

RF-Deflector を用いた RF-Gun における電子ビームの傾き角計測

BUNCH TILT ANGLE MEASUREMENT BY USING RF DEFLECTING CAVITY

中里佑介^{#, A)}, 西山将大^{A)}, 佐々木智則^{A)}, 坂上和之^{B)}, 鷲尾方一^{A)}

Yusuke Nakazato^{#, A)}, Masahiro Nishiyama^{A)}, Tomonori Sasaki^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Masakazu Washio^{A)}

^{A)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

^{B)} Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

Abstract

We have been studying a high quality electron beam generated by a photocathode RF gun at Waseda University. The electron beam is applied to a pulse radiolysis experiment, laser Compton scattering for soft X-ray generation, and a THz imaging experiment using coherent radiation. In these application, longitudinal parameters of the electron beam is important. For this reason, we developed the RF deflector system which has high temporal resolution and can directly convert longitudinal distribution of the beam to transverse, and performed longitudinal profile measurements of an electron beam from the RF gun. During a series of experiments using an RF deflector, we found that the bunch had a certain angle with respect to z axis. Thus we investigated the mechanism of bunch tilting. In this paper, we report the principle of measurement, experimental results of the bunch tilt angle measurement and future prospects.

1. はじめに

早稲田大学では、フォトカソードを用いた RF-Gun によって高輝度・短パルス・低エミッタンス等の特徴を持つ高品質な電子ビームを生成している。生成した電子ビームは、パルスラジオリシスやレーザーコンプトン散乱による軟 X 線生成実験、コヒーレント放射を利用したテラヘルツイメージング実験などに応用している。電子ビームを応用するにあたり、その詳細な構造の理解は非常に重要であるといえる。特に縦方向の情報はそれぞれの応用において重要なパラメータであり、本研究室では電子ビームの縦方向測定を目的として RF-Deflector と呼ばれる装置を独自に設計・開発し、これまでに縦方向密度分布測定、縦方向位相空間分布測定を行ってきた。RF-Deflector とは内部に電磁場が共振する空洞共振器であり、時間変化する磁場によって電子ビームの位置ごとに異なるローレンツ力を与え、偏向する装置である。この装置を使った実験を行う中で、偏向させる方向によって電子ビームのビームサイズが異なる現象が確認され、それが電子ビームの持つ傾きによるものであることが考えられた。そこで我々は RF-Deflector を使用して電子ビームの持つ傾きの角度を測定した。本発表では様々なパラメータを変化させた際のビームの傾き計測結果、及び今後の課題について報告する。

2. ビーム傾き角の測定原理

RF-Deflector の原理を Figure 1 に示す。空洞の内部では電子軌道上に強い磁場が共振しており(TM₂₁₀モード)、電子ビームの進行方向の位置ごとに異なるローレンツ力が加えられる。ビームの重心位置に対する進行方向(z 方向)の変位を Δz とし、Deflector に

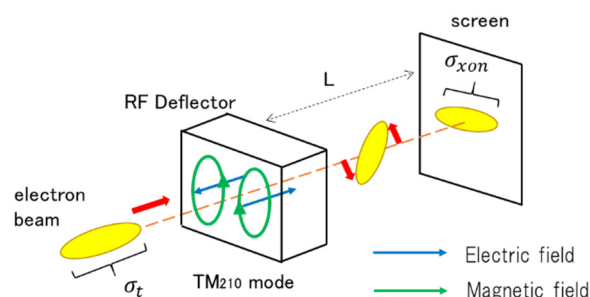


Figure 1: The principle of an RF deflector.

よってその位置にある電子が受ける x 方向の変位を Δx とすると、その関係は次のように表せる。

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

ここで、 E はエレクトロンボルト単位の電子のエネルギー、 V_T は Deflecting Voltage、 L は Deflector からスクリーンまでのドリフト距離、 k は電磁波の波数、 φ は電磁波の位相を表す。 φ がゼロとなるような電磁波の位相を選択することによって、式(1)は以下のように書き換えることができる。

$$\Delta x = \frac{V_T L}{E} k\Delta z \quad (2)$$

このような位相をゼロクロス位相と呼ぶ。ゼロクロス位相近傍では電子ビームの重心位置からのずれに対して線形な変位を与えることができる。このようにして電子ビームの進行方向の分布は横方向に変換され、スクリーンに投影される。電子ビームの分布をガウシアンで仮定すると、バンチ長 σ_z は式(2)を考慮して以下のように算出できる。

