

RF-Deflector を用いた電子ビームの時間分解位相空間分布計測

TIME-RESOLVED TRANSVERSE PHASE SPACE MEASUREMENTS OF THE PULSED ELECTRON BUNCHES USING AN RF DEFLECTING CAVITY

大塚誠也^{#, A)}, 佐々木智則^{A)}, 小柴裕也^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}

Seiya Otsuka^{#, A)}, Tomonori Sasaki^{A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}

^{A)} WISE, Waseda University

^{B)} UT-PSC, The University of Tokyo

Abstract

At Waseda University, we have been studying applied research using electron beam generated by a photocathode rf-gun. In applied research, it is essential to understand the detailed characteristics of the electron beam. In particular, phase space distribution and its area (i.e. emittance) are important parameters. Since a phase space distribution is represented by superposition of time-resolved distributions, measurement of the time-resolved phase space distribution is very important for understanding the characteristics of the beam. In this study, we measured the time-resolved transverse phase space distribution of the pulsed electron bunches by combining the slit scan method and an rf-deflecting cavity. In this presentation, we evaluate the time-resolved phase space distribution when changing the parameters of the rf-gun and discuss the beam characteristics and dynamics.

1. はじめに

早稲田大学ではレーザーフォトカソード RF 電子銃 (RF-Gun) を用いた応用研究を行っている。RF-Gun から生成される電子ビームは高輝度・短パルス・低エミッタンスといった優れた特徴をもち、放射線化学反応の初期過程解明を目指すパルスラジオリシス[1]やコヒーレントチェレンコフ放射を利用した THz 光生成[2]、レーザーコンプトン散乱による X 線生成[3]等の応用研究に利用されている。これらの応用研究においては、ベースとなるビームの特性、パラメータの詳細な理解が必須である。特に位相空間分布およびその面積で定義されるエミッタンスは、ビームの品質を表す重要なパラメータである。位相空間分布はビームを時間方向に分解した分布の重ね合わせと捉えることができる。そのため、ビームの特性の理解や高品質化のためには時間分解された位相空間分布の計測が非常に重要である。本研究ではスリットスキャン法と RF-Deflector[4]を組み合わせることで RF-Gun から生成される電子ビームの横方向時間分解位相空間分布の計測を行った。RF-Deflector で時間方向プロファイルを取得した上で時間分解能より大きな時間幅でビームを時間方向にスライスし、各スライスでスリットスキャンを行うことで時間分解位相空間分布を取得した。本発表では RF-Gun のパラメータを変化させたときの電子ビームの時間分解位相空間分布の振る舞いを評価し、ビームの特性およびダイナミクスを議論する。

2. 計測原理

2.1 RF-Deflector の原理

RF-Deflector の原理図を Fig. 1 に示す。RF-Deflector は TM_{210} モードの RF 電磁場が共振する空洞共振器で、ビーム進行軸上に時間変化する RF 磁場が立つ。この

RF 磁場のゼロクロスに相当する位相で電子ビームを注入することで、電子ビームは進行方向位置毎に線形に異なるローレンツ力を受ける。すると、電子ビームは自由空間を進行するにつれて横方向に引き伸ばされるため、スクリーン上で進行方向の情報を横方向に変換して直接取得することが可能である。

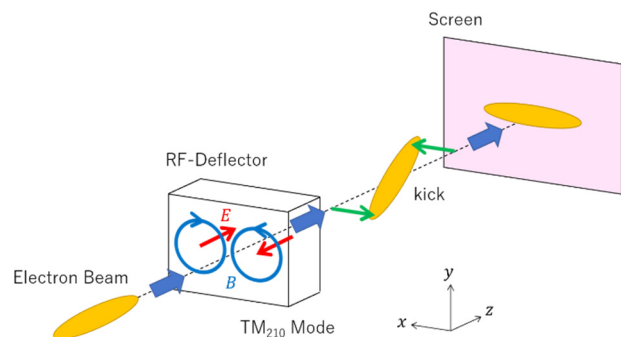


Figure 1: The diagram of an rf-deflecting cavity.

