

DEVELOPMENT OF A LONGITUDINAL PHASE-SPACE MONITOR FOR THE ELECTRON BEAM AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

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

Abstract

A measurement system of the longitudinal phase-space distribution of electrons using the combination of a bending magnet, a profile monitor and a streak camera are currently under development at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. In the preliminary experiments using an optical transition radiation (OTR) monitor as the profile monitor, it was confirmed that the monitor had higher momentum resolution rather than the ordinary used momentum analyzer using a slit and a current monitor. However, we could not get the efficient number of photons to obtain the phase-space images since, in addition to low photon yield, the angular distribution of the OTR is too large to concentrate in the electron energy region of 10 – 20 MeV, which is suitable energy for THz-SASE and THz-FEL experiments conducted at this laboratory. In order to increase the number of photons, we try to use a Silica aero-gel as a profile radiator using example from the results at PITZ. We will present an outline of the phase-space monitor and experimental results.

高輝度電子ビームの縦方向位相空間分布測定手法の開発

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用いてテラヘルツ領域での単一通過型自由電子レーザー (SASE-FEL) の研究を行なっている。SASE-FELの性能は、バンチ内での電子分布やエミッタンス、エネルギー拡がり等に強く依存する。そのため近年、電子ビームの縦方向位相空間分布を測定するために様々な手法が開発されている[1-4]。

我々は偏向電磁石とプロフィールモニター、ストリークカメラを組み合わせた縦方向位相空間分布測定システムの開発を行なっている。

本研究では縦方向位相空間分布測定システムの概要とOTRを用いて行なった予備実験の結果、そしてエアロジェルを用いたシステムへの変更点について報告する。

2. 縦方向位相空間分布測定

通常、電子ビームの縦方向(時間軸方向)の分布、すなわちバンチ構造を測定するためには、電子ビームが媒質中を通過するとき発生するチェレンコフ光や金属境界を通過するとき発生する可視遷移放射(OTR)をストリークカメラを使用して時間掃引する手法が用いられる。また、電子ビームのエネルギー分布は、偏向電磁石の下流側で、ビームプロフィールやスリットを通過する電流を測定することでエネルギー分布を評価している。これらはすでに確立された手法になっているが、それぞれ時間構造やエネルギー分布を単独で測定できるだけで、両者の同時測定は困難である。

他方、ストリークカメラによる時間掃引では、掃引される時間軸と直交する軸はストリークカメラの入射スリット上での空間分布を反映する。通常の時間構造の評価には、この空間軸方向の光強度を積分して、時間構造を評価することになる。もし偏向電磁石でビームの軌道を曲げた直後にスクリーンを挿

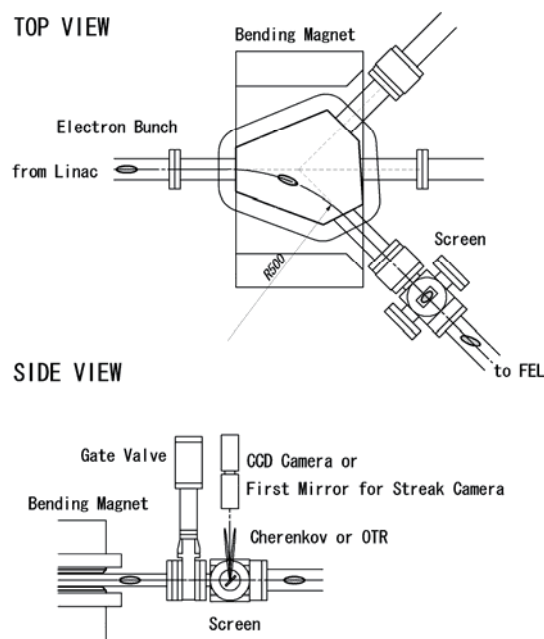


図1：縦方向位相空間モニター放射部の概略。

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

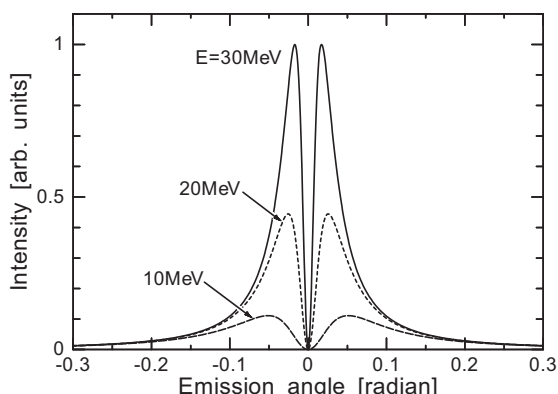


図2：遷移放射の角度分布

入すれば、電子のエネルギー差がスクリーン上の位置の差となって現れるため、発光像の水平軸がエネルギー分布の情報を持つことになる。したがってそれを掃引して得られるストリーク像は位相空間の電荷分布を反映したものとなる。

