

MEASUREMENT OF THE LONGITUDINAL AND TIME-RESOLVED TRANSVERSE PHASE-SPACE DISTRIBUTION IN THE HIGH-BRIGHTNESS ELECTRON BUNCH

Ryukou Kato¹, Shigeru Kashiwagi, Yutaka Morio, Kenichiro Furuhashi,
Yoshikazu Terasawa, Naoya Sugimoto, 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 longitudinal phase-space image has been obtained. Furthermore, time-resolved transverse phase-space measurement system with the same method will be proposed.

高輝度電子ビームの縦方向および時間分解横方向位相空間分布測定

1. はじめに

第4世代光源と呼ばれるX線領域での波長可変レーザーを実現する最も有力な候補と考えられている単一通過型自由電子レーザー (SASE-FEL: Self-Amplified Spontaneous Emission Free-Electron Laser) では、高輝度大電流 (~数kA) の電子バンチを長尺のアンジュレータ (~数100m) に入射し、アンジュレータ入り口で放射されるノイズレベルの自発光を、電子バンチとの相互作用により飽和レベルまで増幅する。このX線FELでは数kAにも達する高ピーク電流を有しながらも、エミッタンスとエネルギー拡がり十分小さい高品質の電子バンチが要求される。

通常我々がエミッタンスとして評価しているものは投影エミッタンスと呼ばれ、電子バンチ全体のエミッタンスである。電子バンチ全体のエミッタンスをX線FELで要求されるレベルに低減させることは非常に困難であるが、SASE-FELで発生されるX線光パルスは、コオペレーション長程度のコヒーレントな光パルスが複数連なった構造をしており、接続するコヒーレント・パルス間での位相の関係はランダムである。したがって、光の成長に必要なコオペレーション長程度の領域で低エミッタンスが実現できれば、十分にコヒーレントX線の増幅が可能となる。そのためには電子バンチ全体の投影エミッタンスのみならず、時間分解されたエミッタンス、すなわちスライスエミッタンスの評価が重要となる。

さらにこの高いピーク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位相-エネルギー相関を有

することになる。従来、縦方向位相空間を直接観測する手段が無かったため、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。近年、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きた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ー、ストリークカメラを組み合わせてコンパクトな縦方向位相空間モニタの開発を行っている⁵。これまでKEKBのチェレンコフ検出器にも利用されている疎水性シリカ・エアロジェルからのチェレンコフ光を用いたプロファイル・モニタを製作し、ビーム輸送路の分散部に組み込んだ。また仮設の光輸送路を構築し、このエアロジェル・チェレンコフを時間掃引することで、エネルギースライスされた電子バンチの時間プロファイルを取得した。さらに電磁石の電流値を変化させることで取得された異なるエネルギーの時間プロファイルを結合することで縦方向位相空間分布を再構成できることを示した。その後、光輸送路の改良により、電子バンチの縦方向位相空間分布を1ショットの画像として取得することができるようになった。

また、偏向電磁石の代わりに4極電磁石を用いることで、バンチ内で時間分解されたビーム拡がりを実測することが可能となる。これとQスキャン法を組み合わせることで、時間分解された横方向位相空間像を得ることが可能となる。

本学会ではエアロジェル・チェレンコフを用いた縦方向位相空間測定の実験結果について報告すると同時にこの手法を横方向位相空間に応用したスライスエミッタンスを実測する手法について説明する。

2. チェレンコフ・モニターの概要

可能な限りコンパクトなチェレンコフ発生部を製

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

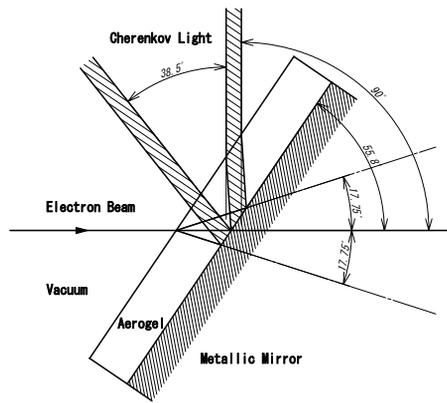


Figure 1: Schematic design of the Cherenkov radiator.

作するために、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。

この屈折率のエアロジェル中でのチェレンコフ放射角は、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の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切り出して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、1度金属鏡で反射され、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ビーム軌道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。チェレンコフ発光部を取り付けたスクリーンフォルダーには、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

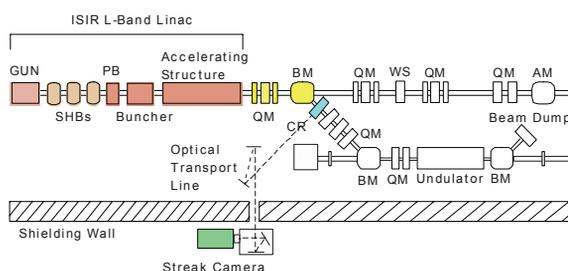


Figure 2: Schematic layout of the ISIR L-band Linac. The Cherenkov radiator was installed in the beam transport line from the linac to the FEL system.

