

MEASUREMENT OF THE LONGITUDINAL PHASE-SPACE DISTRIBUTION IN THE HIGH-BRIGHTNESS ELECTRON BUNCH

Ryukou Kato¹, Shigeru Kashiwagi, Yutaka Morio, Yoshikazu Terasawa, Kenichiro Furuhashi, Goro Isoyama
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

In order to measure the longitudinal phase-space profile of the electron beam, we are developing the measurement system consisted of a Cherenkov radiator, a bending magnet and a streak camera. The Cherenkov radiator with an aerogel was installed in the beam transport line, and a preliminary longitudinal phase-space image was reconstructed from energy sliced images

高輝度電子バンチ内の縦方向位相空間分布測定

1. はじめに

Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE)の発生に用いられる高輝度電子ビームは、複数回のバンチ圧縮により、数k Aのピーク電流を有するようになる。このバンチ圧縮過程はバンチ内の電子の位置とそのエネルギーに影響を与える。さらにこの高いビーム電流により加速管内にはウェーク場と呼ばれる電磁波が誘起される。このウェーク場が加速管内の加速電場に重ねあわされることにより、電子は正弦波から大きく歪んだ加速電場を経験することになる。結果的に高輝度電子バンチ内の電子はより複雑な縦方向位相空間分布を持つようになる。これまでのところ、縦方向位相空間を直接観測する手段はなく、電子バンチの時間プロファイルとエネルギー分布は独立に評価されてきた。最近、縦方向位相空間を評価するために、いくつか手法が提案され研究が進められている¹⁻⁴。

大阪大学産業科学研究所では、偏向電磁石、プロファイル・モニタ、ストリークカメラを組み合わせ縦方向位相空間モニタの開発を行っている。予備実験では可視遷移放射(OTR)モニタを用いて、ビーム・プロファイルを測定した。OTRプロファイルからビーム・エネルギーを評価した結果、通常使用している運動量分析電磁石とスリット、ファラデーカップを用いたエネルギー評価システムよりも高い運動量分解が得られた⁵。しかし、OTRによる発生光子数が少ないことに加えて、我々が行っているTHz領域でのSASEやFEL実験⁶⁻⁷で使用する10-20 MeVの電子ビーム・エネルギーではOTRの角度分布拡がりが大きく、縦方向位相空間分布を評価するのに十分な光量を得ることができなかった。光子数を増加させるためにPITZ²での実験結果を参考に、プロファイル・モニタとしてシリカ・エアロジェルからのチェレンコフ光を用いることにした。

この論文ではエアロジェル・チェレンコフを用いた縦方向位相空間測定の最初の実験結果について報

告する。

2. チェレンコフ・モニタの設計

設置場所の物理的な制限のため、私たちは複雑なメカニズムを真空中に構築することができなかった。図1に示されているように、金属鏡で支持された簡単なチェレンコフ発光部を設計した。このチェレンコフ発光部では、疎水性シリカエアロジェル(SP-50、松下電工製)を使用している。45x30mm²で厚さ1.5mmの薄いエアロジェルはアルミニウム金属鏡に取り付けられている。このエアロジェルの屈折率と密度は各々1.05と0.19g/cm³である。チェレンコフ放射は、開き角 $2\theta_{Cr}$ のコーン状に放射され、この角度は媒質中での平均屈折率 n と粒子の速度 β により以下の式で決定される：

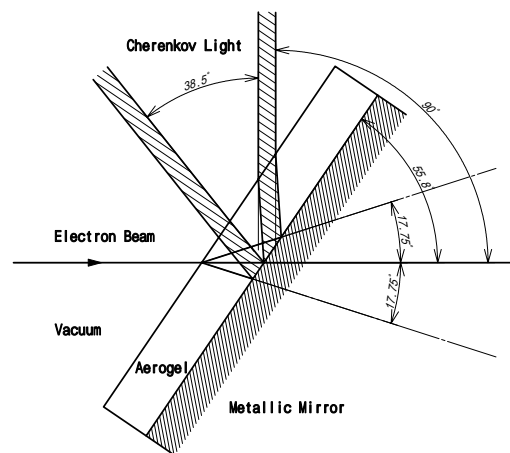


Figure 1: Schematic design of the Cherenkov radiator.

