電子からのアンジュレーター光も示す。バンチ長が100fs  $\sim 300\mu$ mであるから3次光や5次光はコヒーレントではないので1次光に比べて強度が弱くなるのが図からわかる。

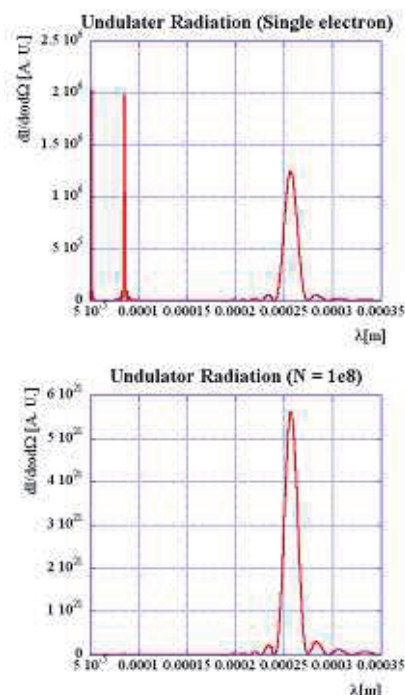


図 2 アンジュレータ光のスペクトラム:  
上図; 単電子の場合  
下図; 電子数  $N_e = 1 \times 10^8$  個 ( $\sigma_t = 100$ fs の時)

### 3. 極短バンチ生成入射器

#### 3.1 ITC RF-gun

ITC RF-gunは二つの空洞を持っており、通常よく使われるRFガンと異なり空洞間のカップリングを持たず、その名が示すとおり空洞はそれぞれ独立なセルとして扱える。そのため空洞それぞれにRF入力ポートを持っており空洞内に入力する電力と位相を独立に変えることができる。

また、エミッタンスを抑えるため陰極径を小さくし、かつ十分な電流量を得るため放出電流密度が高い直径1.75mmのLaB<sub>6</sub>カソードを用いている。

グループで開発した3次元FDTD(Finite Difference Time Domain)シミュレーションコード<sup>[2]</sup>を用いてITC RF-gunの最適化を行った<sup>[1]</sup>。RF-gunの計算条件とその時生成される電子ビームのパラメータを表2に、シミュレーションから得られた縦方向位相空間分布を図3に示す。RFガンから出てくる電子ビームの運動量は最大運動量  $P_{max} = 1.77 \text{ MeV/c}$  からほぼ  $0 \text{ MeV/c}$  まで広がっているが運動量スリットを用いて2%に絞ることを考えている。図3から電子銃から出てきたビームは全幅で5ps程度のバンチ長を持っていることがわかる。

#### 3.2 バンチ圧縮器

図3からわかるように電子銃から発生した運動量

が時間に対してほぼ線形であることを利用してバン

表 2 RF gunの計算条件とビームパラメーター

RF gun	
1 <sup>st</sup> セルの最大電場強度 $E_{1st}$	25MV/m
2 <sup>nd</sup> セルの最大電場強度 $E_{2nd}$	50MV/m
セル間の位相差	180+18deg
current density at cathode ( $\sqrt{1.75}$ )	50A/cm <sup>2</sup>
electron beam at RF gun out	
maximum momentum $P_{max}$	1.77 MeV/c
energy spread $\Delta p/p$ (full width)	2%
normalized emittance $\epsilon_n$	0.77 $\pi$ mm mrad
Twiss Parameter ( $\beta, \alpha, \gamma$ )	(1.11, 1.21, 2.22)

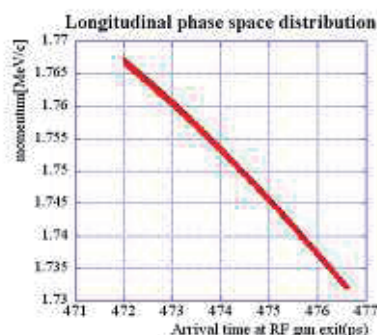


図 3 縦方向位相空間分布

チ圧縮を行う。熱陰極RFガンには $\alpha$ マグネットが使われることが多い<sup>[3]</sup>が、我々のグループはTriple-Bend-Achromat(TBA)のようなラティスを持つバンチ圧縮器を用いることを考えている。さらに六極電磁石をビームラインに導入した。これらのことによってこのバンチ圧縮器は、1)転送行列 $R_{56}$ を変化させることができ異なる $(\Delta p/p)/\Delta t$ に対応できる、2)六極電磁石を用いることで2次のエネルギー分散関数を変化させることができる。

図4に計算コードSAD<sup>[4]</sup>を用いて設計したバンチ圧縮器の光学系を示す。

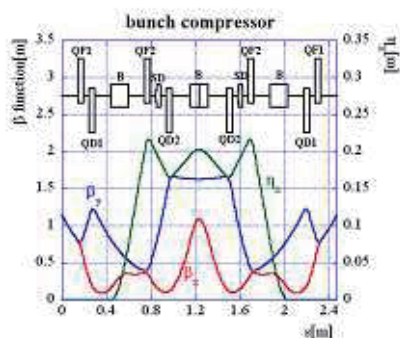


図 4 バンチ圧縮器の光学系

次にFDTDシミュレーションの結果を入力としてバンチ圧縮器のトラッキングシミュレーションを行った。このトラッキング計算には空間電荷効果は

考慮していない。トラッキングから得られた縦方向の位相空間分布を図5に示す。図5からバンチ長 $\sigma_t=43\text{fs}$ と得られ、この入射器によってバンチ長 $<100\text{fs}$ の生成が可能であると確認できた。

