

## 光陰極高周波電子銃の高度化と極短バンチ生成電子銃に関する研究

### DEVELOPMENT OF A PHOTO-CATHODE RF ELECTRON GUN FOR ULTRA-SHORT BUNCH GENERATION

坂上和之<sup>#</sup>

Kazuyuki Sakaue<sup>#</sup>

Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

#### Abstract

The photocathode rf electron gun is a high brightness electron source because the initial electron bunch shape can be controlled by the cathode illuminating laser pulse and then the bunch is rapidly accelerated by the high gradient electric field in the rf gun cavity. The rf guns are widely used not only as an injector for large facility but also application researches. At Waseda university, I and collaborators have been developing an rf electron gun since 1999. We performed optimization of cavity structure, improvement of rf tuner and development of photocathode material, then we succeeded in operating 3.6 cell rf gun. In these backgrounds, I conceived a new type rf gun cavity structure for ultra-short electron bunch generation, named Energy-Chirping-Cell attached rf gun (ECC rf gun). Less than 100 fs (rms) bunch can be produced with 100 pC charge by this ECC rf gun in the simulation. Such a high peak current bunch has a possibility to apply for the coherent THz radiation source and single shot electron diffraction microscope. Encouraged by this successful simulation results, we manufactured an ECC rf gun and measured the bunch length at Waseda university. The experimental results showed a good agreement with simulation and we found that the bunch length from ECC rf gun was less than 500 fs (rms). In this paper, the introduction of the photocathode rf gun, principle and experimental results of ECC rf gun, and future prospective will be described.

#### 1. はじめに

光陰極高周波電子銃 (以下 RF gun)は 1990 年代に BNL/SLAC/UCLA によって実証<sup>[1]</sup>されて以降世界中で開発が進められてきた。また、現在では大規模加速器の入射器として様々なところで採用<sup>[2][3]</sup>されていることから、その有用性は疑いないものである。RF gun の特徴は光陰極から生成される電子バンチの初期形状をレーザーパルスの形状を操作することによって容易に制御できること、かつ光陰極が加速空洞と一体化されていることにより生成された電子バンチを即座に 100 MV/m を超える加速電界によって加速することができる点である。このような構成によって短パルス・低エミッタンスな電子バンチを得ることが可能となっている。

我々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 1999 年より RF gun 開発を行ってきた。早稲田大学 RF gun 初号機は BNL で開発された Type IV と呼ばれる 2 つの円筒形空洞から成る 1.6 Cell 型 (Half Cell (0.6 cell)と Full Cell (1 cell))であった。2001 年より早稲田大学加速器システムは立ち上がり、RF gun 開発研究はもちろん、その応用研究としてレーザーコンプトン散乱による軟 X 線生成試験<sup>[4]</sup>やパルスラジオリシス研究による放射線化学初期過程の解明<sup>[5]</sup>などを実施してきた。2008 年には 2 号機として RF チューナー構造の改良とそれに伴う空洞形状の改良、及び Cs-Te 光陰極の導入によってエネルギーの向上とマルチバンチ電子ビーム生成が可能となった<sup>[6]</sup>。その後、空洞形状を最適化すること

によって通常加速に用いている  $\pi$  モードと 0 モードの分離を行うとともに Q 値を向上させた Mode Separated RF gun<sup>[7]</sup>を開発し、分離幅を従来の 3.4MHz から 8.6MHz とすることに成功した<sup>[8]</sup>。このような空洞形状の実現によりさらに複数セルの電子銃の可能性が拓け、3.6 Cell 構造の RF gun の開発を行った<sup>[9]</sup>。これにより電子銃単体において 10MeV を超えるエネルギーの電子ビーム生成が可能となり、応用の幅が広がった。