3. 実験装置系

前述のアイデアを実現するために、図1に示すように偏向電磁石の320mm下流側に、電子ビームのプロファイルをチェレンコフ光またはOTR光に変換するためのスクリーンを設置した。最初の実験はOTRを測定するためのアルミ板 (55×40×1.6 mm³) をビーム軌道面に対して45度の角度で取り付けました。これにより、OTRの後方放射をビーム軸から垂直方向に90度で取り出すことになる。

縦方向位相空間測定の場合には、光をストリークカメラで時間掃引することになるが、まず予備実験としてCCDカメラで電子ビームのプロファイルを測定した。使用したカメラ (TAKEX、FC300M) はプログレッシブシャッターカメラで、1/3インチで659(H)×494(V)ピクセルの有効画素を持つ。集光系として、口径40 mmのマクロレンズ (Canon、J6X11) を用いた。カメラはスクリーンから210 mmの位置に設置され、この配置での受光角はおおよそ±0.1 rad (±5.7度) である。放射されるOTRの角度依存性は図2のようになるため、20~30 MeVの電子ビームに対しては十分な受光角と考えられる。

4. OTR予備実験の結果

実験は26.6 MeVの単バンチ電子ビームを用いて行なった。このときの電子ビームの規格化エミッタンスは水平方向が165 π mm mrad、垂直方向が160 π mm mradで、バンチ当たりの電荷量は30 nC程度である。測定されたOTR画像を図3に示す。画素当たりの空間分解は水平方向、垂直方向ともに0.085 mm/pixelである。図4はこのプロファイルを垂直方向に積算して得られたエネルギースペクトルである。スクリーンの位置での分散関数ηは0.4 mであり、運動量分解能は0.02 %/pixelと推定される。この値を用

いて電子ビームのエネルギー幅は0.4 % (FWHM) と評価された。図5の実線は通常使用している分析スリットとファラデーカップ電流計を用いた運動量分析電磁石で測定されたエネルギースペクトルであり、そのスペクトル幅は1.6 % (FWHM) であった。破線は図4のプロファイルを±0.5 %の分解能で移動平均化したものである。両者がよい一致を示すことから、現状の分析電磁石スリットによるエネルギー分解能はおおよそ1 %程度と推測される。これにより、このシステムが従来の運動量分析電磁石を用いたエネルギースペクトル測定システムよりも高い分解能を有していることが確認された。

次にテラヘルツ領域でのFELやSASEの実験で必要とされる10~20 MeVの低エネルギー電子ビームのプロファイル測定を試みた。しかし、図2に示すようにピーク放射角度が $\sim 1/\gamma$ の拡がりを持つため、放射角度分布の拡がりにより十分な量の光子を集めることが出来ず、プロファイルを得ることが困難であった。

