

DEVELOPMENT OF RF ELECTRON GUN WITH ENERGY CHIRP CELL FOR ULTRA-SHORT BUNCH GENERATION

Kazuyuki Sakaue^{†A)}, Tatsuro Aoki^{A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Toshikazu Takatomi^{B)},

^{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

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. 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 PARMELA. By optimizing the chirping cell, we observed linear chirped electron bunch. The front electron have lower energy than rear. Then transporting about 2m, the bunch can be compressed down to 200fsec electron bunch with the charge of 100pC. This ultrashort bunch will be able to use for generating CSR THz radiation, pumping some material to be studied by pulse radiolysis method, and so on. In this conference, the design of chirping cell attached rf-gun, the results of tracing simulation and plan of manufacturing will be presented.

極短バンチ電子ビーム生成用エネルギーチャープセル付高周波電子銃開発

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) の原理と設計の方針、及び PARMELA を用いたビームシミュレーションに関して報告する。

2. ECC-RF-GUN の原理

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、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設計した。原理としては前述の通り、加速空胴を出た段階で電子バンチ内で線形にエネルギー分布を作り、その速度差によってバンチングを行う。バンチングするには十分なエネルギーが必要であるため、現状の RF 電子銃である 1.6Cell タイプにもう 1Cell 付属するような形でエネルギーをチャープする Cell を付ける方式を採用した。単独の Cell を用いた方が強度や位相なども自由に変えることができるが、現在の早稲田大学のシステムでの導入を見込むために 1 つの RF 源からドライブできる形を採用した。原理の模式図を以下の図に示す。

図 1 に示すようにバンチ内で線形にエネルギーチャープを生成し、その速度差によってバンチングをする。 $z(t)-P_z(E)$ の位相空間において分布を縦長に立てることによって短いバンチが得られることがわかる。我々の用いる 5MeV 以下の電子ビームエネルギーでは、電子ビームの速度は光速の 99.5% 程度であり、数 m ドリフト空間を進行させるだけで mm 程度の進行距離の差をつけ

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

[†] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

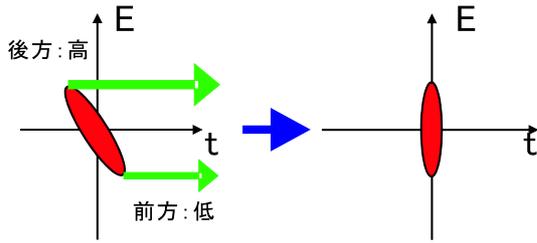


図 1: Principle of Bunching

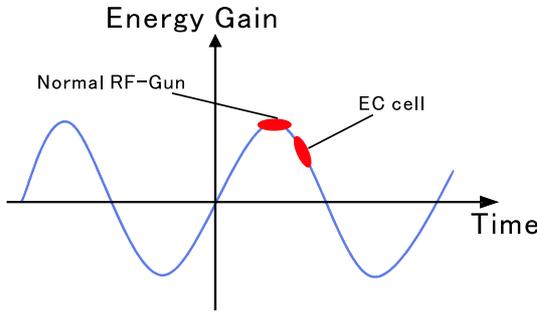


図 2: Schematic of ECcell

ることが可能である。

図 2 にはエネルギーチャープの概念図を示している。RF 電子銃は通常最大の加速電圧が得られるようにセルの長さを決めている。ほぼ高速に近づいている領域では、加速 RF の半波長分に相当する。ECcell においては、この加速電圧のピークを用いるのではなく、図 2 に示すような位相で入射することによってエネルギーチャープを行う。これが我々の設計している ECC-RF-Gun の原理である。

3. ECC-RF-GUN の設計

このような空洞を設計するのに SUPERFISH を使い、これによって生成される電子ビームを予想するのに PARMELA を用いて計算を行った。

まずは空洞の設計に関して述べることにする。図 3 に通常の RF 電子銃の 2.6cell 版の構造と計算結果を、図 4 に ECC-RF-Gun の構造と計算結果を示す。

