

極短バンチ計測用 2Cell 型 RF-Deflector に関する研究

STUDY ON 2 CELL RF-DEFLECTOR CAVITY

FOR ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH MEASUREMENT

高橋猛之進^{#, A)}, 西村祐一^{A)}, 西山将大^{A)}, 坂上和之^{A)}
 鷲尾方一^{A)}, 高富俊和^{B)}, 浦川順治^{B)}
 Takenoshin Takahashi^{#, A)}, Yuichi Nishimura^{A)}, Masahiro Nishiyama^{A)}
 Kazuyuki Sakaue^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Toshikazu Takatomi^{B)}, Junji Urakawa^{B)}
^{A)} Waseda University
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We have been studying on a system to measure ultra-short electron beam bunch length at Waseda University. We adopted the rf-deflector system which can convert the longitudinal distribution to transverse by sweeping the electron bunch. By using HFSS, we optimized the design of the 2-cells rf-deflector which is operating on π -mode, standing wave, dipole (TM_{120}) mode at 2856 MHz. This rf-deflector was designed to have enough performance for measuring the 200 femto second bunch. Adjusting the cavity parameters, which was calculated in HFSS, we have finished manufacturing under the collaboration with High Energy Accelerator Research Organization (KEK). We will integrate the rf-deflector into an S-band Cs-Te photocathode rf electron gun system in Waseda University, and carry out bunch length measurement. In this paper, the design of rf-deflector, the estimation for rf-deflector performance, and the future plan will be described.

1. はじめに

早稲田大学では小型線形加速器を用いて様々な研究を行っており、電子線源として二種類の加速空洞を所持している。1.6Cell 型 S バンド Cs-Te フォトカソード RF 電子銃 (以下、RF-Gun) ではパルスラジオリス実験^[1]やレーザーコンプトン散乱^[2]への応用がなされ、ECC RF 電子銃(以下 ECC-Gun)ではコヒーレントテラヘルツ光生成^[3]への応用が期待される。RF-Gun で生成される数 ps バンチの縦方向プロファイルの詳細計測や ECC-Gun で生成される数 100fs バンチのバンチ長測定が今後必要となってくる。そのために RF-Deflector による高い時間分解能でのバンチ長測定を目指し、研究を進めてきた。

2. RF-Deflector によるバンチ長測定原理

RF-Deflector に高周波電磁波を供給すると形状固有の共振モードが励起され、ビーム軌道上の共振電磁場はビームに力を与える。共振電磁場は時間変化しているためにバンチ各部に働く力の大きさは異なるが、この力がビーム軌道に対して垂直に働く場合 RF-Deflector 通過後のビームはドリフトに伴い傾けられていく。これはビームの縦方向プロファイルが横方向プロファイルに変換されることを意味し、この横方向プロファイルを計測することでバンチ長を算出することが可能となる。

早稲田大学では TM_{120} モードを用いることで磁場によるローレンツ力のみをビームに及ぼす設計と

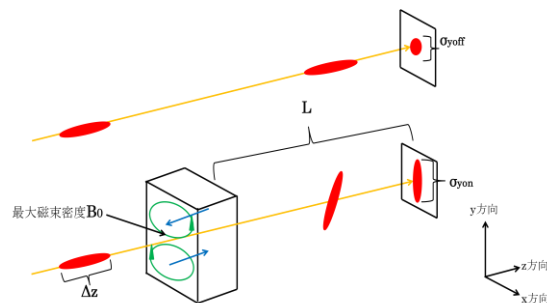


Figure 1: Outline of bunch length measurement.

