

2-Cell RF Deflector を用いた電子ビームの時間構造計測 LONGITUDINAL ELECTRON BEAM PROFILE MEASUREMENT USING A 2-CELL RF DEFLECTOR CAVITY

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

Abstract

We have been studying a compact electron accelerator based on an S-band Cs-Te photocathode rf electron gun at Waseda University. We are applying this high quality electron beam to a pulse radiolysis experiment, soft X-ray generation, and coherent THz wave generation. In these application experiments, it is necessary to measure temporal distribution and bunch length of the electron beam for evaluating temporal resolution, luminosity, and coherence. Thus we adopted the rf deflector system which has high temporal resolution and the ability to measure them directly. It kicks the electron bunch with resonated rf electromagnetic field. Using this technique, the longitudinal distribution is mapped into the transverse space. The rf deflector has a 2-cell standing wave π -mode structure, operating in TM_{210} dipole mode at 2856 MHz. It provides a maximum vertical kick of 1.00 MV with 750 kW input rf-power which is equivalent to the temporal resolution of around 58 fs. In this paper, we report the details of our rf deflector, the latest progress of the bunch length measurement and future prospective.

1. はじめに

早稲田大学では、Cs-Te フォトカソード RF Gun を用いた小型電子加速器の研究を行っている。生成した高品質電子ビームは、放射線化学反応の初期過程を解明する為のパルスラジオリシス実験^[1]、逆コンプトン散乱による軟 X 線生成^[2]、極短バンチ電子ビームからのシンクロトロン放射・遷移放射によるコヒーレントテラヘルツ光生成^{[3][4]}などに応用している。これらの応用研究において、時間分解能、ルミノシティ、コヒーレンスなどを求めるために、電子ビームの時間方向情報、特に電子ビームの進行方向の長さであるバンチ長の計測が必須である。そこで、早稲田大学では、様々なバンチ長測定法がある中で、バンチ長及び時間方向プロファイルを高時間分解能かつ直接、計測することが可能な RF Deflector 空洞を採用し、研究及び開発を行っている。

2. RF Deflector による測定原理

RF Deflector の原理図を Figure 1 に示す。RF Deflector 空洞は、RF Gun 同様、一種の高周波空洞となっており、電磁波を供給すると固有の電磁場が空洞内で共振する。早稲田大学の RF Deflector では TM_{210} モードと呼ばれる、進行方向に電場が立ち、その周りを時計回りに磁場が回転する電磁場が誘起される。ビーム軌道上には、磁場しか立っておらず、電子はこの磁場のみからローレンツ力を受け、RF

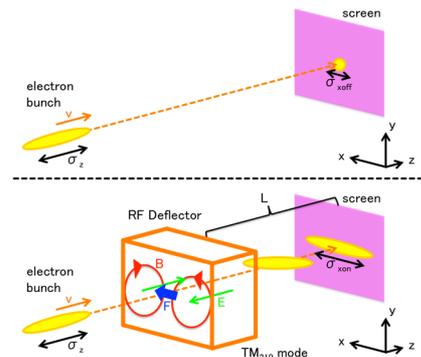


Figure 1: Bunch length measurement using an rf deflector.

Deflector を出た後大きく広がっていく。電磁場は時間変化しているので、電子ビームは進行方向の位置毎に異なる力を受けている。そこで、電子ビームの横方向プロファイルを RF Deflector の下流のスクリーンで投影すれば、縦方向の情報が得られることになる。つまり、RF Deflector を用いることで、縦方向の情報を、横方向の情報に変換することが出来る。

RF Deflector からスクリーンまでの転送行列を考えることにより、電子のビーム重心からのズレ Δz と、スクリーンの中心からのズレ Δx の間には、

$$\Delta x = \frac{eV_T}{p_z c} L \sin(k\Delta z + \varphi) \cong \frac{eV_T}{p_z c} L [k\Delta z \cos \varphi + \sin \varphi] \quad (1)$$

