

Design of multi-bunch beam generation using photocathode RF Gun at Waseda University

Yuta Kato^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Tatsuya Suzuki^{A)}, Aki Murata^{A)}, Masakazu Washio^{A)}
Junji Urakawa^{B)}, Masao Kuriki^{B)}, Toshikazu Takatomi^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)}
Ryunosuke Kuroda^{C)}, Yoshio Kamiya^{D)}, Shigeru Kashiwagi^{E)}

A) Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)
17, Kikui-chou, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

C) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8568

D) International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo (ICEPP)
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

E) The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (ISIR)
8-1, Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka, 567-0047

Abstract

At Waseda University, we are developing an improved type photocathode RF-gun which is able to establish a Cs-Te cathode with high quantum efficiency. With a Cs-Te cathode, we can achieve a high current electron beam and a multi-bunch electron beam. To generate a multi-bunch electron beam, energy difference between bunch to bunch should be considered. In this conference, I will report the experimental results of the new RF-gun cavity and the calculated results of beam loading effect of the multi-bunch electron beam.

早稲田大学におけるフォトカソードRF電子銃を用いた マルチバンチビーム生成計画

1. はじめに

現在早稲田大学では、高量子効率を持つCs-Teカソードを装着可能な改良型フォトカソードRF電子銃空胴をKEKと共同で開発しており[1]、すでに早稲田大学への設置を完了した。これまで早稲田大学では、銅カソードにより生成したシングルバンチビームを用いて逆コンプトン散乱を用いた軟X線生成[2]、放射線化学初期過程解明のためのパルスラジオリシス実験[3]等の応用実験を行ってきた。開発中の改良型RF電子銃では、高量子効率であるCs-Teカソードを用いることにより、これまでよりも高電荷量の電子バンチを得ることができるとともに、マルチバンチ電子ビームの生成を行うことが可能になる。

高電荷量の電子ビーム生成が可能になることで、パルスラジオリシス実験のS/Nの向上が見込まれ、小さな変化を伴う放射線化学反応の解析が可能となる。また、マルチバンチビームを生成することで、逆コンプトン散乱の単位時間当たりの衝突回数を向上させることができ、約2桁の生成X線数の増大が見込まれる。電子銃空胴内で加速される電子ビームが

シングルバンチからマルチバンチへと変わることによって、バンチトレイン内のエネルギー差を補正することが必要になってくる。

本講演では、このマルチバンチビーム生成に向けた改良型フォトカソードRF電子銃空胴の性能評価試験結果及び、マルチバンチビーム生成の検討結果について報告する。

2. RF電子銃空胴性能評価試験

2.1 Q値と結合定数の測定

マルチバンチビーム生成を検討する際に重要となってくる空胴のパラメータとして、空胴の質を表すQ値、空胴とRF印加用導波管との結合定数 β 及び空胴のシャントインピーダンスRがあげられる。Q値及び結合定数はネットワークアナライザによって、シャントインピーダンスはビーズ摂動法を用いて測定した。

測定は大気圧下で行い、Agilent社のネットワークアナライザ(E8363B)を用いて行った。以下にその測定結果を示す。図1に反射法による空胴の共振測

定結果、図2にそのスミスチャート上での反射波の波形を示している。また、表1に測定されたパラメータを示した。

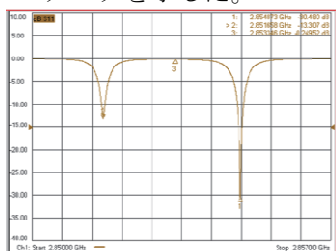


図1. 共振周波数測定結果

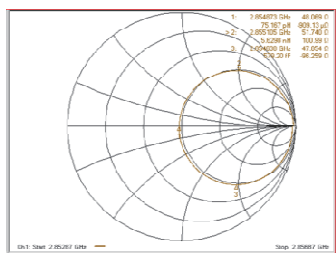


図2. スミスチャート

図1においてグラフの右側のピークがRF-Gun空腔の加速モードである、 π モードの共振周波数を表している。

表1: RF-Gun空腔 π モードの測定結果

共振周波数	2.854873 [GHz]
Q値	12228.1
結合定数	1.0217

表1を見て明らかなように、結合定数がほぼ1に調整されているのがわかる。また、今回改良した新空腔はRF-Gunの端板やチューナーを変更することでほとんど穴のない構造となっている。[1]これにより、Q値が約12000となっており、既存の空腔よりも大きな値を得ることができた。