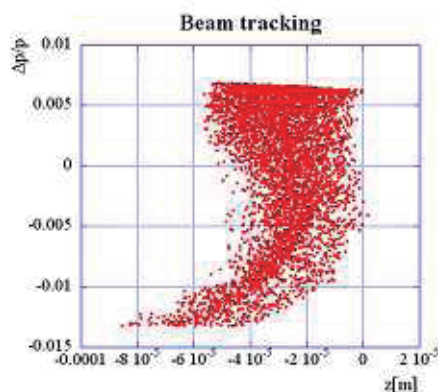


図5 トラッキングシミュレーションの結果

#### 4. ITC RF gunプロトタイプの性能測定

今回、ITC RF-gunのプロトタイプを製作し空洞の性能評価を行った。測定結果を表3にまとめる。

表3 ITC RF gun 測定結果

$(f_1, f_2)$	(2810.81, 2825.36)GHz
$(\beta_1, \beta_2)$	(2.3, 3.4)
Unloaded Q ( $Q_1, Q_2$ )	(9984, 9600)
$(R/Q_1, R/Q_2)$	(117, 129) $\Omega$

表3にあるように共振周波数が2856MHzから大きくずれている。3次元電磁場計算コードMicrowave-Studio<sup>[5]</sup>の計算から導波管と空洞のカップリングホールの影響によるものであることがわかっており周波数の変量も計算から求められる量と等しいことがわかっている。

ビーズ摂動法を用いてビーム軸に沿った電場分布を測定した。図6にビーズ摂動法の測定結果とSUPERFISHで求めた電場分布を示す。

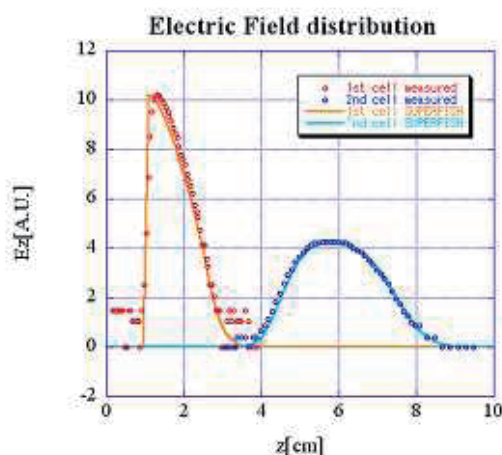


図6 電場分布 (点：ビーズ法による測定、

#### 実線：SUPERFISHによる計算)

図6から空洞内に立っている電場分布はSUPERFISHの計算に等しいことがわかる。表3のR/Qは図6の分布から求めている。SUPERFISHの計算から得られるR/Qはそれぞれ98.2 $\Omega$ , 114.6 $\Omega$ で測定結果とほぼ等しいことがわかった。

プロトタイプの実験から共振周波数以外はSUPERFISH計算結果から得られた性能通りであることが確認できた。共振周波数についてもRFのカップリングポートを考慮した3次元電磁場計算から行うことで理解できる。これらのことを踏まえて現在実機の製作に入っている。

#### 5. まとめ

高強度のテラヘルツ光源としてアンジュレーターからのコヒーレントテラヘルツ光を用いる光源加速器の設計を行っている。コヒーレントテラヘルツ光を得るためにはバンチ長 $\sigma_t=100\text{fs}$ 以下の極短バンチ電子ビームの生成が必要となる。100fsの電子ビームを生成するためにITC RF-gunと磁場型バンチ圧縮器を組み合わせた入射器の開発を行っている。数値計算からこの入射器で40fs程度の電子ビームが生成できることがわかった。バンチコンプレッサーの設計では電子銃からのビームパラメーターに強く依存するが、電子銃内の非常に低いエネルギーにおける空間電荷効果等を含んだシミュレーションは困難であるので今後General Particle Tracer(GPT)[6]のような他の計算コードとの比較等を行っていきたく考えている。バンチ圧縮器の計算では現在のところ空間電荷効果を考慮していないのでそれらを入れた計算を行い影響が少ないことを確認していく。

またバンチ圧縮器は実際に得られた電子ビームに対応できるようにある程度の幅でビームパラメーターにフィットできるように最適化していきたく考えている。

電子銃のプロトタイプを製作し性能評価を行った。測定から計算コードで求まる性能を再現することができた。今後実機の製作に入る予定である。

バンチ圧縮機用の四極電磁石の製作はすでに完了しており現在双極、六極電磁石の設計を行っている。

#### 参考文献

- [1] H. Hama et al. New Jour of Phys 8(2006) 292
- [2] H. Hama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 528(2004)371
- [3] H.A. Enge, Rev. Sci. Instrum. 34 (1963) 385; M. Borland, "A High-brightness Thermionic Microwave Electron Gun", Ph.D. Thesis, Stanford University, 1991.
- [4] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>
- [5] <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- [6] <http://www.pulsar.nl/gpt/>