

## フォトカソード高周波電子銃による極短バンチ生成実験

### ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH GENERATION BY A PHOTOCATHODE RF GUN

水柿将貴<sup>#,A)</sup>, 小柴裕也<sup>A)</sup>, 坂上和之<sup>A)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>, 高富俊和<sup>B)</sup>, 浦川順治<sup>B)</sup>, 黒田隆之助<sup>C)</sup>  
Masataka Mizugaki<sup>#,A)</sup>, Yuya Koshiba<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Toshikazu Takatomi<sup>B)</sup>,  
Junji Urakawa<sup>B)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

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

#### Abstract

We have been studying on the accelerator physics at Waseda University with BNL type 1.6cell photocathode rf gun. Such rf gun can generate low emittance and short bunch electron beam. So as to generate ultra-short electron bunch in our compact system (about 2m × 3m), we have newly designed Energy Chirping Cell attached rf gun (ECC rf gun). ECC is attached subsequently to the 1.6 cell. The role of ECC is to chirp the electron energy so that the electron bunch is compressed by velocity difference as it drifts. Simulation results show ECC rf gun can accelerate 100pC electron bunch with the bunch length shorter than 200fs. We have successfully measured the coherent THz light by synchrotron radiation and transition radiation. Therefore, we inferred that the bunch was compressed into shorter than 1ps. In this conference, we will report the results of the bunch length measurement, present progresses and future plans.

#### 1. はじめに

早稲田大学ではピコ秒 UV パルスレーザーと Cs-Te をフォトカソードに用いた S バンド RF-Gun を用いて約 2m×3m という非常に小型な加速器システムを構築している。本研究室では RF-Gun の研究・製作を KEK と共同で行うと共に、5MeV 程度の低エミッタンスな高品質電子ビームの生成・評価、それを利用した様々な応用研究も行なっている。

早稲田大学では高品質電子ビームの応用研究として放射線化学の初期過程を解明するパルスラジオリシス<sup>[1]</sup>や逆コンプトン散乱による軟 X 線の生成<sup>[2]</sup>、電子ビームを細く絞ることで電子線 MRT 実験への検討等を行っている<sup>[3]</sup>。これら応用を考える上で電子ビームの進行方向の長さであるバンチ長は重要なパラメータとなる。すなわち、より短いバンチ長はパルスラジオリシスにおいて時間分解能の向上に寄与し、逆コンプトン散乱においてはルミノシティの向上に寄与する。さらにフェムト秒オーダーのバンチ長を生成することができれば、THz 領域の高強度な放射光を生成することが可能となる。THz 波は光波と電波の中間の周波数の電磁波であり、近年 THz 時間領域分光法 (THz-TDS) を始めとした応用研究が急速に発展してきている<sup>[4]</sup>。

そこで早稲田大学ではバンチ長の圧縮に特化した

電子銃、Energy Chirping Cell attached RF Gun (ECC-RF-Gun) を新たに設計・開発し<sup>[5][6]</sup>、当研究室に組み込むに至った (Figure 1)。本講演では ECC-RF-Gun によるビーム生成実験結果及び今後の展望を報告する。



Figure 1: ECC-RF-Gun

#### 2. ECC-RF-GUN の原理、評価

一般にフォトカソード RF-Gun では、カソードに照射するレーザーのプロファイルを制御することで得られる電子ビームを制御できる。しかし、フェムト秒オーダーのパルスを照射しても、空間電荷効果等の影響があるためフェムト秒オーダーのバンチ長の電子ビームが必ずしも得られるわけではない。そこで、電子銃単体で極短バンチ電子ビームを得ることを目的として ECC-RF-Gun の設計・開発を行った。ECC-RF-Gun の設計には電磁場計算コード

