

Development of an energy spectrum measurement system using screen monitor and its application to study on the longitudinal wakefield in an electron linac

Shigeru Kashiwagi^{1,A)}, Tetsuya Igo^{A)}, Kenji Kobayashi^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Goro Isoyama^{A)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

We are developing a measurement system of energy spectra for the high intensity electron beam for L-band linac of the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. It consists of a thin fluorescence screen, a 12-bit CCD camera with the gate and an image control system in a PCI board. It is possible to measure the energy spectrum of a single electron pulse at a time with this device. To demonstrate performance of the system, energy spectra of the single bunch beam have been measured at different accelerating phases. As an application of the energy spectra measurement, the bunch induced voltage and the longitudinal bunch shape have been derived using energy spectra measured at two different linac rf phases.

スクリーンモニターを用いたエネルギースペクトル測定装置の開発と電子ライナックの縦方向ウェーク場測定への応用

1. はじめに

我々は大阪大学産業科学研究所のLバンド電子ライナックを駆動源とした、遠赤外領域でFELおよびSASEの開発研究を行っている。阪大産研Lバンドライナックは、3台のSHBを用いて50 nCを超える大電荷量のシングルバンチ生成が可能であるが、より高度な安定度を必要とする実験を行うようになったため、電子ビームの不安定化・高品質化を目指し、Lバンドライナックの改修を行った。この改修後の電子ビームの特性を評価するため、蛍光板を用いた電子ビームのエネルギースペクトル高速測定手法を開発した。この測定器は、蛍光板とCCDカメラ、画像処理装置をもつ計算機(PC)から構成される。電子ビームにエネルギー分散がある位置に蛍光板を置き、発光の像をCCDカメラで撮影する。この信号をPCで画像処理して発光強度分布に変換して電子ビームのエネルギースペクトルを求める。今回開発したエネルギースペクトル測定装置ではエネルギー分解能を上げるために厚さ100 μm の蛍光板を使うと共に、測定位置でのベータatron関数の最適化などを行った。このエネルギースペクトル測定器の応用として、異なる2つのRF位相で加速した単バンチ電子ビームのエネルギースペクトルを測定し、そのエネルギー分布から縦方向ウェークポテンシャルとバンチ形状(バンチ長)を再構成するビーム診断方式の試験実験を行った。本稿では、新たに構築したエネルギースペクトル診断システムとそれより得られたエネルギースペクトルから再構成された縦方向ウェーク場とバンチ形状の結果について報告する。

2. エネルギースペクトル計測

2.1 阪大産研におけるエネルギースペクトル測定

阪大産研Lバンドライナックの運動量分析装置は、

エネルギー分析用の偏向電磁石と金属スリットおよびそのスリットを通過したビームの電荷量を測定するためのファラデーカップより構成される。エネルギースペクトルは、ファラデーカップの電荷量を偏向電磁石の励磁電流の関数として測定して求める。そのため、多数の電子パルスに対するエネルギースペクトルの重ね合わせとなると共に、測定時間も数十秒から数分間必要である。

今回我々は、高速かつ高精度にエネルギースペクトルを測定するため、エネルギー分析電磁石を通過した後の偏向方向の電子ビームプロファイルを軌道上に挿入した蛍光スクリーンとゲート付きCCDカメラを用いて測定する方法を導入した。カメラからのビデオ信号をPCに取り込み、その画像からエネルギースペクトルを求める。CCDカメラにビームと同期したトリガー信号を供給し画像を取得するので、電子ビーム1パルスに対するエネルギースペクトルを求めることができる。これにより、電子ビームの重心エネルギーやエネルギースペクトルのパルスごとのゆらぎも測定することができる。この測定方法では、異なる運動量をもつ電子の偏向方向のひろがり(散角)を測定するが、図1に示すように測定されるスクリーン上での横方向のビームサイズは、運動量の差によって生じるひろがり(散角)とベータatron関数(β 関数)によるひろがりから決まる。ビームサイズ σ_{beam} は、 $\Delta p/p$ の運動量ひろがり(運動量ひろがり(散角)は正規分布しているとし、 $\Delta p/p$ はその1 σ)と β 関数、エミッタンス ε から、

$$\sigma_{\text{beam}} = \sqrt{\left(\eta \cdot \frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \varepsilon \beta} \quad (1)$$