2.2 空腔内電界分布の測定

ビーズ摂動法により、高周波空腔内の電界分布を求めた。微小な摂動として空腔内に体積 ΔV 、半径 r の導球体のビーズを移動させて、基本周波数からの周波数変化をネットワークアナライザで計測した。図3にビーズ摂動法のセットアップ図を示す。制御用PCでモーターを動かし、空腔内でビーズを移動させている。また、ビーズの移動距離はエンコーダーによって、ビーズ位置を正確にモニターしている。

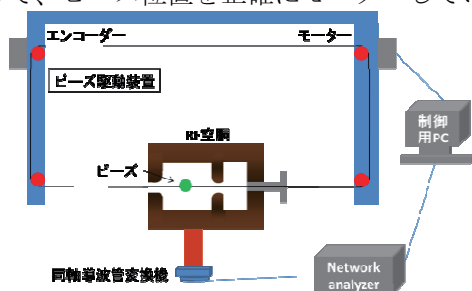


図3. ビーズ摂動法セットアップ図

本測定において、摂動による周波数変化を積分することによりR/Qを求めることができ、次式で与えられる。

$$\frac{R}{Q} = \frac{\left| \int \sqrt{|\Delta f|} |dz| \right|^2}{\pi f_0^2 \epsilon \Delta V} \quad (1)$$

図6に空腔内電界分布の測定結果を、表2にRF空腔パラメータの測定結果をまとめた。図4より、空腔内でハーフセルとフルセルの電場強度比はほぼ1:1となっていることがわかる。

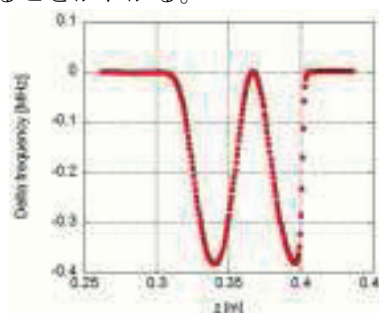


図4. 空腔内電界分布測定結果

表2: RF空腔パラメータ測定結果

R/Q	535.57
シャントインピーダンス	6.549 [M Ω]

3. マルチバンチビームローディング

マルチバンチビームを生成し、空腔内で加速する際に問題になる事柄としてバンチトレイン内のエネルギー差が挙げられる。ビームのエネルギー差は空腔内に蓄積されるRFのパワー及び前方のバンチの影響によるビームローディングなどによって引き起こされる。マルチバンチビームを加速した場合、マルチバンチ前方のバンチが空腔を通過する際に励起した電磁場は、そのバンチが通過した後もその空腔の共振モードで存在し続ける。そして、この電磁波が空腔内で減衰する前に後続のバンチが空腔に入射してくるために、後続のバンチがこの波(long range wake field)の影響で減速力を受けることをマルチバンチビームローディングと言う。したがって、マルチバンチビームをリニアックで加速すると先頭のバンチから後方のバンチになるにつれて、エネルギーゲインが小さくなってしまい、マルチバンチ内にエネルギー差が生じてしまう。図5に前方のバンチによって励起された電磁場が後方のバンチを減速させる様子を示す。

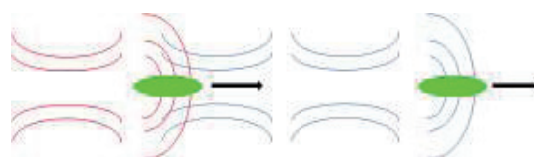


図5. ビームローディング(long range wake field)

4. エネルギー補正の計算

共振周波数、Q値、結合定数 β などの測定値から空腔電圧を求め、空腔内高周波電力の過渡状態におけるバンチトレインのマルチバンチビームローディング及び空腔に励起される電圧を求めた。

空腔内の電磁場の減衰時間は電磁場の強度が $1/e$ になる時間（フィリングタイム： t_f ）を用いて以下のように与えられる。

$$t_f = \frac{2Q_0}{\omega_0(1+\beta)} \quad (2)$$

新RF-Gun空腔におけるフィリングタイムは3章での測定結果から $t_f=0.67 \mu \text{ sec}$ と求まる。この値はバンチ間隔(t_b) 8.4 nsec よりずっと大きいのでビームローディングが生じることになる。