このような背景の下、今回主に述べるエネルギー変調セル付属型高周波電子銃 (Energy-Chirping-Cell attached rf gun : ECC rf gun)の着想を得た。X 線 FEL 等の SASE-FEL の発明に伴い、ピーク電流の高い電子ビーム、つまり時間幅の狭い電子バンチの開発が精力的に行われてきた。このような極短バンチ (1ps 以下)の電子ビームを早稲田大学の加速器システムで実現したいという構想の下、発案したものである。通常的大型加速器システムにおいては電子銃とは別に複数台の加速管を有しており、その加速管によってエネルギー変調を施し、磁気圧縮器によって電子バンチの圧縮が行われる。しかしながら早稲田大学加速器システムにおいては RF パワーが制限される関係で、電子銃空洞を励起することしかできず、他の加速管を設置することは実用上難しかった。そこで、電子銃空洞にエネルギー変調セルを付属した形の 1 台の高周波空洞によって極短バンチを生成することを試みた。次章よりその原理から説明していくこととする。

本稿では次節で ECC RF gun の原理と設計・製作結果を述べ、その後早稲田大学におけるビーム試験結果、最後にまとめと今後の展望について報告する。

<sup>#</sup> kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

## 2. ECC RF gun

本章では ECC RF gun の原理と設計結果、製作結果について簡単に述べる。詳細に関しては<sup>[10]</sup>を参照されたい。

### 2.1 ECC RF gun の原理

ECC RF gun はその名の通り、基本的な構成としては従来の RF gun 加速空洞に対してエネルギー変調セルを付属した形となっている。以下の Fig. 1 にその構成図およびそれによって得られる電子バンチの縦方向位相空間分布の模式図を示す。

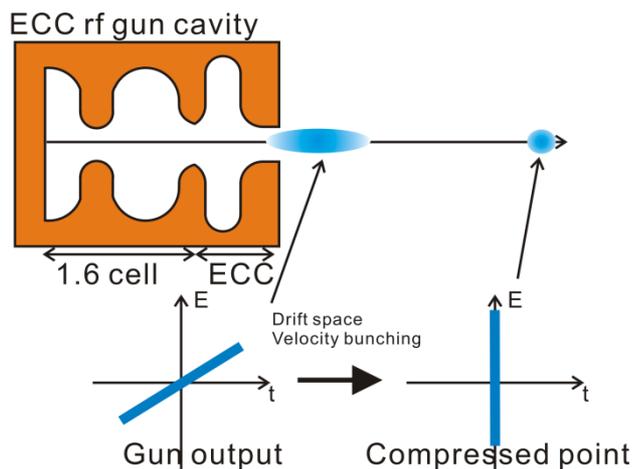


Figure 1: Schematic of ECC RF gun.

ECC RF gun ではまず 1.6 Cell においてピコ秒の電子バンチをなるべくエネルギー広がり小さい状態で加速する。その後、ECC においてエネルギーを線形にチャープする。言い換えると、1.6 Cell においては RF 電場のほぼクレストを用いて加速するが、ECC ではゼロクロスに近い位相にて加速することになる。これを実現するために、ECC の長さや ECC 前のアイリスの長さを調整している。Fig. 1 の下に示してあるとおり、先頭の電子がエネルギーが低く、後方がエネルギーが高い電子バンチが ECC RF gun によって生成される。さらにこのエネルギー分布が非常にきれいに線形であることによってその速度差によってドリフトスペースを進行することによって後方の電子が追いつき、バンチが圧縮される。レーザーを用いて電子バンチを生成する電子銃であるため、極短バンチを生成するにはフェムト秒レーザーを光陰極に照射すれば良い、と考えることも可能であるが、陰極近傍ではほぼゼロエネルギーから電子が加速されるため、極短バンチでは非常に強い空間電荷効果が働き、即座にバンチ長は伸びてしまう。シミュレーションでは 100 pC の電荷量を持った電子バンチではどんなにレーザーのパルス幅を短くしても、生成される電子バンチのバンチ長は 1 ps 程度に制限されてしまう。バンチ電荷を数 pC 程度まで小さくすることによってフェムト秒レーザーを用いて極短バンチを生成することは可能ではあるが、今回の目的は比較的高電荷かつ極短バンチを生成することである。そこでピコ秒の初期電子バンチを 1.6