SUPERFISH、ビームトラッキングコード PARMELA、GPT を使用した。ECC-RF-Gun の基本的な構造は、Half Cell、Full Cell を持つ従来の 1.6Cell 型 RF-Gun の下流に Energy Chirping Cell(ECC)というセルを加えたものとなっている。ECC は電子バンチのエネルギーをチャープ、すなわち電子のエネルギーが進行方向前方に対し後方が相対的に高い状態となるように設計されている。加速位相の概念図を Figure 2 に示す。

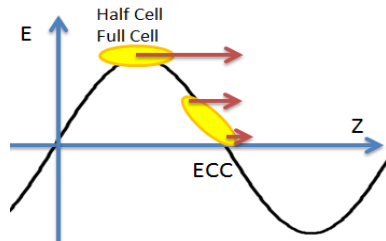


Figure 2: Off crest acceleration in ECC

ECC を通過した電子バンチは進行とともに圧縮されて行き、カソードから約 3m の地点でバンチ長は最小となる。圧縮されている様子を位相空間上で表したものが Figure 3 である。

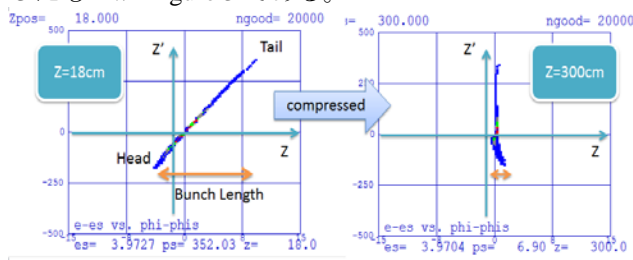


Figure 3: Phase space distribution

この時、バンチのエネルギー分布をより線形に与えるとバンチ長はより短く、エネルギー差を大きく形成できればよりカソードに近い地点でバンチ長を最小とすることができる。

完成した ECC-RF-Gun はビーズ摂動法による電場強度測定の結果、ECC での電場強度比が Half Cell、Full Cell に対し 1.22 倍大きくなることが確認された。また、シミュレーションでは Q 値は 13000 から 14000 程度であったが、測定値は 10860 であった。

### 3. ビーム生成実験

電子数  $N$  個の電子バンチによる放射光強度の和  $P_{all}(\omega)$  は、1つの電子による放射光強度  $P_0(\omega)$  により以下のように表される。

$$P_{all}(\omega) = N(1 + (N - 1)f(\omega))P_0(\omega) \quad (1)$$

ここで  $f(\omega)$  はバンチの形状で決まるフォームファクターと呼ばれる因子で、ガウシアンを仮定すると

$$f(\omega) = e^{-(\omega\sigma_z)^2/2} \quad (2)$$

と与えられる。したがって放射光の波長に対しバンチ長が短い場合、放射光強度は強度を増し、測定することが可能となる。Figure 4 に電荷量 0.1pC、エネルギーが 3.8MeV の場合のシンクロトロン放射光強