[#] masa.hero@ruri.waseda.jp

という関係があることが分かる^[5]。ここで、 $p_z c/e$ は eV 単位の電子ビームのエネルギー、 V_T は Deflecting Voltage、 L は RF Deflector とスクリーン間のドリフト長、 k は電磁波の波数、 ϕ は電磁波の位相を表す。式変形に際し、 Δz が電磁波の波長より短い ($\Delta z \ll 1/k$) という近似を用いた。また、 ϕ として Figure 2 のようなゼロを横切る位相 (ゼロクロス位相) を選ぶと、(1)式より、

$$\Delta x = \frac{eV_T}{p_z c} L k \Delta z \quad (2)$$

となる。このような位相を選ぶことで、電子ビームは最も良く偏向される。

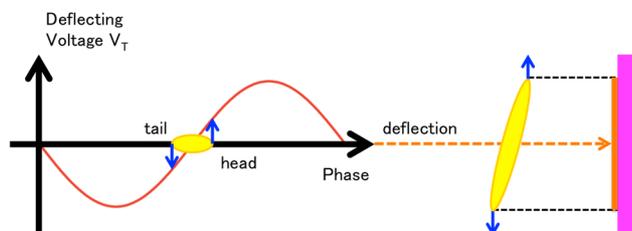


Figure 2: The schematic of rf deflection by rf zero-crossing phase.

(2)式を踏まえ、ビームサイズを考慮することにより、バンチ長 σ_t は、

$$\sigma_t = \frac{p_z c}{eV_T \omega L} \sqrt{\sigma_{xon}^2 - \sigma_{xoff}^2} \quad (3)$$

と表される。また、時間分解能 σ_{t0} は、

$$\sigma_{t0} = \frac{p_z c}{eV_T \omega L} \sigma_{xoff} \quad (4)$$

と表される。 ω は電磁波の角周波数、 σ_{xon} と σ_{xoff} は、それぞれ RF Deflector が ON 時、OFF 時のビームサイズを表す。(4)式から分かることは、時間分解能は Deflecting Voltage V_T 、角周波数 ω 、ドリフト長 L を増やすと良くなり、ビームサイズ σ_{xoff} 、ビームエネルギー $p_z c/e$ が増えると悪くなるということである。 ω は高周波源に固有の値であり、 L も施設の大きさから制約を受けてしまう。また、バンチ長測定の為にビームエネルギー $p_z c/e$ を小さくすることは応用研究においては本末転倒である。結局、時間分解能を高めるためには、RF Deflector の Deflecting Voltage V_T を大きくし、実験においてビームサイズ σ_{xoff} を小さくする必要がある。そこで、RF Deflector の設計においては、なるべく Deflecting Voltage V_T を大きくすることが求められた。

3. RF Deflector の設計・製作^[6]

RF Deflector の設計には、電磁場解析コード

HFSS(High Frequency Structure Simulator)を、性能と実験結果の評価には、電子ビームトラッキングコード GPT(General Particle Tracer)を用いた。空洞内に TM_{210} モードの電磁場が立つような境界条件を課し、RF Deflector の形状として、円筒型と直方体型のものでシミュレーションしたところ、ビーム軌道上の磁場強度は、直方体型が円筒型を上回り、直方体型の空洞の x 方向長さ y 方向長さの比がおおよそ 1.4:1 の時磁場強度、 Q 値の観点から最適であった。また、立方体型ではなく、直方体型の採用により、 TM_{210} モードと TM_{120} モードの縮退を解くことにも成功した。 z 方向の長さは、ビームが光速であることを仮定し、ビームが空洞内に入っている時間が磁場周期の半周期となる長さから検討を始めた。空洞の Q 値を上げる為に直方体の角に丸みを付けて空洞の表面を小さくすることで、空洞壁でのエネルギー損失をなるべく減らしつつ、空洞内での磁場強度を最も高める最適化を行った。ところが、設計上この RF Deflector では 100 fs 程のバンチ長測定が困難であることが判明し、更なる時間分解能の向上に供する為に、2-Cell 型 RF Deflector の設計にシフトした。なぜなら、同じ電力で 2-Cell 型 RF Deflector の Deflecting Voltage V_T は、1-Cell 型 RF Deflector のそれに対し、1.41 倍大きいからである。最終的には導波管とのインピーダンスマッチングを HFSS にて設計し、 z 軸長さは GPT によって実際にバンチを傾けることで評価して最適化した。製作した RF Deflector の写真を Figure 3 に、各パラメータを Table 1 に載せる。Table 1 を見ると、各パラメータがほぼ設計通りの値となっていることが分かる。また、ネットワークアナライザーを用いたビーズ摂動法による磁場分布測定結果、及び反射法による共振周波数測定結果をそれぞれ Figure 4、Figure 5 に載せる。磁場分布は計算通りほぼ 1:1 となっており、クライストロンから供給される電磁波の周波数 2856 MHz 付近で π モードの電磁波が共振していることが確認出来た。また、RF Deflector への供給電力が 750 kW 時に、時間分解能 58 fs、Deflecting Voltage 1.0 MW を達成している。