した。RF-Deflector によるバンチ長測定概念図を Figure 1 に示す。バンチ長 Δz を算出する際に用いる理論式は電子に対する運動方程式を解くことで得られ、

$$\Delta z = \frac{E \sqrt{\sigma_{yon}^2 - \sigma_{yoff}^2}}{(2)cB_0L} \frac{1}{\cos(\omega t_0 + \phi) - \cos \phi} \quad (1)$$

となる。E はエネルギー、c は光速、cos の項はビームが RF-Deflector に入射する位相に依存する値である。また、分母の 2 は 2Cell 型の時に付く値である。ビームは Figure 1 に示した σ_{yoff} のように RF-Deflector なしの場合にも大きさを持っており、 σ_{yon} を測定する時に σ_{yoff} に埋もれる部分が少なければバンチ長測定の高時間分解能が高くなると考えられるので σ_{yon} を大きく、 σ_{yoff} を小さくすることが重要である。式(1)より B_0 や L を大きくすることで時間分解

[#] qwerty-ytrewq@toki.waseda.jp

能の向上、すなわち極短バンチの測定が可能になると言えるが、加速器施設の広さから L を大きくするには限界があるため、 B_0 が大きくなるように RF-Deflector 設計を行い、結果として直方体の空洞を二つ結合した 2Cell 型 RF-Deflector を採用した。

3. RF-Deflector の設計と製作

2Cell 型 RF-Deflector の設計^[4]には 3 次元電磁場解析コード HFSS を用いた。RF-Deflector は一種の空洞共振器であり、マクスウェル方程式を解くことによって空洞形状固有の共振モードが求められるので、2856MHz で TM120 モードが共振するような空洞パラメータを用いて設計を行った。この条件を満たす形状は x 方向長さ y 方向長さを調整することで幾通りにもなるが、その中でビーム軌道上の最大磁束密度 B_0 が一番大きくなる形状を採用した。直方体の形状により TM120 モードと TM210 モードの縮退をとり、安定なモード選択が可能である。

さらなる時間分解能の向上を目指し 2Cell 型へと改良した。 π モードで動作させることにより、より大きな力をバンチに与えることが可能となる。設計した 2Cell 型 RF-Deflector の概観を Figure 2 に示したが、ビーム軌道上の磁場強度分布は Figure 3 のように 1:1 となり、効率良くビームに力を与えることができる。

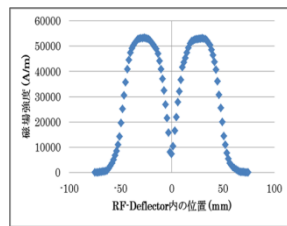
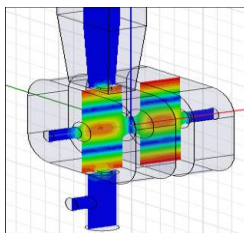


Figure 2: Structure of 2-cells RF-Deflector (HFSS). Figure 3: Magnetic field in 2-cells RF-Deflector (HFSS).

また、RF-Deflector に電磁波を供給する導波管との結合の状態もその性能を決める要素として重要であるが、導波管と RF-Deflector の結合部の大きさを調整することで導波管とのインピーダンス整合を行った。Figure 4 の HFSS 上での反射法の結果から 2856MHz 付近に π モードが共振しており、導波管からのエネルギー供給も十分であると言える。Figure 5 のスミスチャートを見れば結合定数 β がほぼ 1 であり、理想的な結合状態を表わしている。

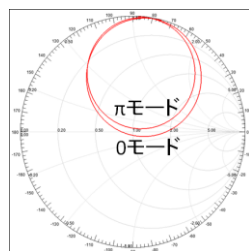
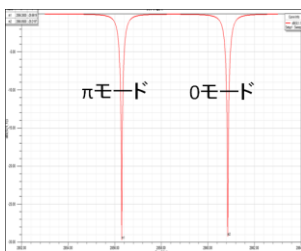


Figure 4: Reflecting method result (HFSS). Figure 5: Smith chart (HFSS).