と表すことができる[1]。このとき、運動量の差によって生じるビームのひろがり(散角)は測定位置における分散関数(η)に比例する。運動量ひろがりによるビームサイズに対して、 β 関数によるビームサイズが大き

¹ E-mail: shigeruk@sanken.osaka-u.ac.jp

いと測定の運動量分解が悪くなる。測定の時は偏向電磁石よりも上流の四極電磁石を調整し、スクリーンの位置での β 関数を小さくする必要がある。今回の測定では、ビームを偏向電磁石で曲げる前に直線部でQスキャン法を使い、エミッタンスとTwissパラメータの測定を行った。 ε は約 6×10^{-6} m、スクリーンの位置での β 関数はこのQスキャンの結果とスクリーンまでの転送行列より約0.75 m、 η は0.31 mであった。

エネルギースペクトル測定の分解能を決定する要素には、測定位置での β 関数、CCDカメラの画素数と光学系によって決まる画像の解像度、スクリーンモニターに使用するアルミナ蛍光板の厚みによるビームプロファイルのにじみなどがある。測定では、CCDカメラで取り込まれる画像の解像度は1ピクセルあたり30 μm であった。この1ピクセルのサイズは、分散関数より約0.01 %のエネルギー幅に相当する。式(1)より β 関数とエミッタンスで決まるエネルギー分解能は

$$\frac{\Delta p}{p} \geq \frac{\sqrt{\varepsilon\beta}}{\eta} \quad (2)$$

となる。測定値から評価したエネルギー分解能は0.7%である。また、測定ではできる限り幅広いエネルギー分布を測定したいと考え、エネルギー分散方向が35 mmで高さ方向が30 mm（エネルギー幅：約11.3 %）のアルミナ蛍光板を使用した。スクリーンの厚さはスクリーンののにじみの影響を抑えるため100 μm とした。今回はスクリーンが大面积であったため、強度の問題で厚さを100 μm 以下にできなかった。また、スクリーンの厚さとビームプロファイルのにじみの量について定量的な測定を今後行う予定である。

2.2 エネルギースペクトル測定結果と考察

シングルバンチビームを使ったビーム実験では、加速位相を変化させた時のビームエネルギースペクトルの変化を、従来のスリットを用いた測定手法と今回開発したエネルギースペクトル測定方法で測定し両者を比較した。図3に両者の測定結果を示す。この結果から、スクリーンモニターを用いて測定したスペクトルの方がビームの細かなエネルギー分布まで測定できておりエネルギー分解能が高いことがわかる。また、スクリーンを使った測定ではゲート付きCCDカメラで測定しているので、1つの電子バンチのエネルギースペクトルを測定できた。従来の測定手法では、多数電子パルスに対する測定となっ

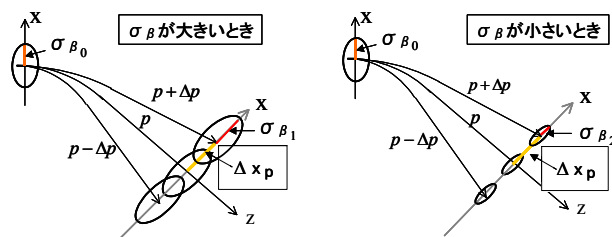


図1 エネルギー分散と β 関数の関係

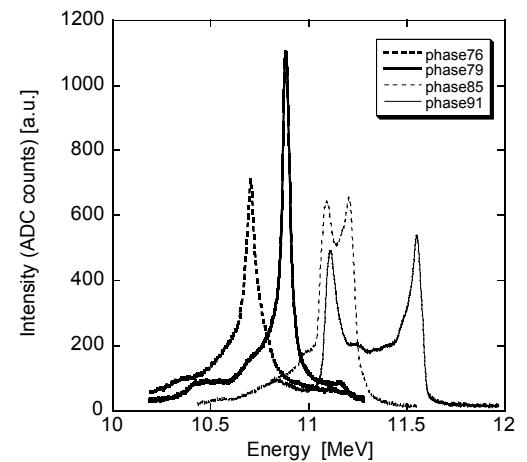
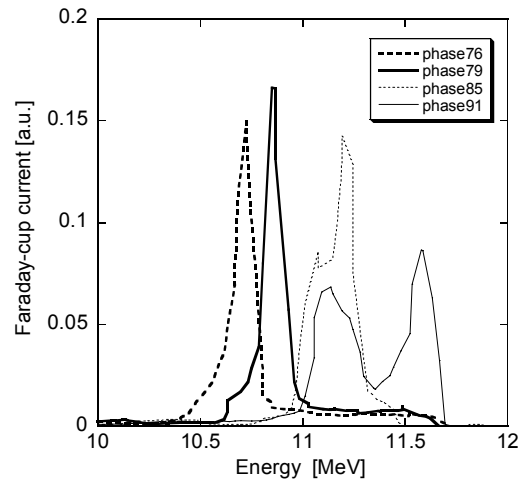