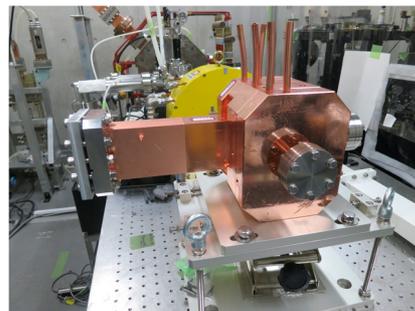


Figure 3: The photograph of the rf deflector.

Table 1: Parameters of RF Deflector

Parameters	Results	Design value
π -mode	2855.348 MHz	2855.372 MHz
0-mode	2859.874 MHz	2859.922 MHz
Δf	4.526 MHz	4.55 MHz (HFSS)
Q value on π -mode	16298	17282 (HFSS)
Ratio of magnetic field	1:0.9875	1:1
Coupling constant β	0.839	1.000

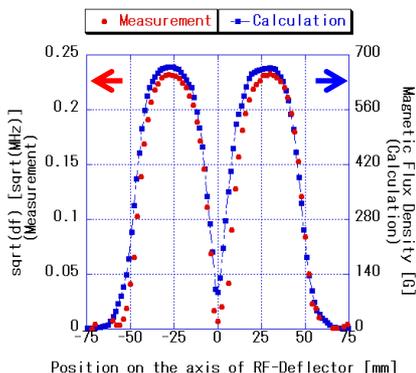


Figure 4: Result of magnetic field distribution measurement.

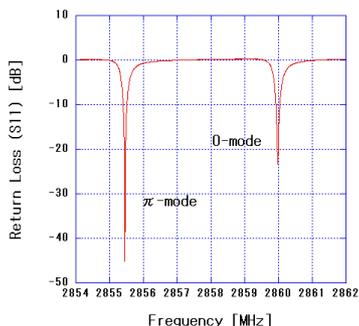


Figure 5: RF resonant frequency measurement.

4. RF Deflector によるバンチ長測定

4.1 バンチ長測定セットアップ

設計通りの RF Deflector が製作出来たことを確認した後、実際に早稲田大学のビームラインに RF Deflector をインストールし、バンチ長測定実験を行った。そのセットアップを Figure 6 に示す。

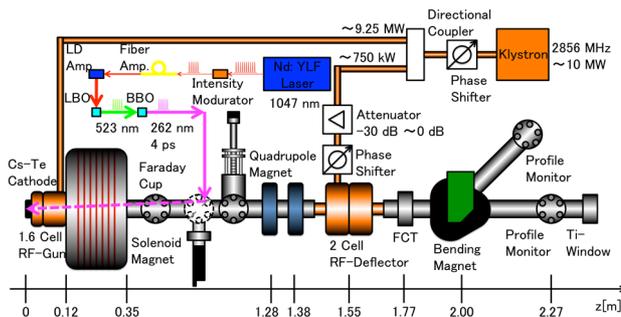


Figure 6: Set up for bunch length measurement.

