

Design study of an independently-tunable-cells thermionic RF gun by means of an FDTD simulation

Takumi Tanaka¹, Masayuki Kawai, Fujio Hinode, Akira Kurihara, Shigenobu Takahashi, Yoshinobu Shibasaki, Hiroyuki Hama

Laboratory of Nuclear Science, Graduate School of Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai 982-0826

Abstract

A thermionic RF gun has been studied to generate high-brightness and sub-picosecond short pulse beams for a light source of THz coherent radiation as a future project of Laboratory of Nuclear Science (LNS), Tohoku university [1]. The method of generating short pulse beams is a velocity-bunching like effect in cavity of the thermionic RF gun. The gun consists of two independently power feeding S-band RF cavities. The first cell is a cathode cell to extract electrons and the second one is an accelerating cell. This gun can be operated at modes with different RF-power ratio and phase between two RFs. The paper describes the results of numerical simulations for generating small 6-dimensional phase space beams by using this gun.

独立したセルからなる熱陰極RF電子銃のFDTDシミュレーションによる最適化設計

1. はじめに

これまで熱陰極RF電子銃から生成したマイクロバッチの短バッチ化の方法は電磁石を用いる方法が主流であった[2]。しかし、電磁石の磁場分布は特に端部で複雑であり、理想的な設置精度や磁場精度を確保するのは困難であると考えられる。

一方、2セルの熱陰極型のRF電子銃の粒子シミュレーション研究から、加速空洞の中で速度バンチング的な効果が起こり、短バッチをRF電子銃内で生成できる可能性を発見した。熱陰極RF電子銃の第1加速空洞では電子は加速電場が正方向に向き始めた時から加速され始め、後から加速された電子は先に加速された電子よりも短時間の内に大きな加速を受ける。結果的にバッチの先頭に多くの電子が集まる現象がシミュレーションで見られた。さらに第2セルでも短バッチ化を効率的に発生させるためには、第1セルでの加速電圧に依存する電子の到達時間と速度が非常に重要であるが、複数セルの加速空洞の入力RFのパワーと位相を各セルで独立に制御することによって、各パラメータを最適化できると考えた。このような制御方法のRF電子銃はJ.W.Lewellenにより発案され既に研究が進められている[3]。入力RFを各セルで独立に制御するための実現方法はセル間のRF結合定数を出来るだけ小さくすることである。また、短バッチ化以外にも高輝度化のために横方向のエミッタンスも小さくなるように空洞内の電場分布を最適化しなくてはならない。

以上のような課題について熱陰極RF電子銃の特性を調べ、最適化設計するために基本的な計算をSUPERFISHを用いて行い、3次元FDTD（時間領域

差分法）計算コードを用いて数値シミュレーションを行った[4]。熱陰極RF電子銃を用いる利点は構成する機器が単純かつコンパクト、さらに安価なことである。また約 10π mm mrad以下の低エミッタンスで μ sec程度のマクロパルスビームを生成できるので、ブースターリングへの入射のための電子ビーム源としても好都合である。しかし熱陰極RF電子銃は特有の、逆流電子によるBack-Bombardment効果（BB効果）のために陰極からの放出電流量が不安定になる問題もある[5]。BB効果はRF電子銃の加速空洞に外部から偏向磁場を印加するという経験的方法や放出電流量を少なくする方法で抑えられることがこれまでに知られている。

熱陰極RF電子銃の目標とする性能および主なパラメータを表1に示す。

表 1:ITC-RF gunの目標パラメータ

RF frequency	2,856 MHz (S-band)
Energy @ exit of gun	~ 2 MeV
Velocity: $\beta = v/c$	0.968 @ 2 MeV
Number of cells	2
Bunch length (rms)	Several hundred fs
Bunch charge	~ 0.1 nC
Macropulse duration	~ 1 μ s
Macropulse current	~ 280 mA
$\epsilon_{\text{norm,rms}}$	< 10π mm mrad
Material of cathode	LaB ₆
Cathode radius	~ 2 mm

¹ E-mail: kasokuki@tree.odn.ne.jp

2 . ITC-RF gunの設計

本研究で考案した、2セルの加速空洞からなり、各セルで入力RFが独立制御可能な熱陰極RF電子銃をIndependently Tunable Cells RF gun (ITC-RF gun)と呼ぶことにする。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で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。