Cell で 4~5 MeV 程度まで加速し、そこから速度差を用いて圧縮することを考案した。

### 2.2 ECC RF gun の設計

ECC RF gun は前節に述べた通り、概念設計を行い、実際の設計は Superfish を用いた空洞設計とそれから得られる電子ビームを GPT (General Particle Tracer) を用いて計算した。この 2 つのシミュレーションコードを何度もイタレーションして最適な ECC RF gun を設計した。その結果を以下の Tab. 1 に示す。

Table 1: Simulation Parameters and Results of ECC RF Gun

Charge	100pC
Ini. bunch leng.	4.3ps (rms)
E at cathode	100MV/m
Injection phase	20deg
Energy	4.24MeV
Compressed bunch leng.	88.4fs (rms)
Compressed point	2.3m
Emittance (R)	3 $\mu$ mmrad

Tab. 1 に示す通り、100 pC の電荷量を持ったまま、最終的に 100 fs を切る極短バンチが得られていることがわかる。圧縮に必要なドリフト距離としてはカソード表面から 2.3 m 程度である。さらに特筆すべき点としては、ビームエミッタンスも 3  $\mu$ mmrad 程度と非常に小さいものが得られていることである。1.6 Cell のみと比較すると倍程度に大きくなってはいるが、これによって収束して用いるような応用にも適用することが可能である。

### 2.2 ECC RF gun の設計

シミュレーションによって十分な性能を持った電子バンチが生成できることを確認したため、ECC RF gun の製作を行った。製作は KEK 工作センターの協力によって行った。それぞれのセルはダイヤモンドバイトによる超精密旋盤で鏡面加工し、最終的にろう付けによって組み上げている。製作した ECC RF gun の写真を Fig. 2 に、測定した性能を Tab. 2 にそれぞれ示す。

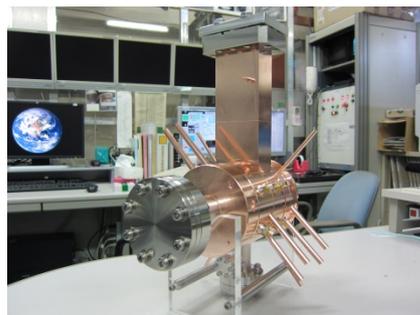


Figure 2: Photograph of ECC RF gun.

Table 2: Cavity Parameters of ECC RF Gun

Q value	10860
Coupling $\beta$	0.92
$E_h$	0.9
$E_r$	1
$E_e$	1.23

Fig. 2 に ECC RF gun の外観を示した。内部は見えないため、あまり従来の電子銃と違いがないように見えるが、実際には Fig. 1 に示したような ECC を付属した形となっている。Tab. 2 には製作後に評価した結果を示した。Q 値やカップリング、フィールドバランスともほぼ設計に近い値を得ることができた。このように成功裏に製作を完了することができたため、実際に早稲田大学加速器システムに組み込み、試験を行った。

### 3. ECC RF gun による極短バンチ生成試験

#### 3.1 実験セットアップ

早稲田大学では RF gun をベースとした加速器システムを構築し、研究開発・応用研究を行っている。この加速器システムに ECC RF gun を導入し、試験を行った。Fig. 3 にそのセットアップ図を示す。

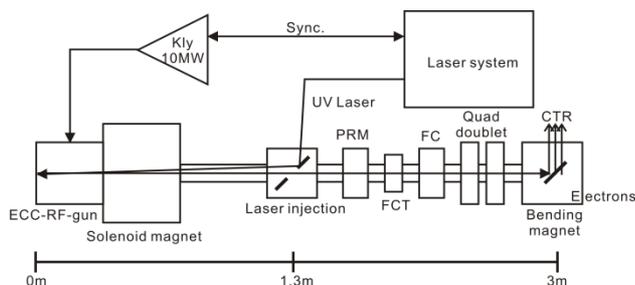


Figure 3: Experimental setup of ECC RF gun test at Waseda university.