[#] fcb_8_dsw.frst@akane.waseda.jp

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

ω は電磁波の角周波数、 σ_{xon} 及び σ_{xoff} はそれぞれ Deflector が on と off のときのビームサイズを表す。ここで、Skewing Strength T を $T \equiv V_T L / E$ と定義して式(3)を変形すると次のようになる。

$$\sigma_{xon}^2 = \omega^2 \sigma_t^2 T^2 + \sigma_{xoff}^2 \quad (4)$$

この式(4)から、Deflector が on のときのビームサイズの 2 乗が Skewing Strength T の 2 乗に比例することがわかる。また、電磁波の位相 ϕ に対する電子ビームの重心位置 x_c の変化は

$$x_c = T \sin \phi \quad (5)$$

と表せるため、位相ごとの電子ビームの重心位置を測定することで T を求めることができる。

以上より、Skewing Strength T とビームサイズ σ_{xon} をそれぞれ測定すると、式(4)より横軸を T 、縦軸を σ_{xon} とした時のプロットは 2 次関数でフィッティングできる。電子ビームに傾きがないとき、Deflection の方向を変えてもビームサイズは変わらず、2 次関数の軸は $T=0$ となるが、実際は Figure 2 に示すように Deflection の方向によって異なるプロファイルが得られるとともに、2 次関数の軸もずれることになる。(Figure 4 参照)そのときの 2 次関数の軸の値を T_{axis} とすると、電子ビームの傾き角 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{T_{axis}}{0.292} \right) \quad (6)$$

という式で算出することができる。



Figure 2: Electron beam profiles. Measured beam sizes varied when the polarity of deflection changed.

3. ビーム傾き角測定

3.1 実験セットアップ

傾き角測定のセットアップを Figure 3 に示す。RF-Gun によって生成された電子ビームは、ソレノイド電磁石によってエミッタンス補正を受け、その後スクリーン上でビームサイズが最も小さくなるように四重極電磁石で収束される。FCT はビームの電荷量の測定に用いられる。

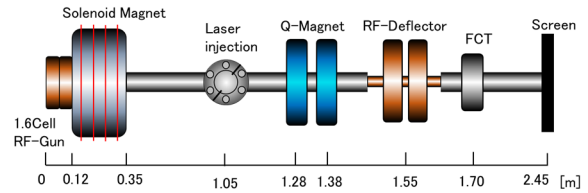


Figure 3: Experimental setup of bunch tilt angle measurement.

カソードへのレーザーの照射方法は、垂直入射と斜入射の 2 種類が存在する。垂直入射では、カソードから 1.05m の位置に設置された入射ミラーでレーザーを反射させ、カソード面に対してほぼ垂直に入射させることができる。垂直入射によって生成されるビームは斜入射と比べて初期ビームサイズ、バンチ長、エミッタンスが小さいといった特徴を持つ。斜入射では、レーザーは RF-Gun に付属された入射ポートからカソード面に対して入射角 67.5 度で照射されるため、初期ビームサイズが大きくなる。またレーザーがカソード面に照射される際に時間差が生じ、初期バンチが傾きを持つことが予想される。このようにして生成された電子ビームは、垂直入射と比べてバンチ長、エミッタンス等が大きくなってしまう。一方でレーザーの偏光を有効に用いることで垂直入射よりも大きな電荷量を得ることができる。

3.2 加速位相に対する傾き角の変化

測定結果の 1 例を Figure 4 に示す。この結果を見ると、プロットが 2 次関数でフィッティングできていることがわかる。2 次関数の軸の部分にはビームサイズが最も小さい、すなわちビームの傾きがゼロであることを示しており、軸がゼロからずれていることからこの電子ビームが一定の傾きを持っていることがわかる。式(6)よりこの電子ビームのもつ傾き角が 27.3 度と算出された。このようにして RF-Deflector を用いることで電子ビームの傾き角の測定に成功した。

次に垂直入射、斜入射それぞれにおいて RF-Gun の加速位相を変化させながら傾き角の測定を行った。その結果を Figure 5 に示す。斜入射では、低位相側で大きな傾きが算出され、加速位相が上がるにつれてその傾きは小さくなっていく結果となった。低位相側の傾きは、初期

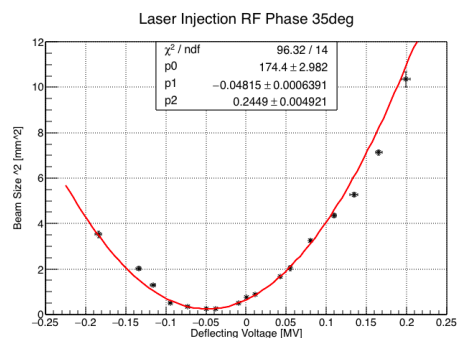


Figure 4: One of the results of bunch tilt angle measurement.

