

STUDY AND DEVELOPMENT OF A THERMIONIC ITC-RF GUN FOR PRODUCTION OF ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCHES

T. Tanaka¹, M. Kawai, F. Hinode, T. Muto, K. Nanbu, K. Kasamsook, K. Akiyama, M. Yasuda, H. Hama
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Japan 982-0826

Abstract

A novel coherent light source project at terahertz wavelength region has been developing at Tohoku University. As an injector of this light source, it is required to generate electron beams with a very short bunch length less than 100 fs and with a very small emittance less than 2π mm mrad. Macropulse duration of this injector must be longer than 1.5 μ s. To achieve these design parameters of this injector, a thermionic RF-gun has been adopted. Some conclusions of beam tracking simulation of this RF-gun, the way of making a short bunch at downstream of this gun and an overview of manufacturing a prototype of this gun are reported.

超短バンチ生成用独立2セル構造の熱陰極RF電子銃の開発研究

1. はじめに

現在、東北大学では円型加速器を用いた高輝度コヒーレントテラヘルツ放射光源の研究を行っている[1]。この計画では、入射器で約100 fs (rms)という超短バンチビームを生成させなければならない。ビームの高輝度化のために規格化rmsエミッタンスは 2π mm mrad以下を目標値にしている。さらに、放射光源の平均出力パワーを大きくするためにマイクロパルス長は1.5 μ s程度必要である。以上のようなビームを生成するために、我々は独立した2セルの加速空洞を持つ熱陰極RF電子銃の研究を行っている。今回、電子銃内でのビームトラッキングシミュレーション結果、電子銃下流のビーム輸送方法と現在製作中の電子銃プロトタイプについて報告する。

2. 熱陰極RF電子銃を用いたビーム生成

2.1 熱陰極RF電子銃の目標パラメータ

RF電子銃の加速空洞中でバンチ圧縮を可能にするために、加速空洞内で位相空間分布の操作可能な設計として、独立した2セルの熱陰極RF電子銃を考えた。この電子銃の特徴は各セル間の結合度をほぼ0にして入力RFの振幅と位相を独立に制御することで、ビームの位相空間分布の操作が可能なことである。このRF電子銃のことをindependently tunable cells (ITC)-RF gunと呼ぶことにする。このような操作方のRF電子銃はJ.W. Lewellenにより発案され、研究が進められている[2]。ITC-RF gunの設計パラメータを以下の表1に示す。

表1：ITC-RF gunの設計パラメータ

RF frequency	2,856 MHz (S-band)
Cathode material	LaB ₆

Current density @ cathode	100 A/cm ²
Cathode diameter	1.75 mm
Number of cells	2
Feeding total power	~5 MW
E_{total} @ exit of gun	~2 MeV
Bunch length (rms)	~100 fs
Bunch charge	~several tens pC
$E_{norm, rms}$	< 2π mm mrad
$\Delta p/p$	< 2 %
Macropulse duration	1.5 μ s

2.2 ITC-RF gunの設計

ITC-RF gunは入力RFを独立に制御できるようにセル間のRF結合定数を小さくするために、アイリス径をビームが削られない程度にできるだけ小さくした。このような加速空洞の基本的な設計はSUPERFISHを用いて行った。SUPERFISHで各セルをS-band周波数で励振したときの電場分布を図1に示す。

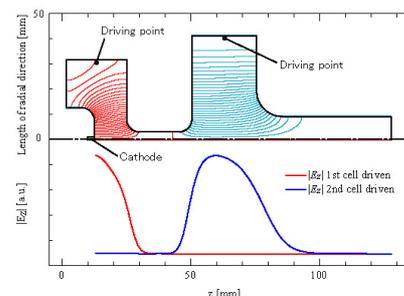


図1：ITC-RF gunの各セルを励振したときのビーム軸上の電場 E_z の分布

¹ E-mail: takumi@lns.tohoku.ac.jp

図1より、第1セルでの電場強度の最大値はカソードの表面となることが分かる。このことにより、カソードから放出された電子を大きな電場で加速できるので、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制することができると考えられる。これはRF電子銃の静電型電子銃に対する利点の一つである。

2.3 3次元FDTDシミュレーション

我々のグループでは3次元FDTDシミュレーションコード[3]を開発し、ITC-RF gunにおけるビーム加速について研究を行ってきた。FDTD法は時間発展マクスウェル方程式を境界条件を含めて自己無撞着に解くことが出来る。このことから、RF電子銃の境界条件とRFによる電磁場とビーム電流が誘起する電磁場を物理的に矛盾無く扱うことが出来る。電子はマクスウェル方程式の電流として扱われ、空間電荷効果やビームローディングも自然に取り込むことが出来る。

基本的にITC-RF gunのセル間の位相差は180度(πモード)で運転するが、セル間の位相差を変化させたり、各セルの電場強度： E_1 (第1セルの加速電場強度)、 E_2 (第2セルの加速電場強度)を変化させることで、gun出口でのビームの位相空間分布を制御することが出来る。 $E_1 = 25$ MV/m, $E_2 = 50$ MV/mと固定し、第2セルの位相を180度から6度ずつ変化させた時のgun出口でのビームの縦方向位相空間分布を計算した結果を図2に示す。