に対し45°傾けて取り付けられている。

図2に示すように、チェレンコフ・プロファイルモニターは、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設置位置での分散関数は0.4mである。エアロジェルのエネルギー方向の可視幅は全体として40mmであるので、全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となる。

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C5680-11(浜松ホトニクス社製)が使用された。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)x8.25(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。今回は像倍比を2:1としているため、測定可能なエネルギー幅は約半分の5%程度となる。また光輸送路の最初のミラーは角度方向がリモートで変更できるようにしている。

3. 縦方向位相空間測定

図3に、実験に使用された電子ビームのエネルギー・スペクトルに示す。これは運動量分析電磁石と運動量スリット、ファラデーカップにより測定されたものである。運転モードは単バンチモードで、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る。ピークエネルギーは26.9 MeVでエネルギー幅(FWHM)は1.3%である。バンチ当たりの加速電荷量は大雑把に30 nC程度と推定される。

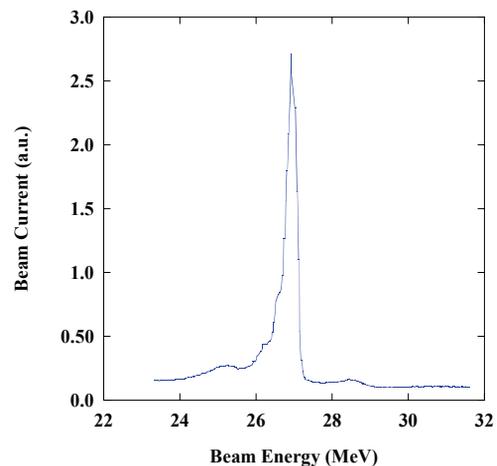


Figure 3: Beam energy spectrum measured with the momentum analyzer system.

図4は、エネルギー・スペクトル幅が最も狭くなるように調整されたときの縦方向位相空間分布を示している。図中のプロファイルは、水平軸としてエネルギー情報を、縦軸として時間情報をもっており、上側が電子バンチの先頭を示している。それぞれの軸に射影したエネルギー・スペクトルと時間プロファイルが、赤と青の線で示されている。電子バンチの分布から、バンチ先頭から中央部にかけてウェーク場と加速電場の勾配がキャンセルし平坦なエネルギーが実現されていることが読み取れる。バンチ後半は電荷量の減少により、ウェーク場が弱くなっており、そのためエネルギーが若干高くなっている部分が存在する。位相空間分布から得られたバンチ長は典型的なバンチ長 (20-30 ps) の倍程度の長さに見られるが、これはウェーク場に対してエネルギー幅を低く抑えるための調整の結果と解釈できる。位相空間分布から得られたエネルギー・スペクトルはFWHMで0.6 %と、前述の運動量分析電磁石により得られた結果よりも狭い。この結果は以前、可視遷移放射光 (OTR) 画像からエネルギー・スペクトルを評価したときと同様の結果であり、運動量分析スリットを用いたエネルギー・スペクトル測定システムよりも、画像で評価するシステムの方が高いエネルギー分解を有していることを示している。

5. 時間分解横方向位相空間分布測定

これまで電子ビームの縦方向位相空間測定手法の開発を行ってきたが、この手法は偏向電磁石の代わりに4極電磁石を用いることで、バンチ内での時間分解されたビーム広がりを評価することが可能となる。これとQスキャン法を組み合わせることにより、

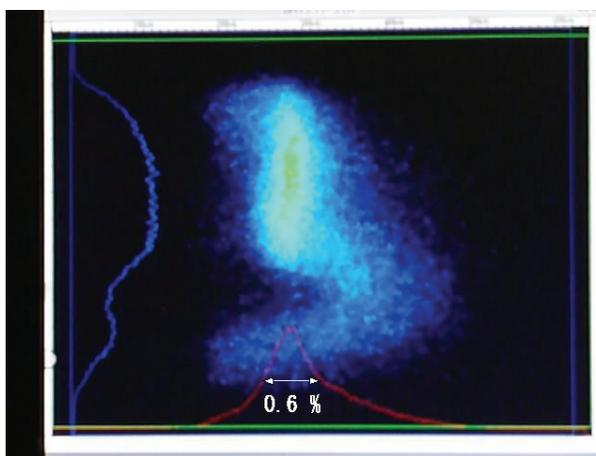


Figure 4: Longitudinal phase-space profile of the single bunch electron beam. The profile image has energy information as the horizontal and temporal one as the vertical axis (150 ps / full scale). The upper side indicates the head in the electron bunch and the right side the higher energy side.

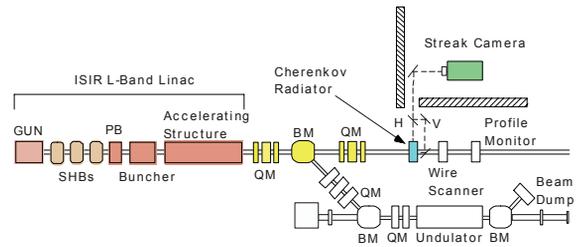


Figure 5: Schematic layout of the time-resolved transverse phase-space measurement system. The Cherenkov radiator will be installed just downstream of the Q-magnets in the beam transport line.

時間分解された横方向位相空間像を得ることが可能となる。これを検証するため、図5に示すように、Lバンドライナック直線部の4極電磁石の下流側にエアロジェルを用いたプロファイルモニターを新たに設置する。そこを通過する電子ビームのチェレンコフ光を、測定対象となる水平または垂直方向をストリークカメラの入射光学系スリットの水平方向に適合させる。電子ビームの横方向空間分布をストリークカメラにより時間掃引することで、電子ビームのスライスエミッタンスの直接評価をできるようになる。ここで提案する手法では、ストリークカメラを用いて時間掃引することでシステムを大幅に単純化しており、4極電磁石の下流側であれば、どこでもスライスエミッタンスを評価できるようになる。今後は縦方向位相空間に加えて、時間分解された横方向位相空間を評価できる6次元位相空間測定システムの開発を目指す。

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、および基盤研究 (C)21540298、2009) 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. Rönsch 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, EPAC2008, Genoa, Italy, June 2008, p. 1161.