

## エネルギー変調セル付属型高周波電子銃の開発と利用展開\*

### DEVELOPMENT OF AN ENERGY CHIRP CELL ATTACHED RF ELECTRON GUN AND ITS PROSPECTIVE APPLICATIONS

坂上和之<sup>#, A)</sup>, 立花充章<sup>A)</sup>, 水柿将貴<sup>A)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>, 浦川順治<sup>B)</sup>, 黒田隆之助<sup>C)</sup>  
Kazuyuki Sakaue<sup>#, A)</sup>, Mitsuaki Tachibana<sup>A)</sup>, Masataka Mizugaki<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>,  
Junji Urakawa<sup>B)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>C)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

#### Abstract

We have been developing an Energy-Chirping-Cell attached rf electron gun (ECC rf gun) for ultra-short bunch generation with enough charge of more than 100 pC. ECC rf gun has an extra cell for energy chirping, then the energy chirped bunch is gradually compressed by the velocity bunching. We estimated the bunch length by coherent radiation spectrum that the bunch length will be less than 500 fs (rms). The important point of this rf gun is the gun itself has an abilities of acceleration and compression, thus ECC rf gun is the compact ultra-short electron source. Such a gun, we think, can be applied to a coherent THz source and dynamic electron diffraction microscope. In this presentation, the introduction of our ECC rf gun, recent experimental results, and future prospective applications will be discussed.

#### 1. はじめに

早稲田大学では光陰極高周波電子銃をベースとした小型加速器システムを有しており、電子銃開発<sup>[1][2]</sup>、ビーム診断研究<sup>[3]</sup>、光陰極研究<sup>[4]</sup>、ビーム応用研究<sup>[5]</sup>などを行っている。電子銃空洞開発としてはこれまで KEK (高エネルギー加速器研究機構) と共同で様々な改良研究を行ってきた。<sup>[6]</sup> そのような背景の下、我々は極短バンチを生成するための電子銃空洞を着想し、開発を開始した。電子銃空洞単体によって極短バンチ(500fs 以下)かつ比較的高電荷量(100pC 以上)の電子ビームを生成することができ、エネルギー変調セルと呼ばれる新たなセルを付属することからエネルギー変調セル付属型高周波電子銃(ECC rf gun)と呼んでいる。電子銃出口部に設置したエネルギー変調セルによって線形なエネルギー変調を与えることができ、その後のバンチ内の速度差を用いてバンチ圧縮し、極短バンチを得ることが可能である。極短バンチを生成するのに必要なものはこの ECC rf gun のみで良く、生成された電子バンチはドリフト空間を進行するのみで圧縮されることになる。設計では 100pC の比較的高電荷を持ちながら 100fs (rms) を切るバンチ長が得られることが確認できている。このような小型な極短電子バンチはコヒーレント光源や電子線回折顕微鏡など様々な応用が可能であると考えている。本講演ではエネルギー変調セル付属型高周波電子銃の紹介、評価試験結果

及びその応用展開に関する検討結果について報告する。

#### 2. ECC rf gun

本章では ECC rf gun の原理と設計結果に関して簡単に述べる。詳細は<sup>[7]</sup>を参照されたい。ECC rf gun の加速空洞は以下の Fig. 1 に示すような構造となっている。最初の 2 セルは通常の 1.6 セルとほぼ同等の構造で、光陰極で生成された電子バンチをなるべくエネルギー差の少ない状態で加速する。最後のセル

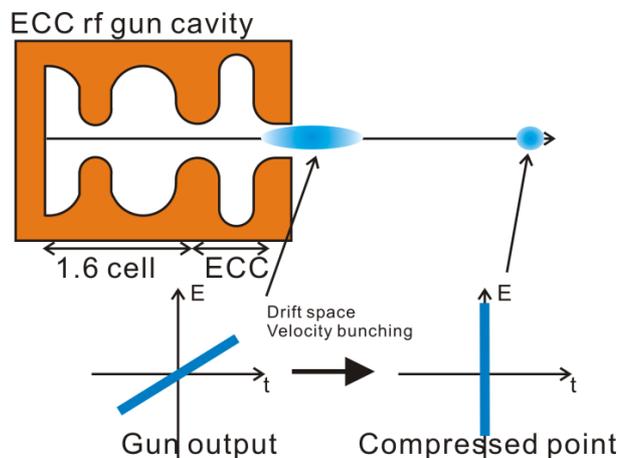


Figure 1: Principle of ECC rf gun.