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp



Figure 2: Screen folder mounted with both of a ceramic screen and a Cherenkov radiator. The left screen is a profile monitor with a fluorescence ceramic screen with a thickness of 0.1 mm and it is tilted vertically by an angle of 45°. The right screen is the aerogel radiator and it is tilted of 55.8°.

$$\cos \theta_{CR} = \frac{1}{\beta n} \quad (1)$$

10 MeVの以上のエネルギーの電子に対して、放射角度はほぼ一定であり、その開き角は35.5°である。放射されたすべての光を集光するには、この角度拡がりが大きすぎるので、我々はチェレンコフ光の一部を使用することにした。エアロジェルの中で放射されたチェレンコフ光は、金属鏡で反射され、再びエアロジェルの中を通過して、真空との境界面で屈折される。エアロジェルの中で上向きに放たれたチェレンコフ放射が真空中で水平面に対し垂直方向に放射されるように、チェレンコフ発光部は55.8°の傾き角で取り付けられている。これにより、エアロジェルの実効的な厚さは2.7mmになる。チェレンコフ光円錐の一部が、サファイア真空窓を通して真空槽から大気中に取り出され、反射鏡によりストリークカメラまで輸送される。最初の凹面鏡によって輸送される光は、およそ全放射の10%と見積もられる。媒質中で電子が距離 a だけ進む時に、 λ_1 から λ_2 の波長範囲に放射される光子数 N_{CR} は、以下のようなになる:

$$N_{CR} = 2\pi a d \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sin^2 \theta_{CR} \quad (2)$$

ここで a は微細構造定数である。エアロジェルの400nmから800nmまでの波長範囲の平均透過率が85%であると仮定すると、最初の反射鏡が受け取る光子数は1入射電子あたり1.2個と推定される。チェレンコフ放射により発生する光子数は、OTRのそれよりも2桁以上大きい。

図2は、チェレンコフ発光部を取り付けたスクリーンフォルダーの写真を示している。同じ位置でビーム・プロファイルを測定するために、0.1 mmの厚さの蛍光セラミック・スクリーン (AF995R、Desmarquest社製) がビーム軌道面に対し45°傾けて

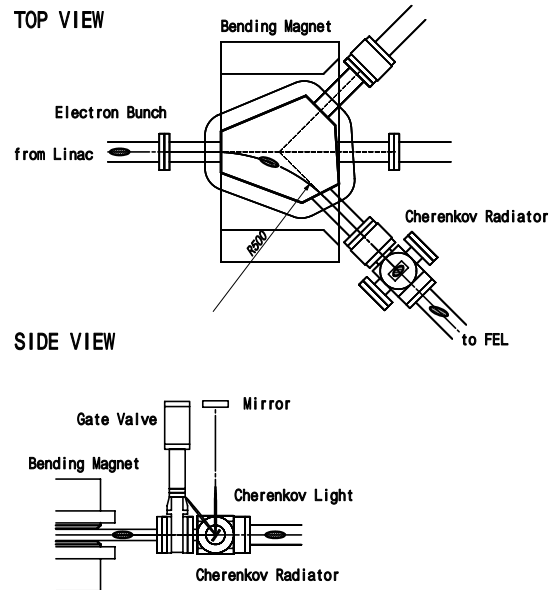


Figure 3: Configuration of the Cherenkov radiator.

エアロジェルの横に取り付けられている。

3. 実験配置

チェレンコフ・プロファイルモニターは、図3に示されているように、ライナックからFELシステムまでビーム輸送路に設置された。プロファイルモニターと偏向電磁石の間の距離は320mmで、この位置における分散関数は0.4mである。エアロジェルの実際の可視幅が40mmであるので、エネルギーアクセプタンスとエネルギー分解能は各々10%と0.25%/mmであると見積もられる。

エアロジェルで発生する光は、約15mの光輸送路のより大気中を加速器室から測定室まで輸送され、ストリークカメラにより測定される。ストリークカメラは入射スリット上での光パルス像を、空間情報を水平軸に、時間情報を縦軸もつストリーク像に変換する。ストリークカメラとしてはC5680-11(浜松ホトニクス社製)が使用される。C5680-11はHigh Speed Streak Unit C5676との組み合わせで1.57psの時間分解を持っている。ストリークカメラの有効面積はスクリーン上で11(H)×8.25(V) mm²である。そこで、エアロジェル上での発光像がその領域に適合するように光輸送システムを用いて調整する必要がある。しかし光輸送路がまだ完成していなかったため、既存の反射鏡を用いて仮設の光輸送路を構築した。その結果、像の増倍率と輸送路の輸送効率は最適化されておらず、ストリークカメラから見込めるエアロジェルの水平サイズは4.4mmに制限される。(この幅は、1.1%のエネルギーアクセプタンスに対応する)。したがって、縦方向位相空間内の電子分布の全体像を一度に取得することが出来ず、1.1%のエネルギー幅でスライスされた像が得られる。したがって、今回は、偏向電磁石の磁場を掃引することにより得られる複数のエネルギースライスされたイ