以上の設計を元に RF-Deflector の製作を行った。製作は KEK と共同で行い、4 回の調整加工の後、導波管のろう付けを行い、Figure 6 に示した 2Cell 型 RF-Deflector が完成した。Figure 7 はビーズ法を用いた磁場強度分布測定結果であり、HFSS での結果とは少しずつが生じてしまったが、これは RF-Deflector に取り付けしたチューナーを使って調整することができる。また、Figure 8 にネットワークアナライザを用いた反射法の結果、Figure 9 にスミスチャートを示す。

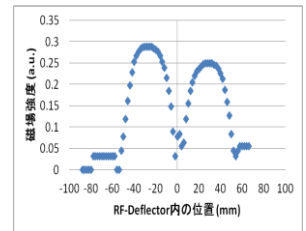
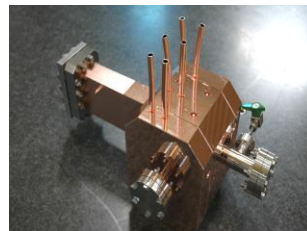


Figure 6: Structure of 2-Cells RF-Deflector. Figure 7: Magnetic Field in 2-Cells RF-Deflector.

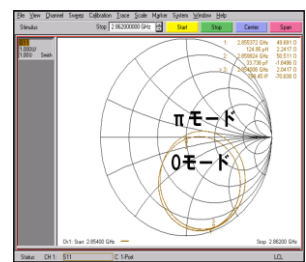
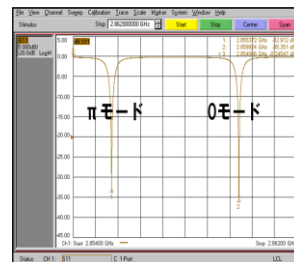


Figure 8: Reflecting method result. Figure 9: Smith chart.

これらの結果から Table 1 に示す通り、HFSS での設計値と実際のパラメータはほぼ一致しているといえる。各モードの共振周波数目標値に関しては大気中での計測であったことや温度依存性から実際の加速器システム環境で適切に動作するような値を設定している。目標値とのずれについても磁場強度比同様に、チューナーによる最適化が十分可能である。

Table 1: 2-Cells RF-Deflector Parameters

パラメータ	結果	目標値
π モード	2855.300MHz	2855.487MHz
0 モード	2859.852MHz	2860.037MHz
Δf	4.552MHz	4.55MHz(HFSS)
π モードの Q 値	16565	17282(HFSS)
磁場強度比	1.15:1	1:1
結合定数 β	1.047	1.000

4. バンチ長測定実験のセットアップ

RF-Deflector が完成し、ビームライン中に導入す

ることでバンチ長測定実験を行うことができるが、ビームライン中でのどの位置にどのコンポーネントを配置するかを決めなければならない。予定しているバンチ長測定実験のセットアップを Figure 10 に示す。

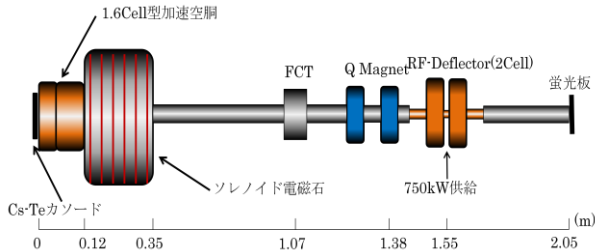


Figure 10: Setup of bunch length measurement.

バンチ長測定には RF-Gun を使い、ソレノイド電磁石でビームの拡がりを抑え、RF-Deflector 直前に置いた Q magnet で RF-Deflector OFF 時の蛍光板でのビームサイズ、すなわち式(1)の σ_{yoff} が小さくなるよう調整を行う。RF-Deflector が ON と OFF のそれぞれにおいて蛍光板での発光を CCD カメラでとらえ、バンチ長を算出する。蛍光板は厚さ 100 μ m、1.5 \times 3.5cm のものを用いる予定である。なお、RF-Deflector へのエネルギー供給はクライストロンで生成した 10MW の内、方向結合器によって分けられた 750kW の予定である。

