

Development of photocathode rf electron gun for ultra-short bunch generation*

Kazuyuki Sakaue^{† A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Masataka Mizugaki^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Junji Urakawa^{B)},
Toshikazu Takatomi^{B)}, Ryunosuke Kuroda^{C)},

^{A)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

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

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

Abstract

We have been developing an S-band photocathode rf electron gun at Waseda university. Our rf-gun cavity was firstly designed by BNL and then, modified by our group. In this paper, we will introduce a newly designed rf-gun cavity with energy chirping cell (ECC). To generate an energy chirped electron bunch, we attached extra-cell for 1.6cell rf-gun cavity. Cavity design was done by Superfish and particle tracing by GPT/PARMELA. By optimizing the chirping cell, we observed linear chirped electron bunch and it can be compressed by the velocity bunching through the 2.3m drift space down to 100fsec. This cavity was already manufactured on the collaboration with KEK. In this conference, the design of ECC-RF-Gun, the results of low level test and plan of beam test will be presented.

極短バンチ生成用光陰極高周波電子銃開発

1. はじめに

早稲田大学では高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同でフォトカソード RF 電子銃空胴に関する研究を行ってきた。我々のフォトカソード RF 電子銃空胴は BNL Type をベースとしており、これにチューナー構造の改善^[1] やモードセパレーションを広げる設計^[2] を施すことで、十分な Q 値を持ちつつダークカレントを抑えた電子銃空胴を実現している。

RF 電子銃はそれ単体にて約 5MeV のエネルギーかつ低エミッタンスのビームが得られることから、様々な応用が可能である。早稲田大学においても放射線反応を解析するパルスラジオリシス研究^[3] やレーザーコンプトン散乱研究^[4] に応用している。これらの応用研究において、電子バンチ長をフェムト秒領域まで短くすることは非常に大きな意味があり、パルスラジオリシス研究では時間分解能の向上、レーザーコンプトン散乱においてはルミノシティの向上が見込まれる。また、これらの応用研究以外にも他の可能性を拓く可能性があり、コヒーレント放射によるテラヘルツ光発生などが挙げられる。

そこで我々は従来の空胴に特殊な形状の Energy Chirp Cell (ECC) を付加することによって電子銃から出てくる電子バンチのエネルギーを線形にチャープし、フェムト秒の時間幅まで圧縮できる電子銃を考案した。本講演では、フェムト秒電子バンチ生成用に設計した Energy Chirp Cell attached RF-Gun cavity (ECC-RF-Gun) の最適化設計、GPT/PARMELA を用いたビームシミュレーション及び製作した ECC-RF-Gun 空胴の評価に関して報告する。

2. ECC-RF-GUN の最適化設計

フォトカソード RF 電子銃はカソードと RF 加速空胴が一体化しており、発生した電子は即座に相対論領域のエネルギーまで加速される。カソードで発生する電子はレーザー光によって生成されるため、レーザーのサイズ・時間幅によって生成時の電子プロファイルは制御することが可能である。しかしながら、フェムト秒のレーザーをカソードに入射しても必ずしもフェムト秒の電子ビームは得られない。ビームシミュレーションでは、カソードから電子が発生した直後のエネルギーがまだ十分ではない時に空間電荷効果によってバンチ長が広がってしまっており、得られるバンチ長は 1ps 程度である。これを抑えるためにはバンチ内電荷量を数 pC まで下げる必要がある。

そこで我々は数 100pC の電荷量を持ちつつフェムト秒バンチを得るために新たな加速空胴形状を提案した^[5]。まず以下の図 1 に設計した ECC-RF-Gun 空胴を示す。

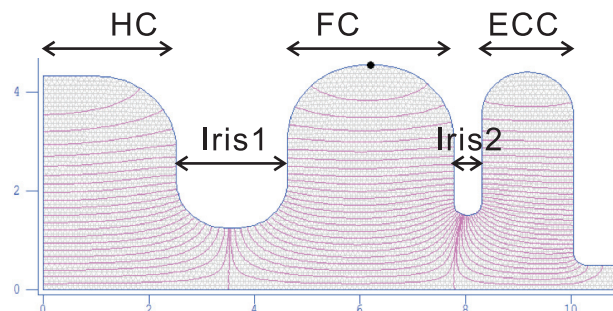


図 1: Design Structure of ECC-RF-Gun

図 1 は SUPERFISH のシミュレーション図となっており、X 軸を軸として 1 回転させた構造が実際の空胴構造

* Work supported by JSPS Grant-in-Aid for Young Scientists (B) 23740203

[†] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

となる。図にも示している通り、通常の RF-Gun である Half Cell と Full Cell の2つの Cell に対して ECC (Energy Chirp Cell) を加えた構造となっている。この ECC においてバンチ内のエネルギーをチャープし、前方がエネルギーが低く、後方ほど高いようなエネルギー分布を実現することができる。さらにエネルギー分布を線形に与えることによって後方の電子がその速度差によって前方の電子に追いつき、バンチを圧縮することができる。原理の詳細に関しては^[5]を参照されたい。図1はすでに最適化後の空洞形状を示している。実際には SUPERFISH にて空洞形状を作成し、PARMELA や GPT によって生成電子のシミュレーションを行い、イタレーションすることによって形状を決定した。最適化後の ECC-RF-Gun の寸法を従来の Gun との比較で以下の表1に示す。表1

