

Photo electron beam diagnostics at Waseda University

N. Kudo^{1,A)}, H. Kawai^{A)}, R. Kuroda^{A)}, K. Sakaue^{A)}, Y. Hama^{A)}, R. Moriyama^{A)}, M. Washio^{A)},
S. Kashiwagi^{B)}, H. Hayano^{C)}, J. Urakawa^{C)}

A) Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

B) Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

C) High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801,

Abstract

A double slits scan technique for emittance measurements and a frequency analysis technique for bunch length measurements has been developed at Waseda University. Another method for bunch length measurements, RF kicker cavity technique, has been developed. The principle of RF kicker cavity technique is similar to that of streak camera, which converts the time domain of the electron beam to the spatial domain of that. In this paper, we report the experimental results of transverse emittance measurements and bunch length measurements. The transverse emittance as a function of electron beam charge was measured in three cases of laser spot size. The results of bunch length measurements using the frequency analysis technique are in good agreement with simulation results for PARMELA.

早稲田大学における光電子ビーム診断及びその診断法の開発

1. はじめに

早稲田大学理工学総合研究センターでは、フォトカソードRF電子銃を中心としたコンパクトな加速器システムを構築し、逆コンプトン散乱による軟X線発生実験^[1]、パルスラジオリシス実験^[2]などの応用実験を行っている。

フォトカソードRF電子銃によって生成された電子ビームの性質は、レーザー入射位相、スポットサイズ、ソレノイド磁場、電荷量に依存した空間電荷効果などによって大きく左右されるので、ビームの性質を把握し、高品質電子ビーム生成のための加速器最適パラメータの探求が非常に重要になってくる。

早稲田大学の加速器システムは電子銃単体であるため、ビームのエネルギーは約5MeVとあまり高くない、このシステムに適したビーム診断法を開発しなくてはならない。

そこで横方向エミッタンス測定にはダブル・スリット法をバンチ長測定には周波数解析法とRFキッカー法を選択し、その測定システムの開発及び測定を行った。

2. エミッタンス測定

エミッタンスの測定法としては、Qスキャン法が広く用いられているが、早稲田大学の電子ビームのエネルギーでは空間電荷効果の影響が無視できなくなる。そこで、空間電荷効果による測定誤差の少ないダブル・スリット法を用いた横方向エミッタンス

測定システムを構築した^[3]。

今回の測定では、レーザーのスポットサイズを変えたときの電荷量とエミッタンスの関係を測定した。

フォトカソードRF電子銃から生成される電子ビームのエミッタンスは、

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{th}^2 + \varepsilon_{rf}^2 + \varepsilon_{SC}^2 + \dots} \quad (1)$$

で与えられる。ここで ε_{th} は、熱エミッタンス、 ε_{rf} は加速RFによるエミッタンス、 ε_{SC} は空間電荷効果によるエミッタンスを表している。これらのエミッタンスはそれぞれ簡単に以下のように表すことができる^{[4] [5] [6]}。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{th} &\propto R_0 \\ \varepsilon_{rf} &\propto \sigma_x^2 \sigma_z^2 \\ \varepsilon_{SC} &\propto \frac{Q}{\sigma_z} \cdot \frac{\sigma_z}{(3\sigma_x + 5\sigma_z)} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 R_0 はレーザースポットサイズ、 σ_x はビームサイズ、 σ_z はバンチ長、 Q は電荷量を示す。

他のパラメータを変えずにレーザーパワーを変えることにより電荷量とエミッタンスの関係を測定しさらにレーザースポットサイズを変化させてエミッタンスを測定した(図1)。実験時のパラメータを表1に示す。

¹ E-mail: easy-going@suou.waseda.jp

表 1:パラメータ

Bunch length	5ps(RMS)
Laser Pulse Length	10ps (FWHM)