2.2 スリットスキャン法の原理

スリットスキャン法はビームの位相空間分布およびエミッタンスを取得する際に広く用いられる手法である。スリットスキャン法の原理図を Fig. 2 に示す。スリットスキャンでは、まずスリットでビームの一部を切り出すことで、ビームの位置情報を取得する。その後、スリットを通過したビームレットは自由空間をドリフトするにつれて広がっていき、最下流のスクリーン上でビームの広がりを取得する。スクリーン上のビームの広がりから、ビームの発散角分布を取得できる。以上より、スリット位置上の位相空間分布を Fig. 3 のように短冊で当てはめることができる。スリット位置をビームが占める全領域でスキャンして同様の測定を繰り返すことで、ビームの位相空間分布を取得できる。また、位相空間分布の面積からエミッタンスを求めることができる。

[#] s-otsuka@ruri.waseda.jp

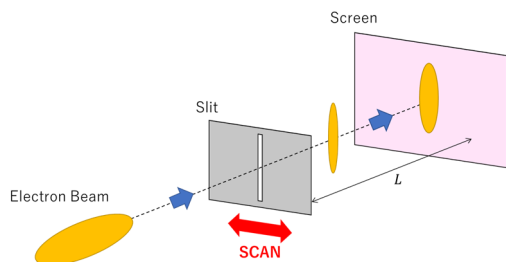


Figure 2: The diagram of slit scan method.

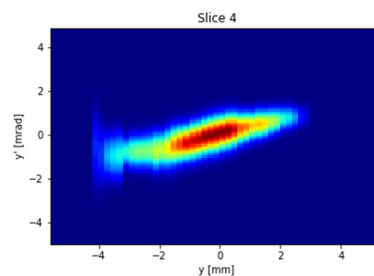


Figure 5: An example of time-resolved transverse phase space.

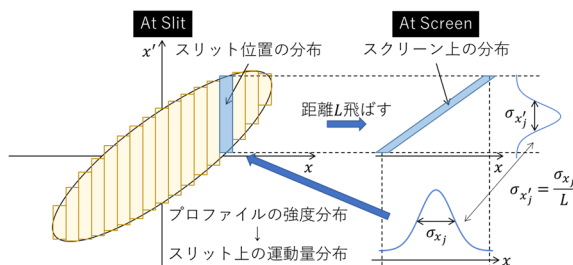


Figure 3: The diagram of slit scan method.

2.3 時間分解位相空間分布計測の原理

スリットスキャン法ではビーム全体の位相空間分布を取得できるが、時間方向の情報を反映できない。そこで、上述の RF-Deflector を組み合わせた Fig. 4 のようなセットアップを組む。RF-Deflector で時間方向情報を x 方向に変換した後、スリットを用いてビームを y 方向に切り出し、スクリーン上でビームプロファイル計測する。このとき、プロファイルのうち横軸方向(x 方向)には時間方向の情報が、縦軸方向(y 方向)にはビームの y 方向の位置および空間的拡がりに関する情報が乗っている。そこでビームを時間分解能より大きな幅で x 方向に等間隔でスライスし、各スライス内でスリットを通過したビームレットの位置・拡がりを測定することで、スリットスキャン法によって時間方向位置毎に y 方向の位相空間分布を取得できる。一例として、Fig. 4 におけるスライス 4 の時間方向位置の y 方向位相空間分布を Fig. 5 に示す。

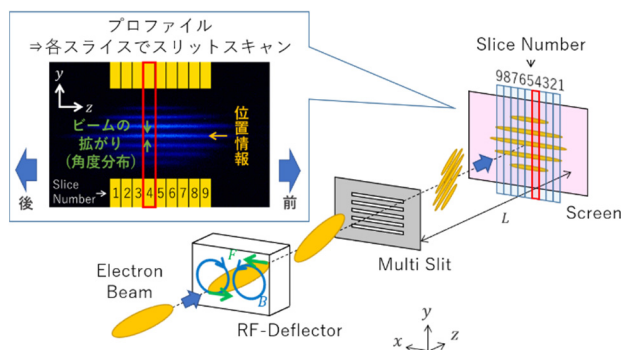


Figure 4: The diagram of the principle of time-resolved transverse phase space measurement.