カソード照射用レーザーには、Nd: YLF レーザーを種光として用いており、波長 1047 nm の赤外光のパルスレーザーが発振されている。その後、パルス切り出しや波長変換を二度行い、最終的にパルス幅がおよそ 4 ps の波長 262 nm の紫外光へと変換し、カソードへほぼ正面から照射している。ビームライン最上流に RF Gun が設置され、直下には空間電荷エミッタ補正用のソレノイド電磁石が設置されている。カソードから 1.28 m と 1.38 m の位置に先に述べた、 σ_{off} を絞る為の四重極電磁石が設置されている。RF Deflector は 1.55 m の地点に置かれ、クライストロンから供給される 10 MW の電磁波を、方向性結合器を用いて 750 kW 分だけ供給している。減衰器により、ビームがスクリーンに収まる様、適切な量の電磁波を供給することが出来る。また、方向性結合器の後に移相器を設置することで、RF Deflector に供給される電磁波は RF Gun に供給される電磁波とは独立して位相を定めることが出来る。2.27 m の位置にビームプロファイル計測用のスクリーンが設置されており、ドリフト長 L は 0.72 m となっている。

4.2 Deflecting Voltage V_T の較正

バンチ長測定実験に際し、まず、Deflecting Voltage V_T の較正を行った。RF Deflector とスクリーン間の転送行列を考えることにより、電子ビームの重心位置は、(1)式に $\Delta z=0$ を代入すると、

$$\Delta x = \frac{eV_T}{p_z c} L \sin \varphi \quad (5)$$

と \sin カーブを描くことが分かる。そこで、RF Deflector に供給する電磁波の位相 φ を変化させ、 \sin カーブでフィッティングを行い、その振幅を計測すれば、Deflecting Voltage V_T が算出することが出来る。重心位置の変化の結果を Figure 7 に載せる。この振幅 12.195 mm から、Deflecting Voltage V_T はバンチ長測定の際に通常用いている減衰 -6 dB 時におよそ 0.40 MV と算出された。

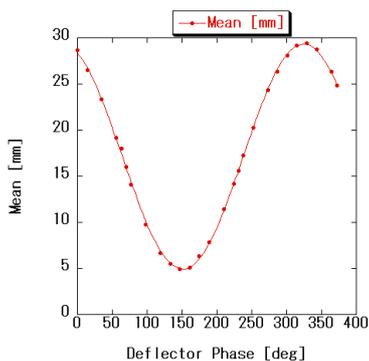


Figure 7: Deflecting voltage calibration.

4.3 バンチ長測定実験

以上の結果を踏まえ、早稲田大学の RF Gun で生成した電子ビームのバンチ長測定を行った。結果として、電荷量が 200 pC の電子ビームのプロファイル及びその x 方向への射影の一例を Figure 8 に示す。Figure 8 を見ると、時間方向の情報が綺麗にプロファイルに投影されていることが分かる。RF Deflector OFF 時のビームサイズ $\sigma_{xoff} = 365 \mu\text{m}$ 、RF Deflector ON 時のビームサイズ $\sigma_{xon} = 4.2 \text{ mm}$ から、(1)式を用いて、バンチ長 σ_t は 3.79 ps と算出することが出来た。これは、カソードに照射される UV レーザーのパルス幅がおよそ 4 ps であることと整合性が取れている。

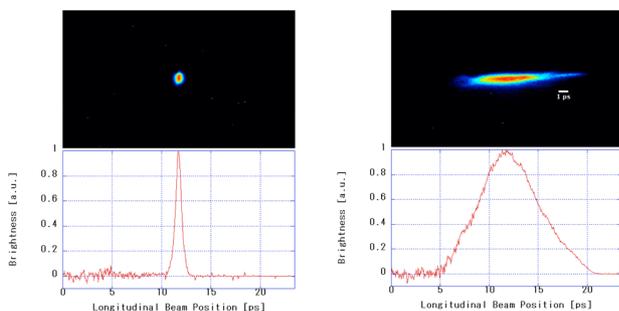


Figure 8: Electron beam profiles with rf deflector “off” (left) and “on” (right). The bottom line profiles show the projection to x direction.