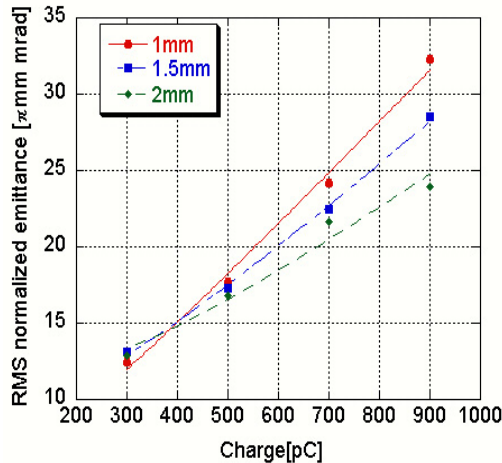


図 1 : スポットサイズを変えたときの電荷量とエミッタンスの関係

空間電荷効果によるエミッタンスは、式(2)より電荷量 Q に比例するので電荷量とエミッタンスの関係は、下記のように表すことができる。

$$\varepsilon = \sqrt{aQ^2 + \varepsilon_0^2} \quad (3)$$

ここで a は空間電荷効果によるエミッタンスの強さを示す係数、 ε_0 はその他のエミッタンスであり、熱エミッタンスと加速 RF によるエミッタンスの和を表す。式(3)を用いて、各スポットサイズごとの測定データにフィッティングすると、表2のようになる。これらより、電荷量の増加に伴い、空間電荷効果によってエミッタンスが増大していることが分かる。また、スポットサイズが小さいほど電荷量が増えたときのエミッタンス増加が大きくなっているが、これは、電荷密度が増すほど、空間電荷効果の影響が大きくなるからだと考えられる。逆に電荷量が少なくなるとスポットサイズが大きいくほどエミッタンスが大きくなるのは、熱エミッタンスと RF エミッタンスの影響だと考えられる。

表 2 : フィッティングパラメータ

Spot Size	a	ε_0
1mm	1.19×10^{-3}	6.1
1.5mm	0.87×10^{-3}	8.4
2mm	0.61×10^{-3}	11.1

3 . バンチ長測定

3.1 周波数解析法

バンチ長の測定には、ストリークカメラが広く用いられているが、早稲田大学のシステムでは電子ビームによって生成する OTR 光・チェレンコフ光の光量が充分ではないので、効率の良い測定ができない。そこで非破壊の常時モニターとして周波数解析法を選択しシステムの構築及び測定を行いシミュレーションとの比較を行った。周波数解析法とはビームの誘起する電場を電極で拾いその信号を周波数解析することによってビームの時間構造を測定する方法である。

3.2 原理

RMS バンチ長 σ_z は、2 点の周波数におけるビームスペクトラムの強度比を取ることに以下のように表すことができる^[7]。

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \ln \left(\frac{|I_1(\omega_1)|}{|I_2(\omega_2)|} \right)} \quad (4)$$

ここで、 ω_1 、 ω_2 は周波数を示し、 $\omega_2 > \omega_1$ である。また、 I_1 、 I_2 はそれぞれ ω_1 、 ω_2 におけるスペクトラムの強度である。このようにビームのスペクトラムを解析することによって RMS バンチ長を測定することができる。

3.3 セットアップ

BPM の電極によってピックアップしたビーム信号を 2 つに分け、それぞれ 6.5GHz、11.4GHz の BPF に通すことにより、6.4GHz、11.4GHz のスペクトラムの強度を選択することを実現している。このセットアップ^[8]において、ビームによって誘起される電場の広がりも考慮すると(4)式は以下のように書き換えることができる。

$$\sigma_z = \sqrt{\left\{ 23.9 \sqrt{\ln \left(\alpha \frac{|V_1(6.4GHz)|}{|V_2(11.4GHz)|} \right)} \right\}^2 - \sigma_{Spread}^2} \quad (5)$$

ここで α は BPM の電極から検波器まで 6.4GHz と 11.4GHz における周波数特性から決まる定数である。また、 V_1 、 V_2 はそれぞれの周波数においてオシロスコープで測定した信号を示している。ここで、ビームによって誘起される電場の広がり σ_{Spread} は以下のように表すことができる。

$$\sigma_{Spread} = R \times \frac{1}{\gamma} \quad (6)$$

R はビーム軌道から BPM 電極までの距離、 γ はローレンツファクターである。

3.4 実験結果

この図 2 において、実線は測定結果、点線は PARMELA によるシミュレーションを表している。

ビームエネルギーの実測結果も含め測定結果とPARMELAのシミュレーション結果は良く一致している。また、低位相側ではRMSバンチ長の値で測定結果とシミュレーションで差が見られる。これは低位相側においては、電荷量が低くなり信号が小さくなること、バンチ長が短くなり2点の周波数におけるスペクトラムの比が小さくなることによる精度の低下によると考えられる。