度を SPECTRA により計算したものを示す。

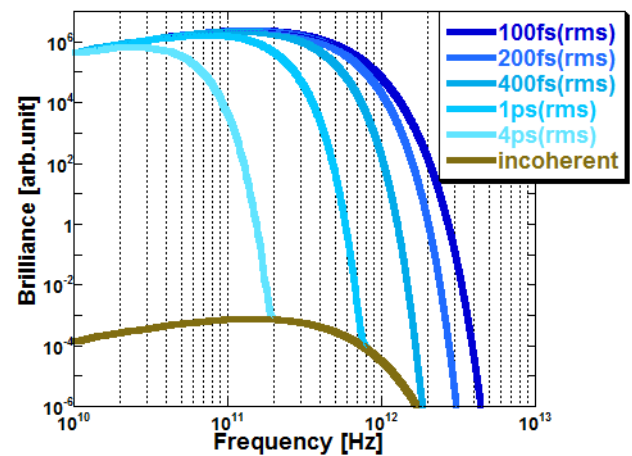


Figure 4: Synchrotron radiation calculated by SPECTRA

Figure 4 はバンチ長がより短くなるとより高い周波数の放射光が得られることを示している。従来の RF-Gun ではテラヘルツ領域の放射光は観測されないため、ECC-RF-Gun により生成された電子による放射光がテラヘルツ領域の周波数スペクトルを持つことが確認できればバンチ圧縮を確認できたことになる。我々はシミュレーションのようにバンチ長が圧縮されていることを確認するために ECC-RF-Gun を当研究室の加速器システムに組み込み、AI をターゲットとしたコヒーレント遷移放射光(CTR)、偏向電磁石によるコヒーレントシンクロトロン放射光(CSR)の測定実験を行った。実験のセットアップを Figure 5 に示す。

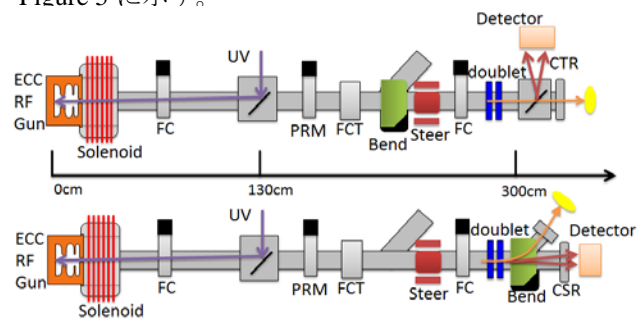


Figure 5: Beamline layouts for CTR(above) and CSR(below)

PARMELA から、カソードから約 3m 地点でバンチ長が最短となることが計算されていたため、光源点はカソードから約 3m の地点となるようにビームラインを組んだ。

放射光の測定には異なるテラヘルツ帯に感度を持つショットキーバリアダイオード検波器を複数用いた。具体的には 0.05THz 検波器(40-60GHz, millitech 社製)、0.1THz 検波器(75-110GHz, WiseWave 社製)、0.3THz 検波器(220-330GHz, WiseWave 社製)、0.6THz 検波器(500-750GHz, Virginia Diodes 社製)を使用した。

#### 4. 結果と考察

我々は CTR、CSR ともにテラヘルツ領域のコヒーレント放射光を測定することに成功した。ここでは CSR の測定実験について述べる。まず我々はシンクロトロン放射光がコヒーレントであることを確認した。すなわち、コヒーレントであれば式(1)、(2)から分かるように放射光は電荷量の 2 乗に比例することになる。0.1THz 検波器の前に 0.2THz のバンドパスフィルタを置いて、電荷量を変えながら検波器強度をプロットしたものが Figure 6 である。

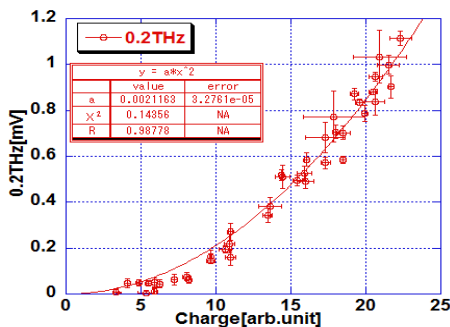


Figure 6: Coherent Synchrotron Radiation (CSR)

Figure 6 は放射光がコヒーレントであることを示し、この領域では十分短いバンチ長が達成されていると考えられる。

最適な加速位相から外れるとバンチ長は伸びるが、これを実験で確認した。位相を変えた時の各検波器のシグナルの変化をプロットし、電荷量の立ち上がる点に注目して横軸を揃えて比較したものが Figure 7 である。Figure 8 に示すように PARMELA による計算では加速位相が約 30° の場合にバンチ長が最小となることがわかっている。実際、Figure 7 に示すように各検波器のシグナルは位相が約 30° で最大となっている。また、より高い周波数の検波器で検出するためにはより短いバンチ長が要求されるため、検出できる位相の範囲が狭くなっている。