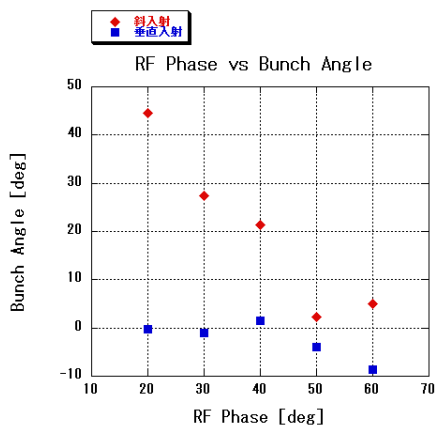


Figure 5: Bunch tilt angle as a function of laser injection RF phase.

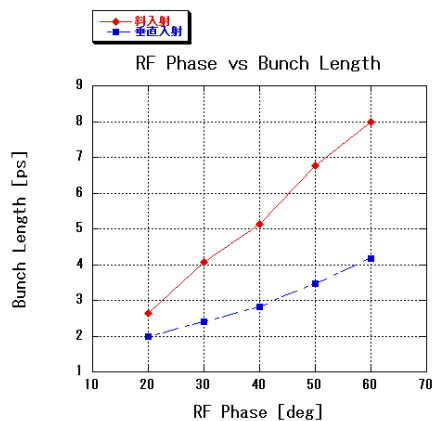


Figure 6: Bunch Length as a function of laser injection RF phase.

バンチが持つ傾きに由来するものと考えられる。また Figure 6 に示すように、加速位相が大きくなるとバンチ内のエネルギー広がりが大きくなり、バンチ長が大きくなっていく。そのため高位相側で傾きは小さくなっていったと考えている。一方垂直入射では、どの加速位相においても傾きは小さかった。これらの結果から、レーザーの入射方法や加速位相が生成される電子ビームの傾きに関係していることがわかった。

3.3 レーザー照射位置に対する傾き角の変化

垂直入射における傾き角測定の結果、レーザーを垂直に入射しているにもかかわらず一定の傾きが生じていることがわかった。その原因として、生成された電子ビームが RF-Gun 内部で完全に中心を通っていないために加速電場の横方向成分の影響を受けたということが考えられた。そこでカソード上のレーザー照射位置を変化させながら傾き角の測定を行った。その結果を Figure 7 に示す。Figure 7 を見るとレーザー照射位置によって傾き角が変化していることがわかる。また、カソードの中心(座標の原点)に照射した場合よりも傾きが小さくなる結果も得られた。これらの結果は、電子ビームが加速電場の横方向成分の影響を受けてその傾きを変えること、またレーザー照射位置によって傾きを補正できることを示している。

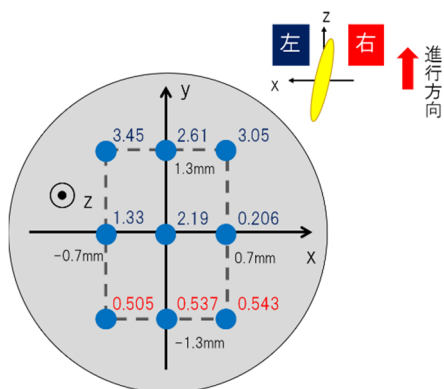


Figure 7: Bunch tilt angle for each position of laser injection.

4. まとめと今後

我々は RF-Deflector を用いることで RF-Gun により生成された電子ビームの傾き角を測定した。カソード面に対してレーザーを斜めに入射させることで、生成される電子ビームに傾きが生じ、その傾きは加速位相によって変化することがわかった。また、レーザーを垂直に入射させた場合でも一定の傾きが算出される結果が得られた。この傾きはレーザーの照射位置によって変化したことから、加速電場の横方向成分の影響を受けたものとみられる。また、レーザーの照射位置を調整することで傾きの補正が可能であることが示唆された。

今後はソレノイド電磁石の電流値やビームの電荷量など、さらにパラメータを増やして傾き角のデータを取得したいと考えている。また、傾き角測定の手法を応用することで電子ビームに任意の傾きを付与することができるため、この知見をクラブ衝突等の応用研究に生かしていきたいと考えている。

参考文献

- [1] K. Sakaue *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 026301 (2015).
- [2] M. Nishiyama *et al.*, Proc. of FEL2014, THP084 (2014).
- [3] Y. Nishimura *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 764 (2014) 291-298.