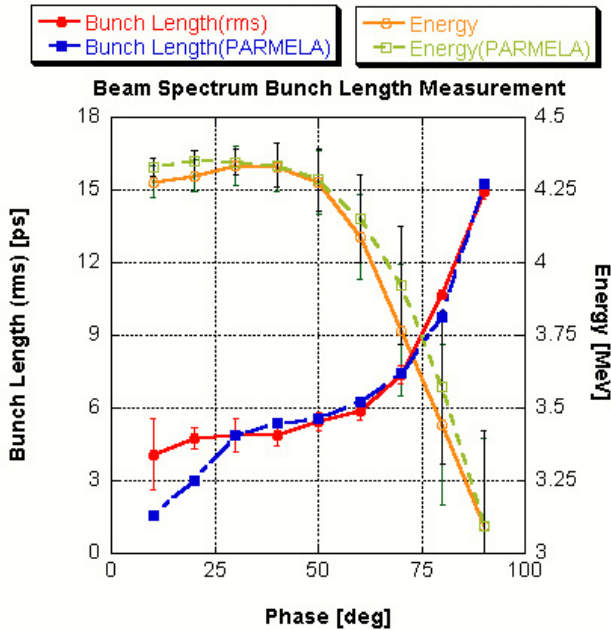


図2：周波数解析法によるバンチ長測定

3.5 RFキッカー法^[9]

周波数解析法ではバンチの形状を測定することはできないので、縦方向プロファイルを測定できる方法としてRFキッカー空腔を用いたバンチ長測定システムの構築を行っている。図3にその概念図を記す。

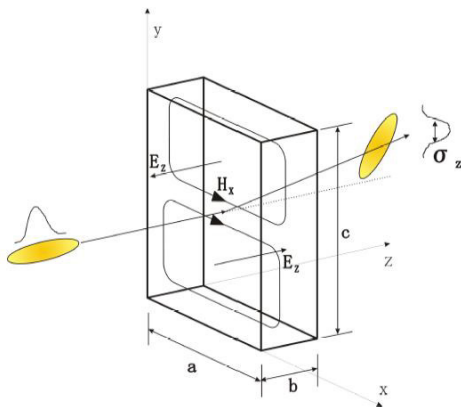


図3：RFキッカー法の概念図

方形空腔内に2856MHzのRFを供給しTM120モードを誘起する。その中心部の水平方向に生じる磁場

でビームに垂直方向の力を与えバンチを傾かせることにより、下流に設置したプロファイルモニターでバンチ長を測定することが可能となる。この測定法の分解能は、空腔に300Wのパワーを供給して中心に約60[G]の磁場を誘起した場合、スクリーンを空腔の1mm下流に設置すると約0.2psとなる。空腔内の3次元電磁場設計にはAnsoft社のHFSS(High Frequency Structure Simulator)を用いた。

このシミュレーションに基づき空腔を作製しネットワークアナライザで共振周波数を測定した結果、真空下で2859.4MHzとなった。空腔は外部をステンレスで作成し、内側にメッキを施しているが、メッキによる銅の厚みは制御が難しいためこの厚みが周波数のずれに影響していると考えられる。この状態では、空腔の温度を約90℃まで上げなければならないので現在空腔にチューナーを設置し周波数調整ができるように再加工している。

4. まとめ

レーザーのスポットサイズ、電荷量を変化させることによりエミッタンスが変化していることが確認された。電荷量が多いときは、スポットサイズが小さいほど電荷密度の増加により、空間電荷効果の影響が大きくなった。逆に、電荷量が少ないときは、スポットサイズが大きいほど熱エミッタンスと加速RFによるエミッタンスの影響が大きくなった。

また、周波数解析法によるバンチ長測定システムを構築し、シミュレーションと良く一致する結果を得ることができた。

5. 今後の予定

エミッタンスをさらによくするためレーザーの垂直入射、レーザーのプロファイル整形システムを構築し、斜入射の場合とのエミッタンスの比較を行っていく予定である。

またRFキッカーシステムを構築し、周波数解析法、PARMELAとの比較を行う予定である。

参考文献

- [1] D.Ueyama, et al., "Proc. of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan", Funabashi, 2004
- [2] T.Kuribayashi, et al., "Proc. of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan", Funabashi, 2004.
- [3] N.Kudo, et al., "Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan", Tokai, 2003
- [4] Kwang-Je Kim, Nucl. Inst. Methods A275, 201-218, (1989).
- [5] W. S. Graves et al., Proc. of PAC'01, 2227 (2001)
- [6] J. E. Clendenin, Proc. of LINAC'96, 298-302 (1996)
- [7] T. Ieiri, Proc. of EPAC'00, 2275 (2000).
- [8] R. Kuroda et al., Proc. of EPAC'02, 1783 (2002)
- [9] X.J. Wang, et al., Nucl. Instr. And Meth., A 356, 1995, 159-166