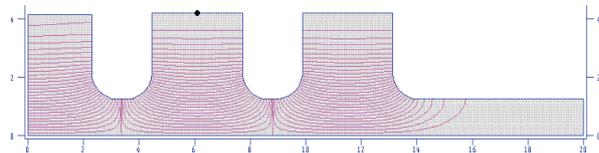


図 3: Structure of Normal 2.6cell RF-Gun

それぞれの図は横軸が z 軸となり、電子の進行方向を示しており、この z 軸で回転させた形状が実際の空洞となる。カソードは $z=0$ の位置であり、どちらも π モードを用いて加速を行う。通常 RF 電子銃は前述の通り、電子ほぼ光速に達するとともに最大の加速電圧が得られるように加速 RF(2856MHz) の半波長の長さの Cell が連続して並ぶような構造となる。左側の Cell からそれぞれ、Half Cell (HC)、Full Cell(FC) と呼んでおり、通常の

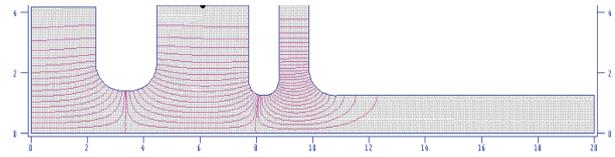


図 4: Structure of ECC-RF-Gun

RF 電子銃では FC が連なる形状となる。ECC-RF-Gun では、図 4 に示すように、Cell を切り分けるアイリスの長さ、及び Cell の長さを変化させることによって、最終 Cell における加速位相を調整することができる。ここでは、アイリスの長さを通常の半分、Cell の長さを通常の $1/3$ とした。また、Cell ごと電場強度比を変化させることによってエネルギーチャープの傾きを調整することも可能である。

このような SUPERFISH で設計した空洞を用いてビーム生成を行った場合の計算結果を以下の図に示す。実際には SUPERFISH と PARMELA 両方を用いて最適に近い形状を模索したことを注意されたい。

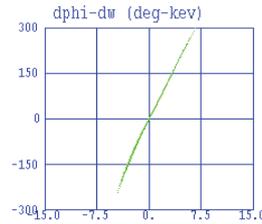


図 5: Phase Space Distribution at $z=20\text{cm}$

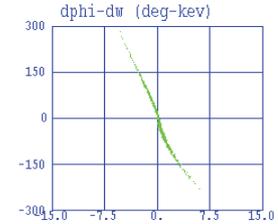


図 6: Phase Space Distribution at $z=658\text{cm}$

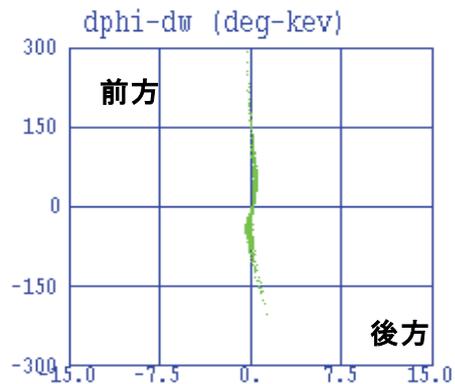


図 7: Phase Space Distribution at $z=402\text{cm}$

図 5-7 にそれぞれの位置における縦方向位相空間分布を、図 8 にカソードからの位置とパンチ長の関係を示す。位相空間分布は横軸が位相¹縦軸がエネルギーになっている。横軸は値が小さいほど z 軸で見た場合に前方を示しており、エネルギーは中心エネルギーからの差がプロットされている。図 5 を見てわかるように、電子銃空