表 1: Scale of Traditional RF-Gun and ECC-RF-Gun ($\lambda=105\text{mm}$)

Traditional RF-Gun			
	HC	FC	
Cell Length	$6\lambda/25$	$3\lambda/10$	
	Iris1		
Iris Length	$\lambda/5$		
ECC-RF-Gun			
	HC	FC	ECC
Cell Length	$6\lambda/25$	$3\lambda/10$	$\lambda/6$
	Iris1	Iris2	
Iris Length	$\lambda/5$	$\lambda/20$	

に示す通り、ECC は特殊な形状を採用していることがわかる。Cell 間を分けている Iris 及び Cell 自身の長さを表のようにすることによって ECC 内にて電子バンチに作用する高周波電場の位相を最適な位相に合わせている。このような形状で得られる電子銃空洞の共振周波数及び Q 値を以下の表2に示す。表2を見てわかる通り、

表 2: Parameters of ECC-RF-Gun Cavity

Q value	13289.6		
	0-mode	$\pi/2$ -mode	π -mode
Resonant Freq. [MHz]	2786.5	2853.0	2856.0
	HC	FC	ECC
Field Balance	1	1	1.5

特殊な形状を採用しているにも関わらず十分な Q 値とモード間の周波数差が得られていることがわかる。これはこれまでの RF-Gun 開発にて培ったモードセパレーション型 RF-Gun^[2]の経験によって得られている。

3. ECC-RF-GUN によって生成される電子ビームの性質

このように設計した ECC-RF-Gun から生成される電子ビームの特徴を GPT によってシミュレーションを行った。同様のシミュレーションを PARMELA を用いて行っ

ているが、ほぼ同等の結果が得られたことをここに注記しておく。その差は1割以下であり、両シミュレーションで同等の成果が得られたことからこの結果は非常に信頼性の高いものと考えている。

まずは ECC-RF-Gun によって生成された電子ビームの縦方向位相空間分布を以下の図2(電子銃直後)と図3(電子バンチ圧縮点)に示す。シミュレーションはバンチ電荷 100pC、カソード上の電場強度 100MV/m の条件の下で行った。

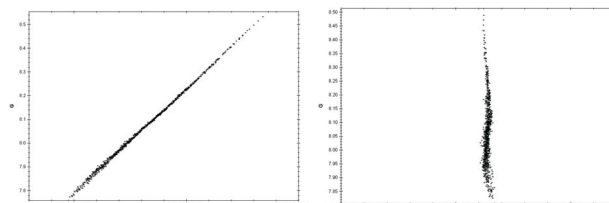


図 2: Phase Space Distribution at $z=20\text{cm}$ 図 3: Phase Space Distribution at $z=230\text{cm}$

図2に示す通り、電子銃直後の位相空間分布は非常にきれいに線形なエネルギーチャープが実現されており、かつ前方のエネルギーが低く、後方が高いことがわかる。さらにバンチ圧縮点であるカソードから 230cm の位置では位相空間分布が立っている状態が実現されていることがわかる。つまりバンチ圧縮が実現されていることが位相空間分布からわかる。

シミュレーションでは様々なパラメータによるバンチ長の変化を計算した。カソード上電場強度やバンチ電荷はもちろん、電子銃直後に設置しているソレノイドの強度や初期ビームサイズなどによってバンチ長は様々な変化することがわかっている。ここでは加速位相に対する変化に関してのみ示すこととする。加速位相を変えた際のバンチ長の変動を図4に、それぞれの加速位相における最小バンチ長とその到達距離を図5に示す。

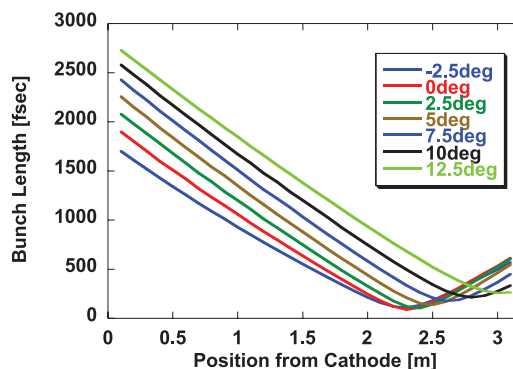


図 4: Bunch length transit

図4を見てわかる通り、どの加速位相においても電子銃直後には 2.5ps 程度だったバンチ長が自由空間を進行するごと圧縮されていることがわかる。最小バンチ長は 2~3m で得られており、最小バンチ長は加速位相 0 度において達成されている。図5には最小バンチ長と到達距離がプロットしてあるが、バンチ長の最小値としては、88.4fs と 100fs を切る極短バンチが得られていることが