ビームライン中への RF-Deflector の導入を行う前に σ_{yoff} の模擬測定として Figure 10 のセットアップにおいて RF-Deflector をビームパイプに取り換えた状態で測定を行った。 σ_{yoff} はできる限り小さくすべきであったのでソレノイド電磁石と Q magnet の電流値を調整しながらどの程度の値まで絞ることができるのかを調べた。Figure 11 は調整後のビームサイズを表わしており、その時のビームパラメータはエネルギー約 5MeV、電荷量約 20pC/bunch である。

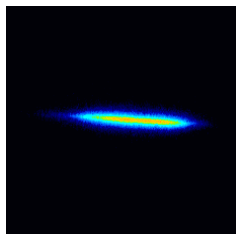


Figure. 11: Beam size measurement.

Figure 11 に示したビームサイズとして、 σ_{yoff} は RMS 値でおよそ 220 μ m となっている。RF-Deflector の性能に関しては後に述べるが、それを考慮すればこの σ_{yoff} は十分小さな値と言うことができる。

5. RF-Deflector の性能評価

2Cell 型 RF-Deflector を ON にすることでどの程度ビームを傾けることができるのかを調べるために、電子ビームトラッキングコード GPT を用いたシミュレーションを行った。Figure 10 と同様のセットアップを用い、ビームサイズ測定での結果と同様 σ_{yoff} が 220 μ m となるようにソレノイドや Q magnet

の電流値を調整した。Figure 12 に RF-Deflector の位相に対する y 方向重心位置と y 方向ビームサイズの関係を示したが、この結果から重心位置が 0 のまま変化しないゼロクロス位相においてビームサイズ最大となっていることがわかる。Figure 13 に RF-Deflector OFF 時の 2.05m 付近でのビーム形状、RF-Deflector ON 時ビームサイズ最大となる位相でのビーム形状を示しておく。Figure 13 から RF-Deflector が原理通りの効果を発揮していることがわかる。なお、横軸には時間 t をとり、ビームの進行方向を表わしている。

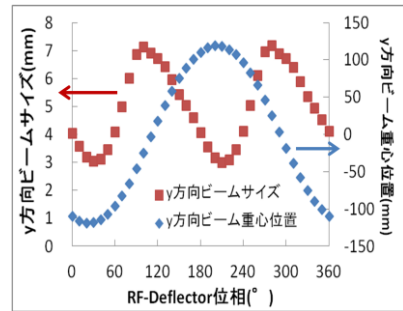


Figure 12: Beam size and center position of bunch to RF-Deflector phase.

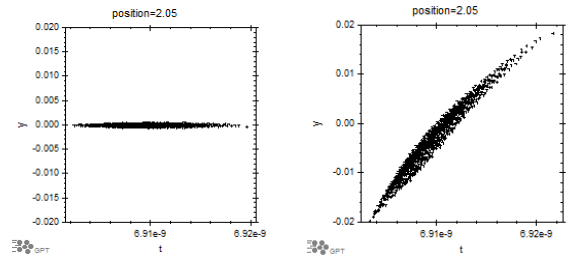


Figure 13: Beam shape in time direction distribution (left: RF OFF right: RF ON)

Table 2: Result of GPT Simulation

σ_{yoff}	219 μ m
Δz	3.04ps
σ_{yon}	6.91mm

Table 2 に GPT から得られた結果を示したが、重心位置の変化 Δy は

$$\Delta y = \frac{c^2 B_0 L}{E \omega} \{ \sin(\omega t_0 + \phi_0) - \sin \phi_0 \} \quad (2)$$

で表わされるから Figure 12 での結果と、 σ_{yoff} や Δz などのパラメータを用いることで B_0 を算出することができ、その値は 718G となった。式(1)に σ_{yoff} や Δz 、算出した B_0 などの値を代入すれば理論的な σ_{yon} として 7.00mm を得る。シミュレーションでの σ_{yon} の値と比べれば約 1%の誤差が生じていることとなり、これは空間電荷効果の影響や式(1)を導く際、簡単な