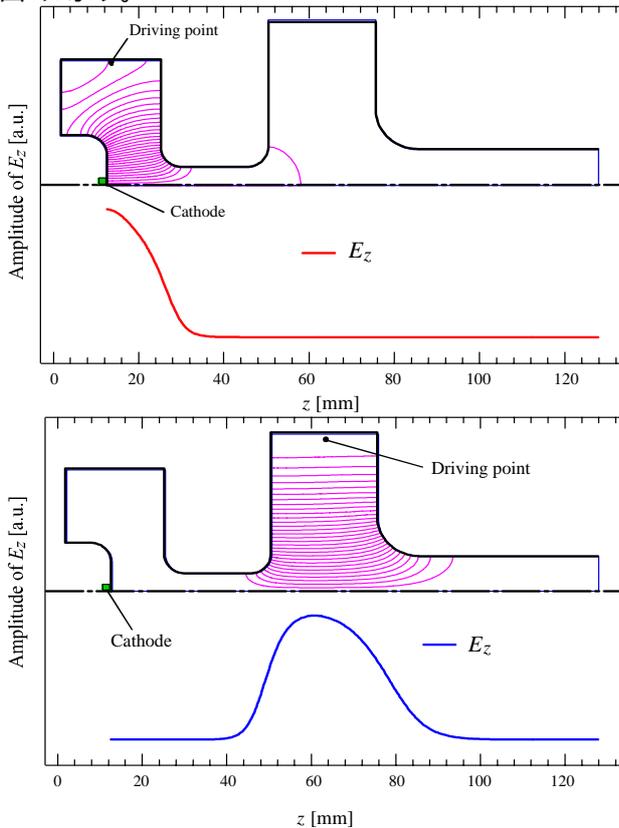


図 1 : 各セルを励振したときのビーム軸上の電場 E_z の分布。上は第1セルを励振させた状態、下は第2セルを励振させた状態。

図1の上図より、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。

3 . FDTDシミュレーション

3.1 FDTD3次元シミュレーション

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。熱陰極RF電子銃の全体的な特徴を理解することを目的として3次元FDTD法を用いた数値シミュレーションコードを用いた計算結果を以下で示す。

3.2 第1セルでのビーム

熱陰極RF電子銃ではRFの半周期ごとに加速位相になるので、第1セルで加速されるビームの先頭はRF半周期の時間で第2セルの入り口に来ることが要求される。このためには第1セルの加速方向の電場強度： $|E_z|$ と陰極表面から第1セルの終わりまでの距離が重要である。また、第2セルで効率良く速度バンチングを行わせるために第1セルでのビームエネルギーが大きくなり過ぎないようにする必要がある。図1のような形状のITC-RF gunで第1セルの電場強度： $|E_z|$ の最適値を調べるために、第1セルのカソード表面での電場強度： $|E_z(\text{cath.})|$ を変化させたときに、電場の加速位相から半周期後の時間が過ぎたときのビームの z 軸方向の分布についてのシミュレーション結果を図2に示す。

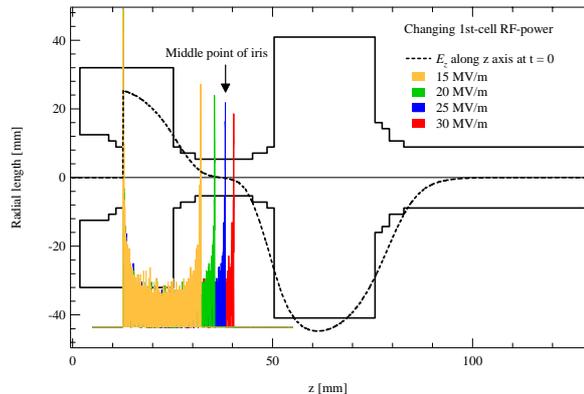


図 2 : 第1セルのカソード表面の電場強度： $|E_z(\text{cath.})|$ を変化させたときの加速位相から半周期後のビームの z 軸方向の強度分布。

図2から第1セルの電場強度： $|E_z|$ の最適値は $|E_z(\text{cath.})| = 25 \text{ MV/m}$ となることが分かる。また、第1セル出口では先頭にビームが集まっており、この部分を短バンチのビームとして利用することを考え、第2セルでさらにバンチ先頭部分をバンチ圧縮する。

電場強度： $|E_z(\text{cath.})|$ が 25 MV/m のとき、第1セル出口でのバンチ先頭部分の電子のエネルギーは約 0.75 MeV で、速度は光速の約75%である。

3.3 ITC-RF gun出口でのビーム

3.2より第1セルの電場強度は $|E_z(\text{cath.})| = 25 \text{ MV/m}$ となる条件で以降の計算を行った。また、今回はセル間の位相差は π -mode的に運転することを考えて、第2セルの位相は固定してシミュレーションを行っ

た。ここで、第2セルの電場強度の最大値を $|E_z(2nd)|$ と表す。

ITC-RF gun出口での縦方向位相空間上のビームの分布を調べた結果、今回の条件では $|E_z(2nd)|$ の違いによる縦方向位相空間の形状は大きく変化しないことが分かった。典型的な縦方向位相空間分布を図3に示す。