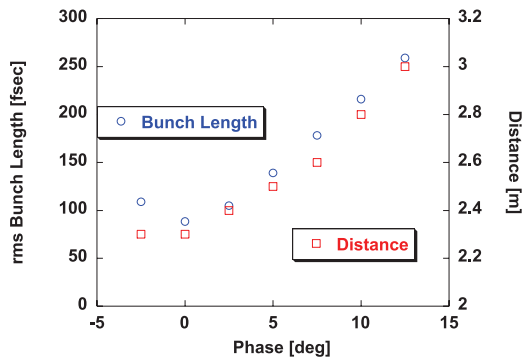


図 5: Minimum bunch length and Distance from cathode

わかる。また、到達距離もカソードから 2.3m 程度とそこまで大きくない距離となっており、早稲田大学でも十分試験可能であると判断した。GPT によって得られた最適な運転条件をまとめた表を以下に示す。

表 3: Optimum parameters and beam parameters of ECC-RF-Gun

初期バンチ長	最小バンチ長	電荷量
4.25ps (rms)	88.4fs (rms)	100pC
エネルギー	エミッタンス	加速位相
4.5MeV	4.2π mmrad	0 度 (GPT 内位相)
ソレノイド磁場	初期サイズ	加速電場
1050Gauss	0.4 (rms)	100MV/m

4. ECC-RF-GUN の製作

このように設計した ECC-RF-Gun を KEK 工作センターにて製作した。これまでの RF-Gun 同様に周波数測定と追い込み加工を行い、ダイヤモンドバイト加工によって仕上げ加工を行った後、ロウ付けを行った。完成した ECC-RF-Gun の写真を図 6 に示す。また、完成後のネットワークアナライザによる測定結果を図 7 に示す。

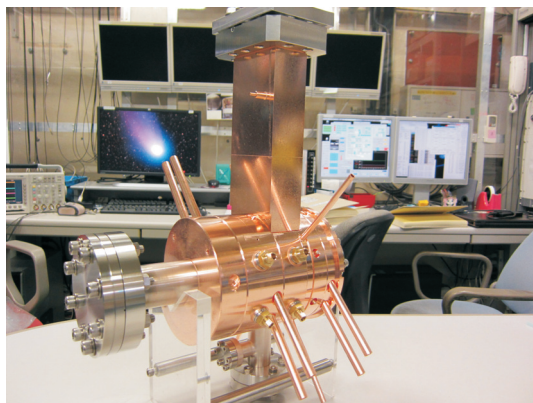


図 6: Structure of Normal 2.6cell RF-Gun

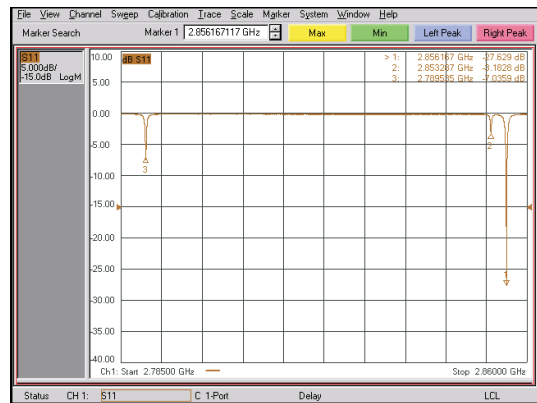


図 7: Structure of ECC-RF-Gun

図 7 を見てわかる通り、ターゲットの運転周波数である 2856MHz 近傍に π モードの共振が見られるとともに十分なモード間隔と結合が π モード (最も周波数の高いモード) において得られていることがわかる。この時の Q 値は約 10000 と計算値よりは多少低いものの十分な値が得られた。

5. まとめと今後の予定

我々がこれまで行ってきた RF 電子銃の改良を基に極端バンチ電子ビーム生成に特化した RF 電子銃空胴を考案・設計した。最適設計を行うことによって最適運転条件においては 100fs を切るバンチ長を得られる電子銃を設計することができた。本 ECC-RF-Gun は自由空間を進行させて速度差によりバンチングを行うが、その必要な距離も 2.3m 程度と十分早稲田大学でも試験できるスケールに納めることができた。これらのシミュレーション結果は GPT 及び PARMELA の両方で確認しており、信頼に足る結果であると考えている。この設計を基にすでに ECC-RF-Gun 本体の製作を完了しており、今後ビーム生成試験を行っていく予定である。特にこのような極短バンチの実証という意味では計測方法が必要となってくる。そこで我々は 100fs 程度まで計測可能な RF 偏向空胴の設計も進めており [6]、これを用いて極短バンチ生成の実証を行う予定である。将来的には十分に短いバンチが得られていればコヒーレントテラヘルツ光源 [7] などへの応用を模索していく予定である。

参考文献

- [1] N. Terunuma et al., Nucl. Instrum. Meth. A613(2010)1.
- [2] A. Deshpande et al., Nucl. Instrum. Meth. A600(2009)361.
- [3] Y. Hosaka et al., Radi. Phys. Chem. in press.
- [4] K. Sakaue et al., Radi. Phys. Chem. 77(2008)1136.
- [5] K. Sakaue et al., Proc. of PASJ 2011.
- [6] Y. Nishimura, Proc. of this conference WEPS088.
- [7] R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Meth. A637(2011)S30.