図3 (上)従来の金属スリットと偏向電磁石を使った測定、(下)スクリーンモニターを使ったエネルギースペクトル測定結果

ているので、パルス毎のビームゆらぎがエネルギースペクトルへ混ざり込んでいる。ライナックの調整において今回開発した測定方法を用いることで、リアルタイムにエネルギースペクトルをモニターし、加速管やバンチャーなどのRF系の位相調整などを行う事ができる。今後は、PCへの画像データの取り込みや画像解析の更なる高速化と自動化を行っていく予定である。

3. 縦方向ウェーク場とバンチ時間プロファイルの再構成

次に、測定したエネルギースペクトルを用いた応用として、異なる2つのRF位相で加速したビームのスペクトルから、加速管での縦方向ウェークポテンシャルとバンチ時間プロファイルを再構成する試験実験を行った。測定の詳しい原理については参考文献[2]を参照して頂き、ここでは簡単に説明する。

バンチ内で位置 z の粒子の相対的なエネルギーは、加速位相 ϕ^a と ϕ^b の時、以下のように表す事ができる。

$$\begin{aligned}\delta^a(z) &= [E_0 + E_f \cos(\omega z + \phi^a) + eV_{ind}(z)] / E_f - 1 \\ \delta^b(z) &= [E_0 + E_f \cos(\omega z + \phi^b) + eV_{ind}(z)] / E_f - 1\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 E_0 と E_f はそれぞれビームの初期と最終的なエネルギー、 ω 、 E_f は加速周波数、加速電場である。 $V_{ind}(z)$ はビームの誘起電圧であり、加速管のウェーク関数とバンチ縦方向電流分布関数 $\lambda_z(z)$ より与えられる。

$$V_{ind}(z) = -eN \int_0^\infty W_z(z') \lambda_z(z - z') dz' \quad (2)$$

バンチ内での $\lambda_z(z)$ と $\delta(z)$ が分っていればエネルギーの関数にした電荷分布 $\lambda_\delta(\delta)$ （エネルギースペクトル）を計算する事ができる。逆に、 $\lambda_\delta(\delta)$ と $\delta(z)$ より $\lambda_z(z)$ を求める事が可能である。しかし、この時にバンチ内の縦方向に沿ってのエネルギー変化が単調関数でないとエネルギーの分布から縦方向電荷分布を求めることができない。縦方向電荷分布を(3)式で表す事にする。

$$\lambda_z(z) = \lambda_\delta(\delta(z)) |\delta'(z)| \quad (3)$$

(1)-(3)式より加速位相 ϕ^a と ϕ^b の時の電流分布 $\lambda_z(z)$ は

$$\lambda_z(z) = \lambda_\delta^a \left| E_a \omega \sin(\omega z + \phi^a) - eV'_{ind}(z) \right| / E_f \quad (4)$$

$$\lambda_z(z) = \lambda_\delta^b \left| E_b \omega \sin(\omega z + \phi^b) - eV'_{ind}(z) \right| / E_f$$

となり、この(4)式より $\lambda_z(z)$ と $V'_{ind}(z)$ はそれぞれ

$$\lambda_z(z) = \frac{E_a \omega \lambda_\delta^a}{E_f} \left| \sin(\omega z + \phi^a) - \sin(\omega z + \phi^b) \right| \quad (5)$$

$$V'_{ind}(z) = \frac{E_a \omega}{e(\lambda_\delta^a \pm \lambda_\delta^b)} [\lambda_\delta^a \sin(\omega z + \phi^a) \pm \lambda_\delta^b \sin(\omega z + \phi^b)] \quad (6)$$