早稲田大学では 10 MW の S-band クライストロンを所有している。これを RF gun に印加することによって最大 5.5 MeV の電子ビームを得ることができる。しかしながら、ECC RF gun はセル数が 1 つ多いため、RF パワーが不足し、最適な運転条件での試験が出来なかった。設計上の最適値である 100 MV/m の電界を生成するには至らず、80MV/m 程度で試験したことを注意しておく。シミュレーションによればこの電界でも 200 fs (rms) 程度のバンチ長は得られる。電子バンチはピコ秒の UV レーザーによって生成する。レーザーはビームライン中腹部の穴あきミラーによってカソードにほぼ正面から照射される。加速 RF とレーザーはレーザーのシード部の発振周波数を制御することによって同期されている。生成された電子バンチはエミッタンス補正用のソレノイドを通過し、ビーム診断系等を通過する。

今回の条件では最も圧縮される位置はカソードから 3 m 程度の位置であったため、その位置に遷移放射 (TR)用のアルミニウムターゲットを設置している。ターゲット上流にはターゲット上で電子ビームを集束するための四極電磁石を設置している。ターゲットと同位置に蛍光スクリーンも設置しており、これによってビームサイズを測定しながら TR を測定する。電子バンチの電荷量は FCT (Fast Current Transformer)によって、電子ビームエネルギーは偏向電磁石とその下流に設置した蛍光スクリーンによって計測している。バンチ長は Coherent TR を用いて計測した。アルミニウムターゲットで生成した CTR の周波数成分を狭帯域の SBD (Schottky Barrier Diode)を用いて計測することによってバンチ長を推定している。狭帯域の SBD は 10 %程度のバンド幅に感度を持つため、様々な中心周波数の SBD を用意して計測することで、どの程度高い周波数まで CTR として生成されているかを確認することが可能である。そこでバンチ形状としてガウス分布を仮定すれば、バンチ長を推定することが可能である。

#### 3.2 エネルギー測定

まず初めにビーム計測として、RF 加速位相に対するビームエネルギーの計測を行った。ECC RF gun では最終のエネルギー変調セルにおいて特定の位相で加速するように構成しており、これによってエネルギーチャープを得る。したがって、RF 位相に対するエネルギーの関係は非常に重要な情報となる。その測定結果を Fig. 4 に示す。

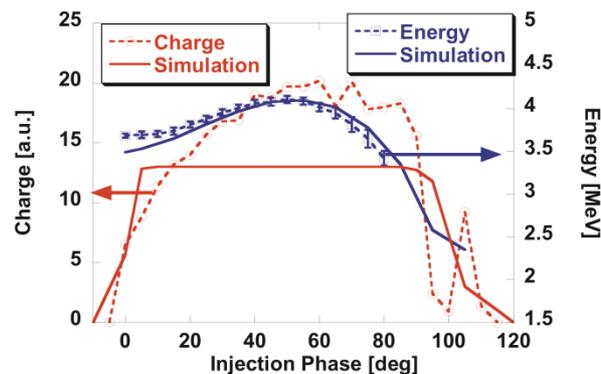


Figure 4: Bunch charge and energy as a function of laser injection rf phase.

実線はシミュレーション結果を、プロット及び点線は測定結果を示している。測定とシミュレーションの結果は非常によく一致していることがわかる。特にエネルギーが 10 度付近から 40 度付近まで上昇し、その後下がっていくという挙動は ECC RF gun 特有の挙動であるため、この点が一致していることは設計通りの加速ができているであろうということを示す結果である。

### 3.3 コヒーレント放射によるバンチ長測定

バンチ長測定試験として、前述の通り、狭帯域の SBD を 4 種類用いて行った。その SBD の帯域はそれぞれ 0.05 THz・0.1 THz・0.3 THz・0.6 THz である。0.1 THz 帯の SBD は 0.2 THz にも小さいながら感度を持つため、0.2 THz のバンドパスフィルターと 0.1 THz 帯域の SBD を用いた計測も行った。つまり、5 種類の周波数において CTR を計測した。レーザーを入射するタイミングを変えて計測した CTR の強度を以下の Fig. 5 にプロットした。それぞれの帯域