モデルを使ったことに起因すると考えられる。

このように理論式と実測値には何らかの誤差が必ず生じるはずだが、測定すべきバンチ長が短くなればなるほど誤差による影響は強く現れてしまうため、十分な精度を持った測定が困難になる。 σ_{yon} に ε_{yon} %、 σ_{yoff} に ε_{yoff} %の誤差が存在する時バンチ長 Δz の測定誤差は誤差伝搬の式より

$$\frac{\sqrt{\sigma_{yon}^4 \varepsilon_{yon}^2 + \sigma_{yoff}^4 \varepsilon_{yoff}^2}}{\sigma_{yon}^2 - \sigma_{yoff}^2} (\%) \quad (3)$$

となり、これは ε_{yon} の値より小さくならない。 B_0 は既に求められていて、 σ_{yoff} の値を設定すれば式(1)よりあるバンチ長に対する σ_{yon} が計算できるから式(3)を用いてバンチ長に対する測定誤差を計算することができる。例えば σ_{yon} の誤差が 5%であり、 σ_{yoff} の誤差が 20%である時のバンチ長測定誤差を Figure 14 に示す。

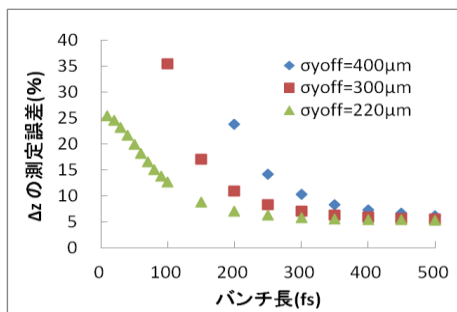


Figure 14: Error of bunch length measurement.

Figure 14 からわかるようにバンチ長がある値より小さくなると誤差が急激に増加し始めるが、 σ_{yoff} を小さくすることでバンチ長の測定誤差を抑えることができる。Figure 11 で示したビームサイズ測定では σ_{yoff} をおよそ 220μm まで絞ることができ、これを Figure 14 と照らし合わせると約 7%の誤差で 200fs のバンチを測定することが可能であり、RF-Deflector OFF 時のビームサイズ σ_{yoff} をできる限り小さく絞ることの重要性がよくわかる。バンチ長の測定誤差が σ_{yon} の誤差 5%より小さくならないことを考慮すれば誤差は十分抑えられており、2Cell 型 RF-Deflector の性能として 200fs のバンチは測定可能と言って良いだろう。

6. まとめと今後

RF-Deflector によるバンチ長測定の原理を基に高い時間分解能を実現するための RF-Deflector を HFSS によって設計した。強い共振磁場を得るための形状や 2Cell 型構造を用いることで 200fs のバンチ長測定が可能であることを GPT により見積もることができた。KEK での調整加工を経て完成した 2Cell 型 RF-Deflector の各パラメータは HFSS による設計値とほぼ一致し、生じたずれに関しても RF-Deflector に取り付けたチューナーにより容易に調整

が可能である。

今後、Figure 10 のセットアップでビームライン中に RF-Deflector を導入し、RF-Gun を用いてバンチ長測定実験を行う予定である。200fs といった極短バンチの測定が可能であることから、数 ps のバンチに対しては縦方向のプロファイルを詳細に計測できることが期待される。

参考文献

- [1] K. Ogata, et al., Proc. of IPAC'11, THPS090,(2011)
- [2] K. Sakaue, et al., Radiation. Phys. Chem. 77. 1136 –1141 (2008)
- [3] Y. Koshiba, et al., Proc. of IPAC 2013, MOPFI024 “ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH GENERATION BY AN ECC RF GUN“
- [4] Y. Nishimura, et al., Proc. of IPAC 2013, WEPFI023 “STUDY ON TWO-CELL RF-DEFLECTOR CAVITY FOR ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH MEASUREMENT“