3. 時間分解位相空間分布計測

3.1 実験セットアップ

時間分解位相空間分布計測のセットアップを Fig. 6 に示す。RF-Deflector で時間方向情報を横方向に変換した上で、下流に設置したスリットでビームを切り取り、スリットから 0.59[m] 下流に設置したスクリーンでプロファイルを取得する。スリットは 11 個のスリットが等間隔で並んだマルチスリットを用いており、測定時間の短縮を図っている。本研究で用いたマルチスリットの写真を Fig. 7 に、パラメータを Table 1 に示す。電荷量は FCT(Fast Current Transformer)で、エネルギーは偏向電磁石で測定する。

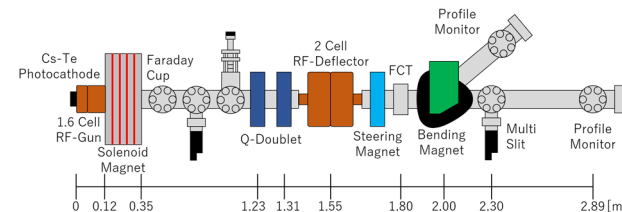


Figure 6: Experimental setup of time-resolved transverse phase space measurement.



Figure 7: The picture of the multi slit.

Table 1: The Parameters of the Multi Slit

Number of Slit	11
Slit Width	0.2 [mm]
Slit Interval	1.0 [mm]
Slit Step Width	0.2 [mm]
Material	SUS304
Thickness	2.0 [mm]

3.2 レーザー入射法・電荷量による比較

まず、レーザー入射法を垂直入射、斜入射の2通りで時間分解位相空間分布を測定した。垂直入射はカソードに対してレーザーをほぼ垂直(89.15 deg)の角度から入射する方法である。初期ビームの傾きが小さい、後述の斜入射と比較してバンチ長が小さい、といった特徴があり、ビームの高度制御が求められるレーザーコンプトン散乱やコヒーレントチェレンコフ放射で用いられる。一方、斜入射はカソードに対してレーザーを22.5degの角度から斜めに入射する方法である。初期ビームの傾きが大きい他、垂直入射と比較してバンチ長が大きくなる。なぜなら、斜入射ではレーザーをカソードに対し斜めに入射するため、レーザーパルス前方と後方がカソードに当たるタイミングにラグが生じるからである。また、レーザーのp偏光成分によってSchottky効果の作用が大きくなることで、垂直入射と比較して高電荷量が得られる。この特徴から、高電荷電子ビームが必要なパルスラジオリシスで用いられる手法である。この2種類の入射法を比較することで、初期ビームの形状・分布による時間分解位相空間分布の挙動を考察する。

本研究では加速位相を立ち上がり位相から30degで統一し、各入射法でFCT上の電荷量を25pC、50pCの2通りで測定を行った。ここではバンチスライス数は9つに揃え、バンチ前方をスライス9、後方をスライス1とし、ビーム重心をスライス5と表現することにする。測定した位相空間分布はrmsに相当する領域を楕円でプロットする。測定結果をFig. 8に示す。

まず垂直入射時は各スライスの位相空間分布が綺麗に重なり合っていることがわかる。これは初期ビームの傾きが小さいことで各スライスの重心位置が一致していること、および初期ビームサイズが小さいことによってRF-Gun内部の横方向RFから受ける影響が抑制されているためと考えられる。これらより、投影エミッタンスの増大が抑制されたビームを生成可能である。一方斜入射では各スライスの分布が大きくずれている。まず、初期ビームの傾きが大きいこと各スライスの重心位置のずれが大きく、y方向に分布がずれていることがわかる。加えて、ビーム進行軸からのy方向位置のずれが特に大きいバンチ両端部ではy方向にも重心のずれが大きくなっている。これは、ビーム進行軸から外れた部分ではRF-Gun内での横方向RFによる横方向キックの影響が大きくなるのが原因と考えられる。このように、斜入射では初期ビームの傾きに起因して各スライスの位相空間分布が大きくずれてしまい、投影エミッタンスの増大を引き起こしていることがわかる。