¹PARMELA では時間は基本周波数の位相として与えているため

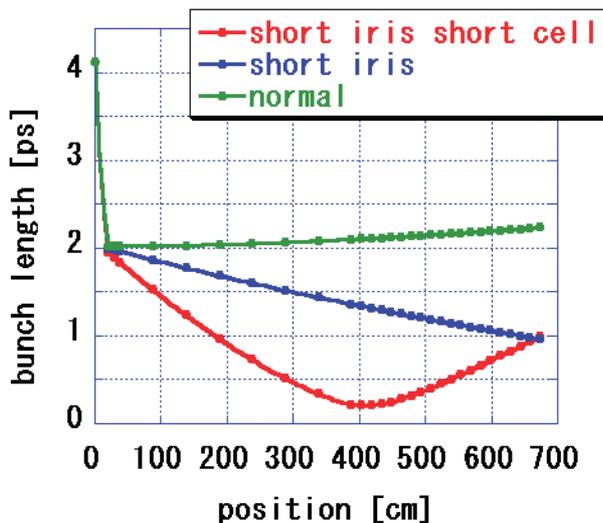


図 8: Bunch Length as a function of Distance from Cathode

洞出射時において前方ほどエネルギーが低く、後方の方がエネルギーの高い、かつエネルギー分布が線形に分布している電子ビームを生成できることがわかる。また、この電子バンチをドリフトスペースを進行させることで実際に後方の電子が追いつき、バンチが圧縮されるのが図 7 からわかる。図 6 は圧縮後さらにドリフトスペースを進行させており、逆にバンチが長くなっていることがわかる。

図 8 にはカソードからの位置とバンチ長の関係をプロットしている。通常の RF 電子銃 (Normal) とアイリスのみを短くした場合 (Short Iris) と図 4 の ECC-RF-Gun (Short iris Short cell) を示している。通常の RF 電子銃では、空洞内においてある程度バンチング効果があるため、電子銃直後において約 2ps(rms) のバンチ長が得られており、距離を追うごとに少しずつバンチが伸びる傾向が見て取れる。他の 2 つに関しては、程度の差はあるが、前方のエネルギーが低く、後方が高いエネルギーチャープ状態が生成できているため、距離を追うごとにバンチは短くなる。ECC-RF-Gun の場合には 403 の位置でバンチ長は最小値を取り、約 200fs の極短バンチが生成できていることがわかる。この時のビームパラメータは以下の通りである。

表 1: PARMELA Simulation Parameters and Beam Parameters

初期バンチ長	電場強度	電荷量
4.25ps (rms)	80MV/m at Cath.	100pC
エネルギー	エミッタンス	バンチ長 (min)
4.5MeV	4.2π mmrad	200fs (rms)

電子ビームエネルギーやエミッタンスを見ても十分な品質の電子ビームかつ 200fs のバンチ長のビームが得られていることがわかる。

4. 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 電子銃空洞を考

案・設計した。Iris 長さ及び Cell 長さを変えることによって最終 Cell での加速位相を調整し、バンチ内で線形にエネルギーチャープを生成することができる。早稲田大学の E_j5MeV の装置では速度差によって十分バンチングが可能で、現状 400 の位置で 200fs の電子ビームが生成可能である。また、後段に加速管を配置することによって Velocity Bunching も可能であると考えられる。^[5]

現状ではいまだドリフトスペースが 4m と長い距離が必要であるので、空洞構造や初期ビームの最適化によって 2m 以内での極短バンチ生成を目指し、設計作業を進める。平行してシケインなどの電磁石を用いた省スペース化に関する検討を行い、最適解を模索する。年度内には本 ECC-RF-Gun の製作を開始する予定である。その後ビームパラメータ計測などを経て、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^[6]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] R. Betto et al., Proc. of this conference MOPS144.
- [4] K. Sakaue et al., Radi. Phys. Chem. 77(2008)1136.
- [5] L. Serafini and M. Ferrario, AIP Conference Proc. 581(2001)87.
- [6] R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Meth. A637(2011)S30.