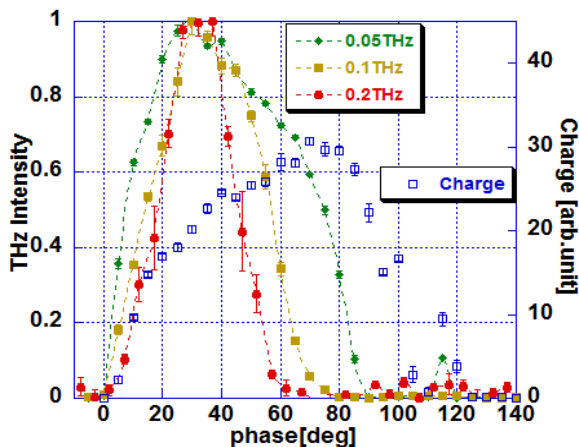


Figure 7: Phase dependence of various detectors

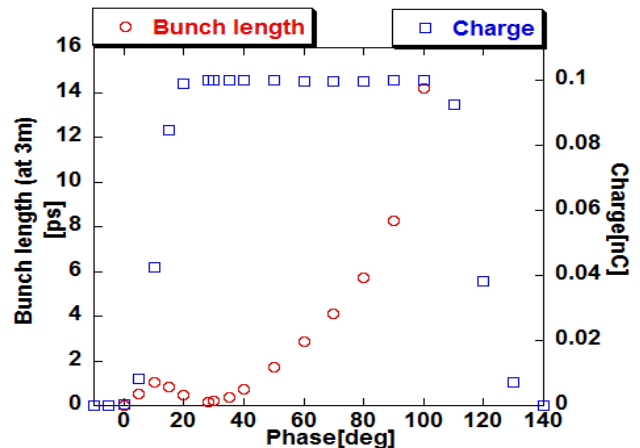


Figure 8: Phase dependence of bunch length (PARMELA)

同様に 0.3THz、0.6THz 検波器でも測定を行ったが、明確なシグナルは得られなかった。我々のセットアップではエッジ方向に放射される成分しか測定できないため、十分な磁場強度を与えることができず、SR の臨界周波数が 0.3THz 程度になったからだと考えられる。

#### 5. まとめと今後の予定

本研究室では電子ビームのバンチ長を圧縮することに特化した電子銃 ECC-RF-Gun を当加速器システムに組み込み電子ビームを生成するに至った。テラヘルツ領域の CTR、CSR の測定に成功したことで極短バンチ電子ビームが生成されたと考えられる。0.2THz の放射光を検出できたことと Figure 4 から、バンチ長は 1ps-500fs(rms)まで圧縮されたと考えられる。今後はビームライン、ECC-RF-Gun の調整を行う。また干渉計を組むことで CTR の周波数スペクトルをより広範囲で確認する。さらにテラヘルツイメージングへの応用も検討して行く。

本研究室ではビームの縦方向のプロファイルを横方向に変換することが可能な 2Cell 偏向空洞の製作を完了した<sup>[7]</sup>。ECC-RF-Gun は偏向空洞の性能評価にも利用できるだろうと考えている。

#### 参考文献

- [1] Y. Hosaka, et al., Radiat. Phys. Chem. 84.10-13, (2013)
- [2] K. Sakaue, et al., Radiat. Phys. Chem. 77.1136-1141, (2008)
- [3] Y. Yoshida, et al, Proc. of IPAC'12, THPPR049, (2012)
- [4] M. Kumaki, et al, Proc. of IPAC'12, MOOBA03, (2012)
- [5] K. Sakaue, et al., Proc. of IPAC'11, TUPC058, (2011)
- [6] Y. Koshiba, et al., Proc. of IPAC'13, MOPFI024, (2012)
- [7] Y. Nishimura, et al, Proc. of IPAC'13 WEPF1023, (2013)