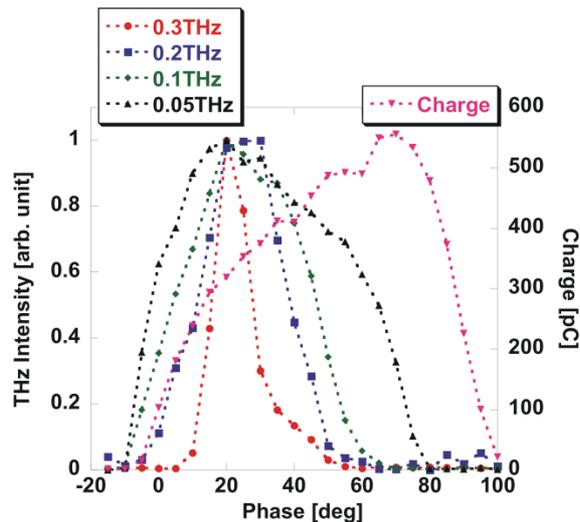


Figure 5: Experimental result of coherent transition radiation as a function of laser injection rf phase.

における計測結果と電荷量を加速位相に対してプロットしている。まず、プロットを見て、それぞれの周波数帯域の SBD の信号がそれぞれ加速位相 20 度付近を中心に得られていることがわかる。この 20 度という加速位相は ECC RF gun の最適加速位相 (もっとも圧縮された電子バンチが得られる位相) に一致する。高い周波数になるごとにそれぞれの検出されたピークの幅が狭くなっていることがわかる。つまり、20 度を中心に最も圧縮された電子バンチがターゲット上で得られており、最適加速位相からずれることによってバンチ長が長くなり、CTR が生成されなくなる。特に高い周波数では顕著に出ており、0.3 THz 帯 SBD では 30 度幅程度で検出されているのに対して 0.1 THz 帯の SBD では 60 度ほどの幅で検出できている。また、0.6 THz 帯の SBD では CTR を検出することはできなかった。0.6 THz ではコヒーレントの増強されるほどバンチが短くなかったことももちろん考えられるが、他の要因として、高周波数であるほどに SBD のアパーチャーが小さくなり、0.6 THz では 1 mm 以下であり、検出光量が小さかったことが一つ挙げられる。また、TR ではターゲット上におけるビームサイズによっても制限されることになる。Transverse Form Factor と呼ばれるものであるが、ECC RF gun からのビームはエネ

ルギー変調のために比較的大きなエネルギー広がりを与えているためにターゲット上では 300  $\mu\text{m}$  程度までしか集束できていない。したがってこの Transverse Form Factor の影響も考えられる。しかしながら、今回は 0.3 THz 帯の SBD での検出が確認できた。SBD の感度から考えると、コヒーレントに TR が生成されていなければ検出できないため 0.3 THz において CTR が生成されていたことは間違いない。バンチの形状をガウス分布と仮定して 0.3 THz が十分にコヒーレントに増強されるためには 500 fs (rms) 以下のバンチ長であることが求められる。したがって、現時点で我々は ECC RF gun からのビームは 500fs 以下が達成されているだろうと結論付けている。もちろん、シミュレーションの通りに 200 fs 程度まで圧縮されていると見込んではいないが、バンチ長を確定させるために今後高周波偏向空洞 [8][9] を用いたバンチの直接計測などを行っていく予定である。