より定量的に比較するため、各スライスの位相空間分布で定義されたエミッタンス、つまりスライスエミッタンスの測定結果をFig. 9に、各スライスの位相空間分布の重ね合わせで表現される投影エミッタンスの測定結果をTable 2に示す。それぞれ規格化rmsエミッタンスで表してある。スライスエミッタンス、投影エミッタンスともに高電荷量ほど大きくなるのがわかる。これは空間電荷効果の

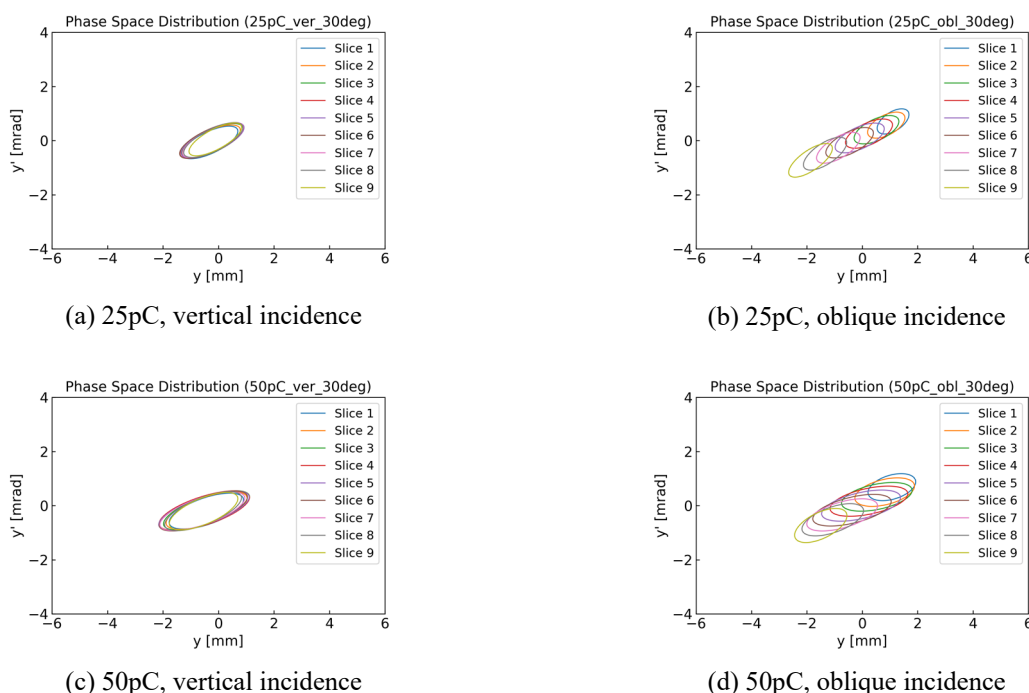


Figure 8: The result of time-resolved transverse phase space measurement.

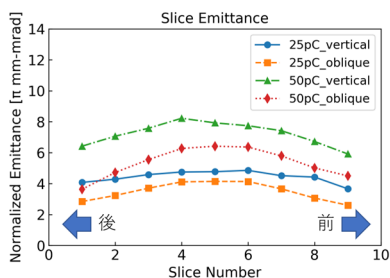


Figure 9: The result of slice emittance measurement.

Table 2: The Result of Projected Emittance Measurement

Parameters	Projected Emittance [π mm-mrad]
25pC, vertical incidence	4.63
25pC, oblique incidence	5.33
50pC, vertical incidence	6.99
50pC, oblique incidence	7.93

影響による。また、バンチ中央部でスライスエミッタンスが大きくなっているが、これはカソード励起用 UV レーザーがガウシアン形状をしているため、電荷密度の大きなバンチ中央部で空間電荷効果の影響が大きくなっているからである。レーザー入射法を比較すると、スライスエミッタンスは斜入射時に小さくなっている。これは各スライスの電荷密度が斜入射時の方が小さいことに因って考えている。なぜなら、前述の通りバンチ長が垂直入射よりも斜

入射の時に大きくなるからである。一方、投影エミッタンスは垂直入射時に小さくなる。これは、垂直入射ではバンチスライス毎の位相空間分布のずれが小さく抑えられており、投影エミッタンスの増大が小さいためである。