は特殊な形状をしており、これによってバンチに線形にエネルギー分布を与えることができる。Fig. 1 の下部には電子銃空洞から出力された時と適切なドリフト距離を進行した際の電子バンチの縦方向位相空間分布を示しているが、速度差によって電子が進

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

\* This work was supported by Photon and Quantum Basic Research Coordinated Development Program from the MEXT, Japan and JSPS Grant-in-Aid for Young Scientists (B) 23740203

行するにつれ自然に圧縮され、位相空間分布が回転する。設計は Superfish と GPT (General Particle Tracer) を用いて行い、計算に用いたパラメータ及び結果として得られると予想される電子ビームパラメータを以下の 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)          | $3\pi$ mmrad |

Tab. 1 を見てわかるとおり、十分な電荷量を持ちながら 100fs (rms)より短い極短バンチが得られていることがわかる。これはまず 1.6 セル部にて 4MeV 以上の十分なエネルギーを与え、その後エネルギーチャープを与えることによって実現することができる。このように設計した電子銃を製作し、早稲田大学加速器システムに設置し、極短バンチ生成を試みた。

### 3. 極短バンチ生成試験

#### 3.1 実験セットアップ

本節ではバンチ長測定試験に用いた実験セットアップに関して述べる。以下の Fig. 2 にそのセットアップ図を示した。

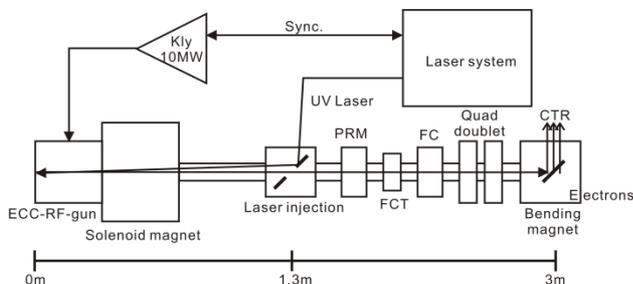


Figure 2: Experimental setup of bunch length measurement.

我々の所有している 10MW S-band クライストロンからの出力を ECC rf gun に印加し、ビーム加速する。この時、RF パワーが不足しているために設計の最適値である 100MV/m の電界を生成するには至らず、80MV/m 程度であっ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においても 200fs (rms) 程度のバンチ長は得られる。電子バンチはレーザーシステムで生成するピコ秒 UV パルスによって生成される。パルス幅は 4.2ps (rms)程度で、これが初期

バンチ長に一致することになる。生成・加速された電子バンチはエネルギー変調セルで線形なエネルギーチャープを与えられる。その後ソレノイド電磁石でエミッタンス補正を受け、最も圧縮されるカソードから 3m の地点に設置されたアルミニウムターゲットに四極電磁石で収束される。アルミニウムターゲットで生成される遷移放射のコヒーレントな成分(CTR)を検出することによってバンチ長を概算する。CTR 光はショットキーバリアダイオード(SBD)を用いて検出する。今回は狭帯域(10%程度の検出スペクトル幅)のSBDを4種類用いることによってどの程度高い周波数までコヒーレントに生成することができているかを測定した。バンチ形状としてガウス分布を仮定すれば、これによりバンチ長を概算することが可能である。電子ビームの電荷量とエネルギーはそれぞれビームラインに設置した FCT (Fast Current Transformer)と偏向電磁石によって計測している。

#### 3.2 RF 位相とエネルギー計測

はじめに加速 RF 位相と電荷量、エネルギーの関係に関して測定を行った。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. 3 に示す。実線はシミュレーション結果を、プ

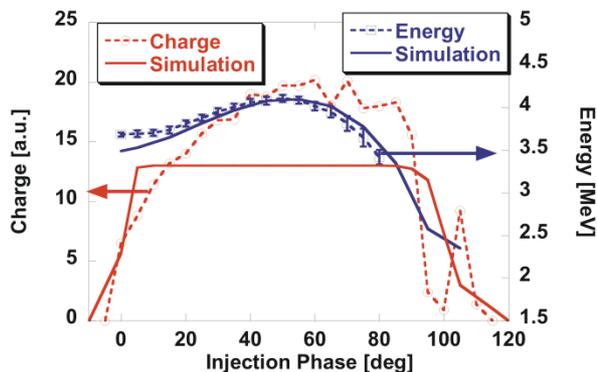


Figure 3: Bunch charge and energy as a function of laser injection rf phase.