と表す事ができる。初期条件 $V_{ind}(0) = 0$ 、 $V'_{ind}(0) = 0$ からスタートし、2つの異なる位相で加速された電子ビームのエネルギースペクトル(λ_δ^a 、 λ_δ^b)より、下の(7)式の関係を使って、繰返し計算する事で $\lambda_z(z)$ と $V_{ind}(z)$ を求める事ができる。

$$V'_{ind}(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{V_{ind}(z + \Delta z) - V_{ind}(z)}{\Delta z} \quad (7)$$

電荷量10 nC、バンチ長 20 ps (FWHM) の正規分布をしたビームと加速管のウェーク関数及び加速電場を仮定してエネルギースペクトルを計算し、その結果からバンチ形状が再構成できるか試みた。この時、加速位相は20度と-20度（0度がRFクレストに相当）とした。図4上段に2つの異なる位相でのエネルギー分布 $\lambda_\delta(\delta)$ と(1)式で示した $\delta(z)$ を示す。図4下段には、2つのエネルギースペクトルから求めた、電荷分布及びビーム励起電圧を示す。再構成された電荷分布を正規分布でフィッティングすると半値全幅で18.6 psという結果が得られ、計算に用いたバンチ長の20 psとほぼ一致した。また、加速管における

ビーム励起電圧に関しても若干のずれはあるが理論計算値とかなり良い精度で一致している。細かな理論計算値と再構成された値とのずれについては詳しく調べていく予定である。

実際に産研Lバンドライナックにおいて約8 nCの電子バンチを異なる2つの加速位相で約25 MeVまで加速し、測定されたエネルギースペクトルから縦方向電荷分布とビーム励起電圧の再構成を試験的に行った。図5にその結果のグラフを示す。再構成された電子バンチは正規分布ではなく、バンチ前方が急に立ち上がる形状となった。今後、このエネルギースペクトルから縦方向バンチプロファイルを再構成する手法とストリークカメラを用いた縦方向ビームプロファイル測定との比較を行いたいと考えている。

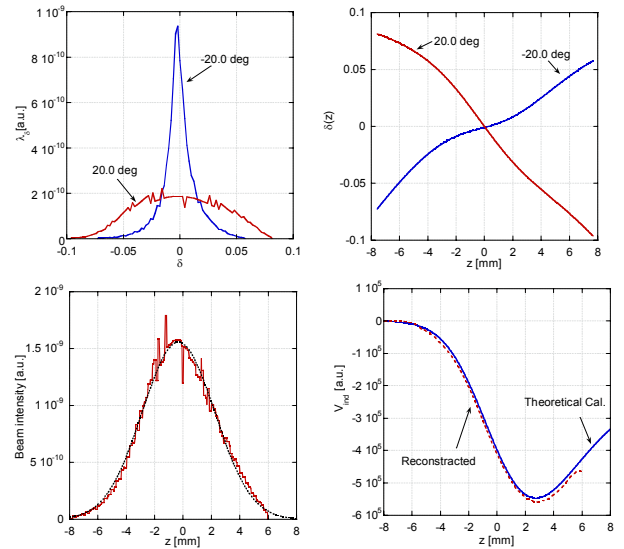


図4 仮定した数値より計算された $\lambda_\delta(\delta)$ （左上）と $\delta(z)$ （右上）、再構成された $\lambda_z(z)$ と $V_{ind}(z)$ （下段）。

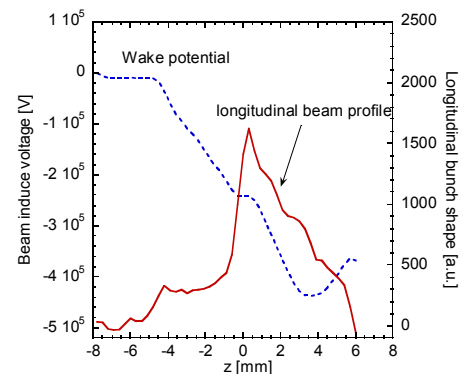


図5 実際のエネルギースペクトル測定より再構成された縦方向プロファイルとビーム誘起電圧

参考文献

- [1] 神谷幸秀, “加速器の原理”, OHO84
- [2] K. L. F. Bane et al., SLAC-PUB-7536, May 1997