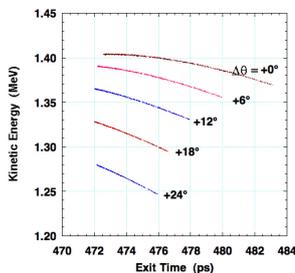


図2：ITC-RF gun 出口でのビームの縦方向位相空間分布。最大エネルギーから2%の粒子をプロットしている。

図2より、セル間の位相差が大きくなるほど縦方向位相空間分布のエネルギーが時間に対して線形に近付いており、これはgun下流でのバンチ圧縮に有効だと考えられる。また、 $(E_1, E_2) = (25, 50)$ MV/m, $\Delta\theta = +18^\circ$ の時の横方向位相空間分布を図3に示す。

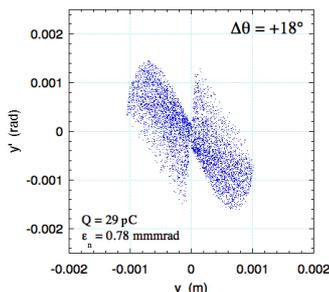


図3：ITC-RF gun 出口でのビームの横方向位相空間分布。最大エネルギーから2%の粒子をプロットしている。

図3において規格化rmsエミッタンスは約 1π mm mradとなっており、設計目標値を満たしている。図3以外の横方向位相空間分布の結果も規格化rmsエミッタンスは約 1π mm mradとなり、エミッタンスに関しては設計値を達成できる可能性があることが分かった。

次にITC-RF gunの出口でのビームの時間分布の一例を図4に示す。

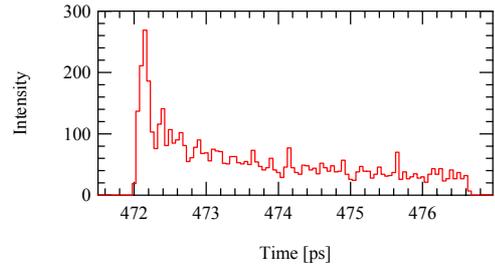


図4：ITC-RF gun出口でのビームの時間分布、 $(E_1, E_2) = (25, 50)$ MV/m, $\Delta\theta = +18^\circ$ 、最大エネルギーから2%のビームを表示している。

図4より、バンチ先頭部分のビーム強度が大きく、最大エネルギーから2%の電荷量は約30 pCである。このバンチ電荷量は設計値に近く、 $\Delta p/p$ を2%より小さくすることはバンチ電荷量をさらに減らすことになるので困難である。よって、 $\Delta p/p = 2\%$ のビーム電荷量を保持しながらITC-RF gun下流で短バンチ化することが必要である。

2.4 ITC-RF gun下流のビーム輸送系

ITC-RF gun下流のビーム輸送系には主に3つの要請がある。①ビームエネルギー広がり： $\Delta p/p$ 、②バンチ電荷量、③短バンチ化の3つである。ビームエネルギー広がりについてはコヒーレントテラヘルツ放射光源のリングの要請によりITC-RF gun出口でのビームのエネルギー広がりには2%より大きくすることは困難である。2.3で示したように十分な大きさの電荷量を得るためには $\Delta p/p = 2\%$ のビームを扱わなくてはならない。よって、ITC-RF gun下流のビーム輸送系では $\Delta p/p = 2\%$ のビームを効率よく短バンチ化する必要がある。バンチ長に関しては、ITC-RF gunからのビームを下流の磁気バンチ圧縮装置で短バンチ化することで目標のバンチ長(rmsで100 fs以下)となるように設計する。

バンチ圧縮の原理は異なる運動量 p_0, p_1 の粒子がある場所 s_1 から s_2 まで移動する間の時間差を用いることで行う。運動量 p_0 と p_1 の粒子の時間差は

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_1 - t_0 \\ &= \frac{L_1}{c\beta_1} - \frac{L_0}{c\beta_0} \\ &= \frac{L_1}{c\beta_0\beta_1} \{-L_0(\Delta\beta) + \beta_0(\Delta L)\} \end{aligned} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 t : s_1 から s_2 までの所要時間、 L : s_1 から s_2 までの経路長、 β : 光速に対する相対速度であり、添字の0は運動量 p_0 、1は運動量 p_1 の粒子に対応する。また、 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_0$, $\Delta L = L_1 - L_0$ である。 $p_0 < p_1$