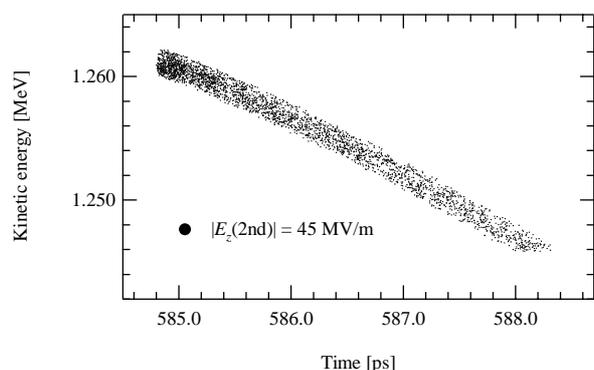


図 3 : Gun出口でのビームの縦方向位相空間。最大エネルギーから1%の偏差を持つ電子をプロットした。 $|E_z(2nd)| = 45$ MV/m。

図3のように縦方向位相空間の形状は時間に対しエネルギーがほぼ線形に変化していることが分かる。このことより、バンチの先頭側は電子のエネルギーが大きくなるので、ITC-RF gunの下流でエネルギー選択を行うことで短バンチのビームが生成できると考えられる。

$|E_z(2nd)|$ を変化させたときにITC-RF gun出口でのビーム強度の時間分布がどのように変化するかを調べた結果を図4に示す。ただし、最大エネルギーの電子から1%のエネルギー偏差の電子を扱うこととする(以降の計算結果も同様)。

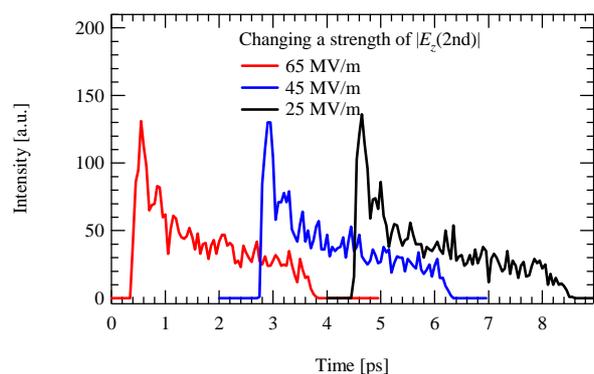


図 4 : $|E_z(2nd)|$ を変化させたときのITC-RF gun出口でのビーム強度の時間分布。

図4のようにITC-RF gun出口でビーム電流は先頭に集まっている。以上のシミュレーションでは半径

2 mmのLaB₆カソードを考慮して、電子の放出量を200 A/cm²とした。

$|E_z(2nd)|$ を変化させたときの横方向位相空間の規格化エミッタンスを図5に示す。

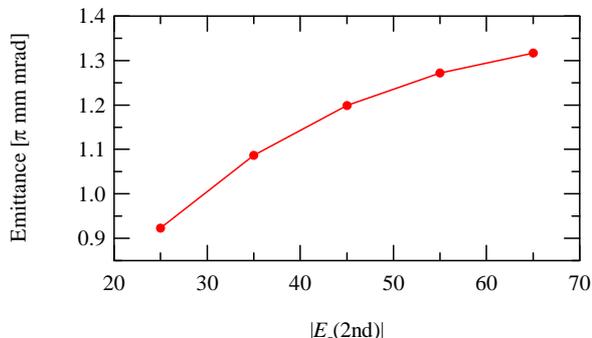


図 5 : 横方向位相空間の規格化エミッタンス

図5のように $|E_z(2nd)|$ が大きくなるほどエミッタンスも大きくなっている原因はITC-RF gunの第2セルの中の横方向の電場強度が大きくなっているためだと考えられる。ITC-RF gunでは1マイクロバンチあたりの電荷量は0.2 nC程度であることがシミュレーションから得られており、空間電荷の効果が大きく影響する領域ではないと考えられるので、上記の横方向電場の強さがエミッタンス増加の主な原因だと考えられる。

4. まとめ

ITC-RF gunを用いて高輝度かつ短バンチのビームを生成できる可能性があることが分かった。シミュレーションの結果からgun出口でのビームの先頭から1 psを選んだときに電荷量は約0.9 nCとなった。これは表1のITC-RF gunの目標パラメータに近い値である。

今後のさらなるシミュレーションでの第2セルのRFパワーと位相の最適化を行うことで、目標とするビームが生成できるかを調べる予定である。

参考文献

- [1] H. Hama, et al., "Status of LNS accelerator complex and future plan of coherent radiation facility using an isochronous-bend ring," in this proceedings.
- [2] H.A. Enge, Rev. Sci. Instrum. 34 (1963) 385; M. Borland, "A High-brightness Thermionic Microwave Electron Gun," Ph.D. Thesis, Stanford University, 1991.
- [3] J.W. Lewellen, Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conf., Portland, Oregon U.S.A., pp. 2035.
- [4] H. Hama, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 528 (2004) 371.
- [5] C.B. McKee and J.M.J. Madey, Nucl. Instr. and Meth. A 296 (1990) 716.