まず、空腔内のRFパワーの変化に関して考える。RFが入り始めてから時間 t 経過後の空腔内の加速電圧は、

$$V_c = \frac{2\sqrt{\beta R_s P_0}}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_f}}\right) \quad (3)$$

となる。ここで P_0 は入射RFのピークパワーを表す。早稲田大学におけるRFピークパワーは、 $P_0=10 \text{ MW}$ である。10MWのRFを空腔に印加した場合の加速電圧の時間変動を以下の図6に示す。図6中の(赤線)がビームローディングを考えない場合の空腔内の加速電圧の時間変動を示す。空腔内の加速電圧はフィリングタイムにしたがって指数関数的に立ち上がるため、前方のバンチの受ける加速電圧よりも後続のバンチの受ける加速電圧の方が大きくなっていることがわかる。

あるバンチ(点電荷 q)が空腔内を通過した時に誘起する電圧を V_{b0} とすると、次のバンチが通過する時には空腔のフィリングタイムに依存して減衰しており、以下の V_b のように与えられる。

$$V_b = V_{b0} e^{-\tau} \quad (4)$$

ここで、 V_{b0} は以下の式で与えられる。

$$V_{b0} = \frac{\omega_0 R_s q}{2Q_0} \quad (5)$$

また、 τ は $\tau=t_b/t_f$ で与えられ、 $\tau=1.98 \text{ msec}$ と求まる。

マルチバンチビームが発生している際、一つのバンチは多数の前のバンチの影響を受ける。したがって、 $N-1$ 番目のバンチが受ける前のバンチによって誘起された電圧は以下のように表される。

$$V_b = V_{b0} \left(\frac{1 - e^{-(N-1)\tau}}{1 - e^{-\tau}} - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

この式は $(N-1)$ 番目のビームが受けるビームローディングを示している。式(3)とあわせると、ビームローディングを含めた $(N+1)$ 番目のバンチが受けるトータル電圧値は以下ようになる。

$$V_{\text{total}} = \frac{2\sqrt{\beta R_s P_0}}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_f}}\right) - V_{b0} \left(\frac{1 - e^{-(N-1)\tau}}{1 - e^{-\tau}} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

以上の式より計算したビームローディングの結果を図6の緑線、青線に示す。

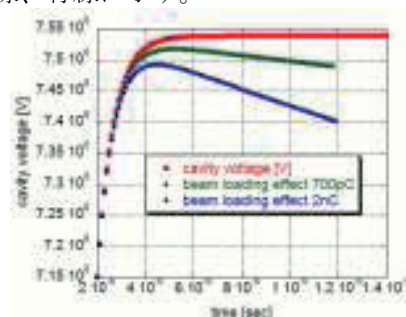


図6. 空腔内の加速電圧

ここで電荷量 q はX線生成実験に通常使用している700pC、バンチ数は100バンチを計算に用いている。図6の赤線で示されているものがビームローディングがない時の加速電圧で、緑線がビームローディングの影響を含めた場合である。先頭のバンチの入射タイミングは本計算では $2 \mu \text{ sec}$ に設定している。図6より、およそ5%のエネルギー差が表れていることがわかる。参考として電荷量2nCの時のビームローディングの影響を含めた場合を示した(青線)。図から明らかなように電荷量が増えるほどビームローディングの影響による電圧値の降下が大きくなることがわかる。

5. まとめと今後の予定

改良型RF電子銃空腔の空腔評価試験の結果及びこの結果から予測されるビームローディングの効果を計算した。

空腔の性質としては、空腔構造を改良したことにより既存のRF-Gunよりも良い結果が得られた。また、マルチバンチビーム生成に関する検討では加速電圧の時間変化、ビームローディングを考えることで5%程度のエネルギー差が生じてしまうことを確認した。今後、クライストロンで生成するRF波形を整形することによって、バンチ間のエネルギー差を補正していく予定である。

参考文献

- [1] A.Murata et al, Proceedings of this meeting FP16
- [2] A.Masuda et al., Proceedings of this meeting TP52
- [3] K.Komiya et al., Proceedings of this meeting WP09
- [4] P. B. Wilson, "High Energy Electron Linacs: Applications to Storage Ring RF Systems And Linear Colliders", SLAC-PUB-2884, Nov. 1991.

※Work supported by MEXT High Tech Research Project HRC707, JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B)(2) 16340079, and JSPS Fellows (19-5789).