メージを結合させることにより、縦方向位相空間像を復元した。

4. 実験結果

図4に、実験に使用された単バンチ電子ビームのエネルギー・スペクトルに示す。電子バンチは、2台の108MHz空洞と1台の216MHz空洞で構成されるサブハーモニックバンチャー(SHB)システムを備えた1.3 GHz Lバンド電子ライナックで加速された。このSHBシステムにより、最大90 nC以上の電荷量をもつ高輝度電子バンチの発生が可能になる。他方、このSHBシステムを用いて発生した単バンチビームは縦方向の電子位置とそれらのエネルギーとの間により複雑な相関関係を持つことになる予想される。

図5は、3つの異なる加速位相の場合に、電磁石電流を0.05Aまたは0.1Aステップで変えながら測定されたスライスイメージから復元された縦方向位相空間像を示している。図中のプロファイルは、水平軸として時間情報を縦軸としてエネルギー情報をもっている。左側が電子バンチの先頭を示している。図4に示されているエネルギー・スペクトルは、図5(b)に対応している。図5の(a)と(c)は、(b)を基準にして -10° と $+10^\circ$ の加速位相で測定された。(a)と(c)のプロファイルでは、先頭からテールまで単調なエネルギー増加か、エネルギー減少の傾向がある。しかしながら、より詳細に見ると、異なったエネルギーの電子が同じ位相に存在するのを見ることができる。特に(b)では、電子は縦方向位相空間内で、より複雑な分布をしている。電子バンチによって引き起こされたウェーク場が、加速電場に重なるので、電子は正弦波と比較して歪んだ電場を経験することになる。ウェーク場を用いてこれらのプロファイルを説明するのは、定性的に可能であると考えられる。

5. まとめ

電子ビームの縦方向位相空間を測定するために、エアロジェルを用いたチェレンコフ・モニタ、偏向電磁石、およびストリークカメラから成る測定システムを開発した。仮設の光輸送路を用いてエネルギーライスされた縦方向位相空間像を測定し、スライスイメージからの縦方向位相空間プロファイルを復元した。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C)18540273、2006-2008)によりサポートされております。

参考文献

- [1] A. Doria et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 475, (2001) 296.
- [2] J. Rönisch et al, FEL'06, BESSY, Berlin, Germany, August 2006, p.597.
- [3] H. Loos et al, FEL'05, Stanford, August 2005, p.632.
- [4] S. Zhang et al, FEL'05, Stanford, August 2005, p.640.
- [5] R. Kato et al, FEL'06, BESSY, Berlin, Germany, August 2006, p.676.
- [6] R. Kato et al, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 445 (2000) 167.
- [7] R. Kato et al, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 475 (2001) 334.

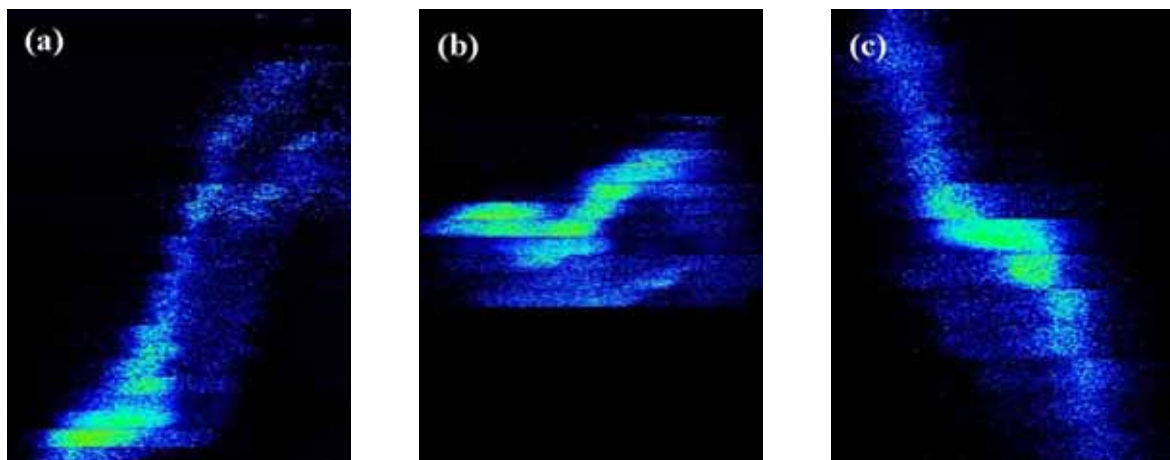


Figure 5: Reconstructed longitudinal phase-space profiles of the single bunch electron beam for three different accelerating phases. The profile images have temporal information as the horizontal axis (150 ps / full scale) and energy one as the vertical (9.6 % or 2.6 MeV / full scale). The left side indicates the head in the electron bunch. Accelerating phases of the bunch center are estimated to (a) -20° , (b) -10° and (c) 0° from the rf crest, respectively.