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 バンチ長測定試験結果

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 0.05THz・0.1THz・0.3THz・0.6THz である。

0.1THzSBD は 0.2THz にも小さいながら感度を持つため、0.2THz のバンドパスフィルターと 0.1THz 帯域の SBD を用いた計測も行った。つまり、5 種類の周波数に置いて 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. 4 にプロットした。それぞれの帯域におけ

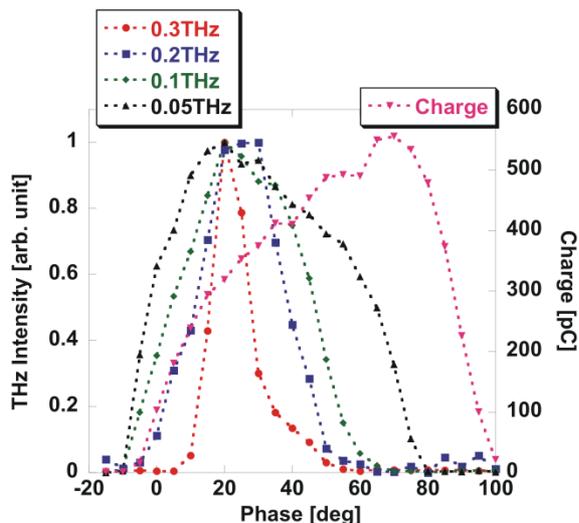


Figure 4: Experimental result of coherent transition radiation as a function of laser injection rf phase.

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、0.6THz 帯の SBD では CTR を検出することはできなかった。0.6THz 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、0.6THz では 1mm 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 $\mu$ 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。なんにせよ、今回は 0.3THz 帯の SBD で検出することができた。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 0.3THz 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 0.3THz が十分にコヒーレントに増強されるためには 500fs (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 200fs 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<sup>[8][9]</sup>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. まとめと今後の応用展開

我々は ECC rf gun と呼んでいるエネルギー変調セルを付属した高周波電子銃を考案・設計・製作・試験した。設計上では電子銃単体において 100pC/100fs (rms) のキロアンペアに近い電子ビームの生成が可能である非常に新しい電子銃である。これまでにビーム試験を早稲田大学にて行い、100pC の電荷量にて 500fs (rms) 以下のバンチ長であることをコヒーレント放射の計測によって示した。今後はバンチ長を確定させるために高周波偏向空洞による直接計測を行っていく。

この ECC rf gun は電子銃単体に極短バンチが生成でき、かつ十分な電荷量を確保できることから非常に多くの応用が可能であると考えている。

まず  $10^9$  個近い電子をバンチ内に詰め込みつつ 100fs が実現できることから、コヒーレントテラヘルツ光源としての応用が見込める。現在でも様々な周波数での計測を行っているが、4~5MeV ではテラヘルツ帯の放射が可能であるものの、放射角が大きいことが欠点として挙げられる。そこで数十 cm 程度の加速管を ECC rf gun の圧縮点付近に設置することで追加速を行い、10MeV 程度の極短バンチで小型テラヘルツ光源として動作させることが可能ではないかと考えている。

もう一つの応用として、シングルショットの時間分解電子線回折顕微鏡 (DEDM) が挙げられる。現在のバンチ長は空間電荷効果が制限している部分が多い。DEDM では  $10^8$  程度の電子があればシングルショットでの画像取得が可能であるため、1 ケタ程度電荷量を下げるとともに、DEDM に適した 2MeV 程度の ECC rf gun を設計することによって非常に小型かつハンドリングの容易な DEDM となりうると考えている。その設計としては、現在の 1.6 セル+ECC 構造を 1 セル+ECC とすることによって最適化するとともに必要に応じてエネルギー補正空洞を別途用意することを考えている。これらを合わせても 10MW 程度のクライストロンで十分運転可能であり、非常に興味深い応用となりうると考えている。

#### 参考文献

- [1] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth., B269 (2011) 2928.
- [2] R. Suzuki et al., Proc. of this conference SUP112.
- [3] M. Nishiyama et al., Proc. of this conference SUP082.
- [4] S. Matsuzaki et al., Proc. of this conference SUP032.
- [5] R. Sato et al., Proc. of this conference SAP115.
- [6] N. Terunuma et al., Nucl. Instrum. Meth., A613 (2010) 1.
- [7] K. Sakaue et al., Phys. Rev. STAB, 17 (2014) 023401.
- [8] Y. Nishimura et al., Nucl. Instrum. Meth., A, in press.
- [9] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth., A, under review.