3.3 ソレノイド電流値依存性

斜入射、電荷量 50pC、加速位相 30deg における時間分解位相空間分布のソレノイド電流値依存性を Fig. 10 に示す。ソレノイドによる集束によって位相空間が回転している様子が見て取れる。また、ソレノイド電流値を上昇させていくとビームの y 方向の傾きが変化していることからソレノイドの回転集束作用を確認できる。さらに、ソレノイド電流値を上昇させて集束力を強くしていくと、各スライスの位相空間分布が占める領域は小さくなっていく、つまりスライスエミッタンスは小さくなっている一方で、各スライスの位相空間分布のずれが大きくなっていくことがわかる。

4. まとめと今後

RF-Deflector とスリットスキャン法を組み合わせることで、電子ビームの時間分解位相空間分布の計測を実現した。初期のビーム形状がエミッタンスに大きく影響を及ぼすこと、およびソレノイドによる位相空間の回転作用を実験的に確認できた。今後はより詳細な測定を行い、ビーム特性の理解をさらに深めていく。

参考文献

- [1] Y. Hosaka *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 84, 10 (2013).
- [2] K. Sakaue *et al.*, Proc. IPAC2016, TUPOW047, 1870–1872.
- [3] Y. Koshiba *et al.*, Proc. of PASJ2016, MOP054 (2016).
- [4] Y. Nishimura *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 764 (2014) 291–298.

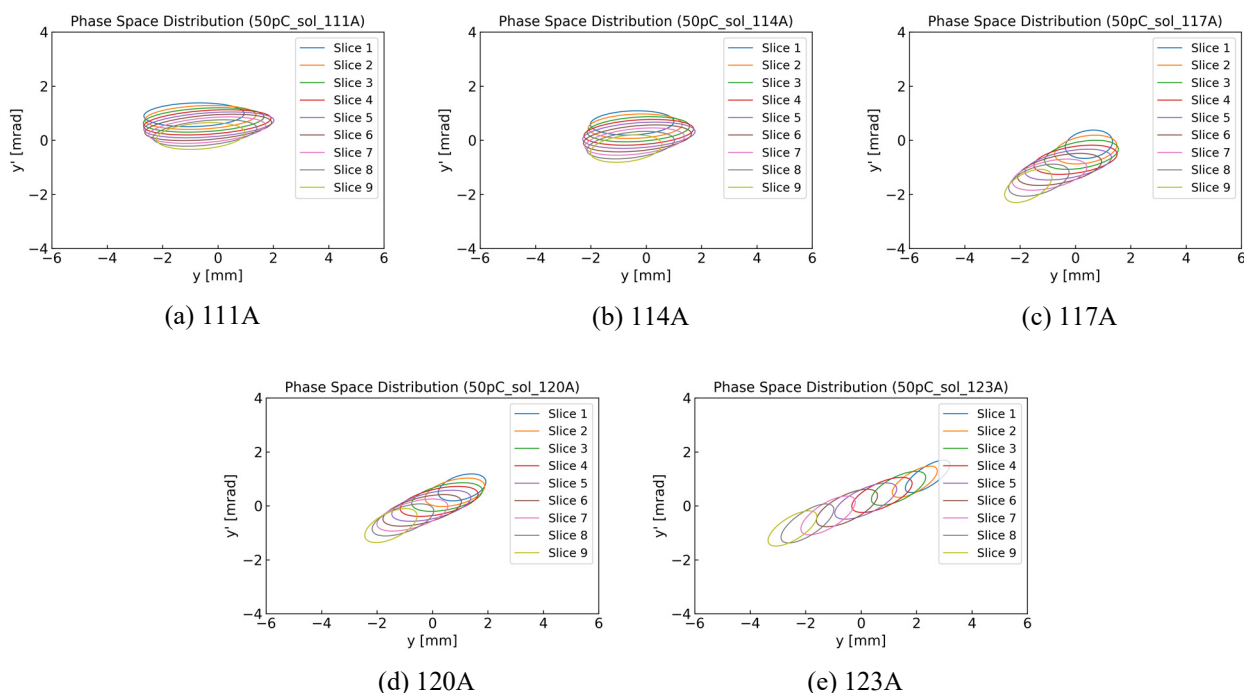


Figure 10: Solenoid current vs time-resolved transverse phase space.