また、照射 UV レーザーの光量を調節することで、電子ビームの電荷量を変化させ、1 nC とした際の電子ビームのプロファイル及びその射影の一例を Figure 9 に示す。

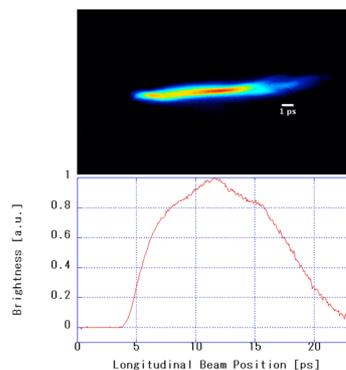


Figure 9: Electron beam profile. The bottom line profiles show the projection to x direction.

Figure 9 と Figure 8 右図を比較すると、明らかにビームプロファイル及びその x 方向への射影が異なっており、大きく広がっていることが見て取れる。この広がりは、電荷量の増大に伴う、空間電荷効果によるものと考えられる。

さらに、RF Gun に供給する電磁波の位相を変化させた際のバンチ長の変化を、電子ビームの電荷量が 200 pC、1 nC の場合について測定した。結果を Figure 10、Figure 11 に載せる。

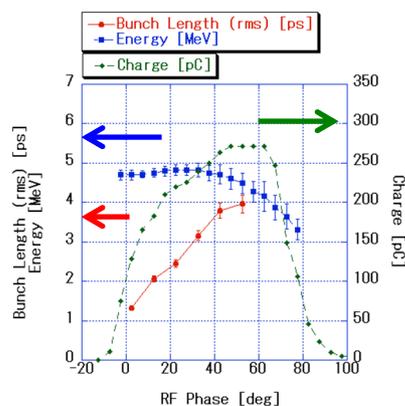


Figure 10: RF phase dependence of the bunch length, beam energy, and charge (200 pC).

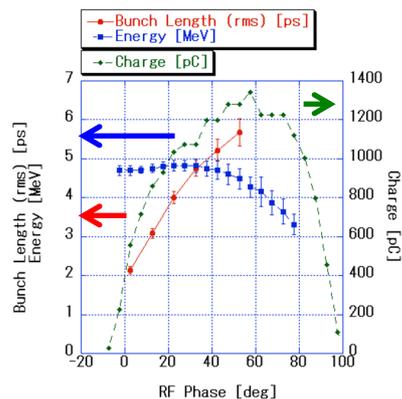


Figure 11: RF phase dependence of the bunch length, beam energy, and charge (1 nC).

Figure 10 と Figure 11 を比較すると、まずどちら

も RF 位相の増加に伴い、電子ビームの電荷量が増えるのに従い、バンチ長が伸びていることが分かる。バンチ長について詳しく見てみると、1 nC の場合は、200 pC の場合に比べ、バンチ長の絶対値が大きいだけでなく、その変化量も大きいことが分かる。これらの結果も、1 nC という電荷量をもたらす空間電荷効果によるものと考えられる。

4. まとめと今後

早稲田大学で製作したオリジナルの RF Deflector を用いることで、早稲田大学のフォトカソード RF Gun から生成される、電子ビームのバンチ長及び時間方向分布を計測することに成功した。また、電荷量、RF 位相という各パラメータに対するバンチ長の依存特性も知ることが出来た。その際、電荷量がバンチ長に大きく影響していることが確認出来た。今後としては、エネルギーの情報を空間方向情報に変換する Bending Magnet と時間方向情報を空間方向情報に変換する RF Deflector を組み合わせて、時間方向情報とエネルギー情報の相関関係である位相空間分布を測定すること等を通して、更なるフォトカソード RF Gun からの電子ビームのダイナミクスを計測するとともに、応用研究に供する為に様々なビームを生成する為の利用を考えていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Hosaka, et al., Radiat. Phys. Chem. 84, 10, 2013.
- [2] K. Sakaue, et al., Radiat. Phys. Chem. 77, 1136–1141, 2008.
- [3] K. Sakaue, et al., Phys. Rev. S. T. Accel. Beams, 17, 023401, 2014.
- [4] Y. Koshiba, et al., Phys. Rev. S. T. Accel. Beams, to be published.
- [5] K. Sakaue, et al., Nucl. Instrum. Meth., under review.
- [6] Y. Nishimura, et al., Nucl. Instrum. Meth., to be published.