## 4. まとめと今後の展望

電子銃単体によって極短バンチが生成可能なエネルギー変調セル付属型高周波電子銃：ECC RF gun を設計・製作・試験した。設計した ECC RF gun はエネルギー変調セルの付属によって 100 pC 程度の比較的高電荷ながら 100 fs (rms) を切るバンチ長を実現することができる、非常に画期的な電子銃である。設計を成功裏に終えることができたため、実際に電子銃空洞を製作した。ほぼ設計通りの空洞を得ることができ、早稲田大学加速器システムに導入して試験した。これまでにビームエネルギーの測定と CTR 周波数計測によるバンチ長推定を行い、ビームエネルギーとしてはほぼ計算通りの結果が得られている。バンチ長の推定結果としては、500 fs (rms) 以下であることを確認している。計算上では 200 fs 程度のバンチ長が得られる予定であるため、今後パラメータを詰めるとともに別手法でのバンチ長の測定によって詳細を明らかにしていく。

今後、バンチ長計測として、高周波偏向空洞を用いた直接計測を行う。これによって実際にバンチ長の値を確定させることができると考えている。また、偏向空洞を用いることによってバンチの位相空間分布を計測することが可能となる。これを合わせて測定することによって実際に ECC において線形なエネルギーチャープが実現できていることを確認する予定である。

今後の展望として、ECC RF gun の応用展開を検討している。電子銃空洞のみで極短バンチを生成できる ECC RF gun は非常に小型な構成が可能であるため、応用に向いていると考えている。特にキロアンペア近い電子バンチが生成できることから、コヒーレント放射によるテラヘルツ光源の実現が可能であろう。また、電荷量を多少減らし、集束可能な電子線とすることによって時間分解電子線回折顕微

## PASJ2014-SUOLAI

鏡などへの応用も可能であろうと考えている。これらの応用に特化した形での ECC RF gun の設計やビームラインの構成などを詰めて様々な応用への展開を行っていく予定である。

### 謝辞

今回、本研究によって加速器学会奨励賞という名誉にあずかることができたのはこれまで協力・指導いただいた皆様をはじめ、加速器学会の運営を行う諸先生方のおかげである。この場を借りて深く御礼申し上げたい。特にこの研究に携わる機会を与えていただき、多大なご協力・ご指導をいただいた、早稲田大学鷲尾教授、高エネ研浦川教授・早野教授・照沼准教授に心より感謝します。

電子銃空洞製作においては高エネ研工作センターの工藤氏・高富氏に多大なご協力をいただいた。両氏の技術なしには本研究は成し得ないものでした。産総研の黒田主任研究員にはテラヘルツ波検出に対して、東北大の柏木准教授には高周波回路に関して、BNL の X. J. Wang 博士・大阪大の楊准教授には電子銃設計に関してご協力をいただいた。また、BNL 型電子銃開発を行ってきた高エネ研・産総研・阪大・京大・SAMEER 研究所 (インド) の関係者には様々な議論にお付き合いいただいた。皆様に感謝申し上げたい。

最後に早稲田大学の学生諸氏 (すでに卒業してしまった学生も含み)には昼夜を問わず実験や作業等様々な面で協力いただいた。皆様に感謝したい。

### 参考文献

- [1] X. J. Wang et al., Phys. Rev. E 54-4 (1996) 3121.
- [2] LCLS Conceptual Design Report (CDR).
- [3] N. Terunuma et al., Nucl. Instrum. Meth., A613 (2010) 1.
- [4] K. Sakaue et al., Radi. Phys. Chem., 77 (2008) 1136.
- [5] Y. Hosaka et al., Radi. Phys. Chem., 84 (2013) 10.
- [6] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth., B269 (2011) 2928.
- [7] A. Deshpande et al., Nucl. Instrum. Meth., A600 (2009) 361.
- [8] A. Deshpande et al., Phys. Rev. S. T. Accel. Beams, 14 (2011) 063501.
- [9] T. Aoki et al., Proc. Of IPAC 2011 (2011) 110.
- [10] K. Sakaue et al., Phys. Rev. S. T. Accel. Beams. 17 (2014) 023401.
- [11] Y. Nishimura et al., Nucl. Instrum. Meth., A in press.
- [12] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth., A under review.