として、これらの縦方向位相空間分布が図2のような関係にある場合、 $\Delta t > 0$ がバンチ圧縮の条件を表す。(1)式の第1項は粒子の速度差による項で各粒子が $\beta \approx 1$ のとき、つまり高エネルギーのときはほぼ0となり、第2項は経路長の差による項である。ITC-RF gunで加速される粒子のエネルギーは約2 MeVである。例えばgun下流で $s_2 - s_1 = 1.0$ mのときに $p_1/p_0 = 1.02$ の2つの粒子に対して(1)式の第1項を算出すると約-5 psとなり、バンチ長を大きくしてしまう効果として無視出来ない。(1)式の第2項の ΔL は

$$\Delta L = \Delta L_{\Delta p/p} + \Delta L_{\beta}$$

$$= \left\{ \int \frac{\eta(s)}{\rho(s)} ds \right\} \frac{\Delta p}{p} + \int \frac{x_{\beta}(s)}{\rho(s)} ds \quad (2)$$

と表せる。(2)式の第1項は偏向部でのエネルギー分散による経路差を表し、大きい運動量を持つ粒子の所要時間を大きくすることでバンチ長圧縮に利用できる。(2)式の第2項はベータatron振動の初期位相の差から生じる経路差増大の効果を表し、輸送系でのベータatron振動の位相進みを適切に設計することでこの効果を抑制できることが分かっている[1]。

磁気バンチ圧縮装置は2種類が考えられる。第1の方法は熱陰極RF電子銃からのビームバンチ圧縮によく用いられている α 電磁石を用いる方法である[4]。第2の方法はエネルギー広がりによる偏向電磁石中での経路差を用いる方法である。このときに縦方向位相空間分布の様々な傾き： $(\Delta p/p)/\Delta t$ に対応するために偏向部でのディスパージョンを変化させて R_{56} を変化させることが可能なTriple Bend Achromat (TBA)ラティスを用いることを検討している[5]。 $\Delta p/p = 2\%$ というエネルギー広がりを持つビームはディスパージョン部分でスリットを用いてエネルギー選択を行うことで得られると考えられる。2つの磁気バンチ圧縮装置のどちらの方法を採用するかは現在検討中である。

3. ITC-RF gunプロトタイプの製作

現在、ITC-RF gunプロトタイプの製作を行っている。プロトタイプの概観図を図5に示す。

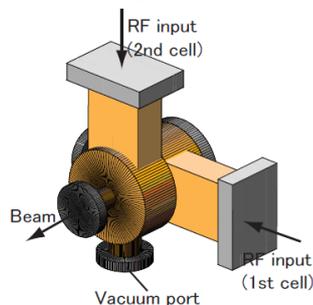


図5：ITC-RF gunプロトタイプの概観図

図5のようにITC-RF gunのRF入力ポートは2箇所ある。RF入力ポートに対向する位置に真空ポートを設置している。各セルの共振周波数調整のために空洞の外壁にネジ穴を1セル当り6箇所設けており、ネジで

外壁を締付けることで空洞形状を機械的に変形させ、個々の空洞の共振周波数を調整出来る。また、空洞の温度を制御することで全体の共振周波数を調整できる。さらに、第1セルのカソードを設置する端板には真空ガスケットがあるために端板のボルトの締め付け度合いでも共振周波数が変化するので、これを周波数調整用に用いる。

ITC-RF gunの入力RFシステムを図6に示す。

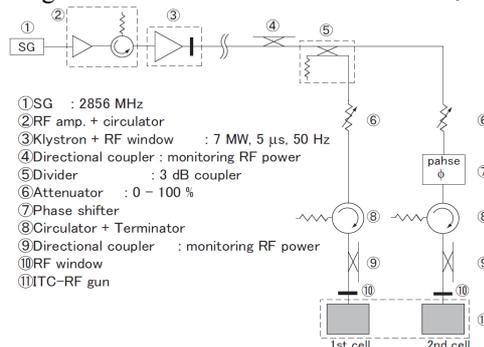


図6：ITC-RF gunの入力RFシステム

ITC-RF gunの2つの加速セルに異なる強度と位相のRFを入力させるために、各加速空洞の上流にはアッテネータ、第2セル側には位相器を設置し、セル間の位相差を制御する。

4. まとめ

コヒーレントテラヘルツ光源の開発に必要なビーム源としてITC-RF gunの設計を行っている。3次元FDTDシミュレーションの結果、各セルの電場強度と位相差を制御することでgun出口でのビーム特性を制御出来ることが分かり、規格化rmsエミッタンスに関しては約 1π mm mradという設計値を満足するビームがITC-RF gunで得られる可能性があることが分かった。ただし、バンチ圧縮に必要なgun下流のビーム輸送系に関しては今後詳細な検討を行う予定である。

ITC-RF gunプロトタイプ製作後に周波数測定などの基本的な特性確認も行う予定である。

参考文献

[1] H. Hama, et al., Proc. of the 27th International FEL Conf., Stanford, California U.S.A., pp. 1.
 [2] J.W. Lewellen, Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conf., Portland, Oregon U.S.A., pp. 2035.
 [3] H. Hama, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 528 (2004) 371.
 [4] H.A. Enge, Rev. Sci. Instrum. 34 (1963) 385; M. Borland, "A High-brightness Thermionic Microwave Electron Gun," Ph.D. Thesis, Stanford University, 1991.
 [5] M. Shimada et al., Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 495.