4. OTRからチェレンコフ光への変更

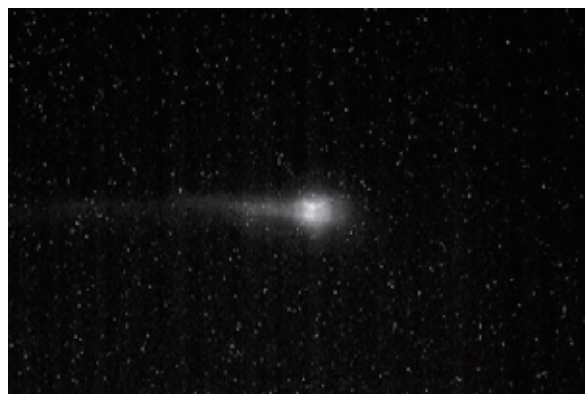


図3：CCDカメラで測定した電子ビームのOTR画像。水平方向が偏向電磁石のビーム軌道面であり、左側が低エネルギー側となる。

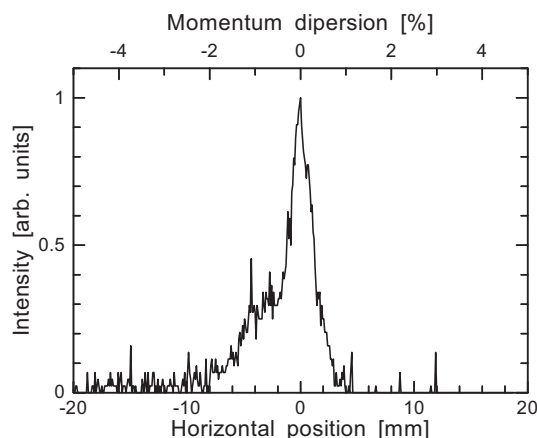


図4：OTR画像を垂直方向に積算して得られた電子バンチの運動量プロファイル。

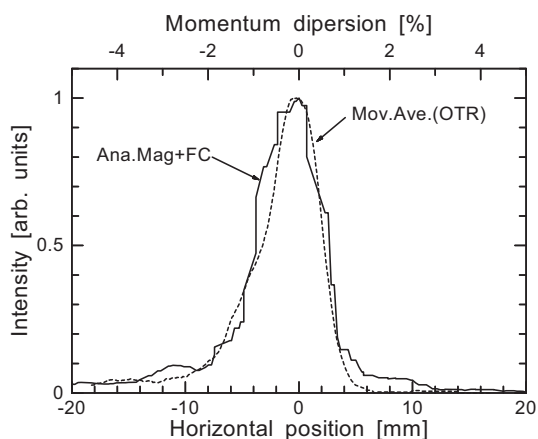


図5：電子バンチのエネルギースペクトル。実線は通常使用している分析スリットとファラデーカップ電流計を用いた運動量分析電磁石での測定結果。破線は OTR プロファイルを±0.5% の分解能で移動平均化したスペクトル。

OTRを利用する限りこの光子数を増加させることは困難と考えられたため、PITZでの研究[2]を参考にスクリーン部にエアロジェルを用いてチェレンコフ光を光源とすることにした。ここで用いるエアロジェルは疎水性シリカエアロジェル（松下電工製）で、その屈折率は1.015（SP15）、1.03（SP30）、1.05（SP50）である。このエアロジェルはKEKBのBELLE検出器のチェレンコフカウンター等にも使用されている。

荷電粒子の速度がほぼ光速の場合、ビーム軸に対するチェレンコフ放射角は各々9.9、13.9、17.8度となる。このような大きな発散角を持つ場合、大気側にミラーを設置して全体を集光することは困難であるため、発生するチェレンコフ光の一部だけを集光ミラーで切り出すことにした。また、チェレンコフ光の発光点は媒質中での粒子の軌跡に沿った線状となる。点光源ではないため原理的に1点に集光することが困難となる。我々はこの点を考慮して厚さ1.5 mmのエアロジェルを製作し、サポートを兼ねた金属反射鏡に密着させすることにした。

チェレンコフ光は、エアロジェル中で17.8度の角度で放射され、金属反射鏡で反射された後にもう一度エアロジェル中を通過して、真空中に取出される。円錐状に発生するチェレンコフ光の中で最も上向きに放射される部分の光を測定に利用することにした。その放射角と真空側に取り出されるときに屈折角を含め、最終的に光がビーム軌道面に対して90度方向に取出されるように、エアロジェルはビーム軸に対し55.8度の角度で取り付けることにした。このとき、ビームに対するエアロジェルの実効的な厚さは2.7 mmとなる。試作されたエアロジェルの写真を図6に示す。

5. まとめ

可視遷移放射プロファイルモニターを使用した予

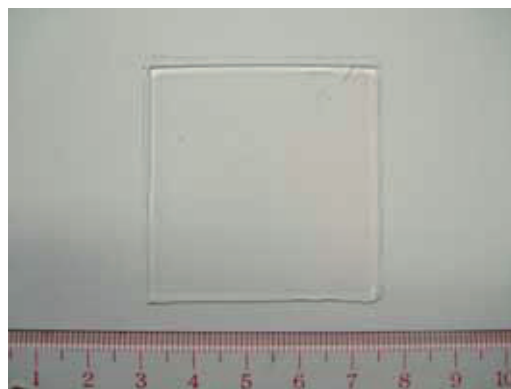


図6：エアロジェルの写真。屈折率は1.05で、サイズは45×45×1.5 mm³。

備実験では、このシステムが従来の運動量分析電磁石よりも高いエネルギー分解を有していることが確認された。一方、テラヘルツ領域のFELやSASE実験で必要とされる10～20 MeVの低エネルギー電子ビームに対しては、放射角度分布の拡がりにより十分な集光が出来ず、電子分布像を得ることが困難であることも解った。この光子数を増加させるためにプロフィールモニターの発光部にシリカエアロジェルを使用した新しいスクリーン部の製作を行なっている。

謝辞

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

参考文献

- [1] A. Doria, et al., “Long wavelength compact-FEL with controlled energy-phase correlation”, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A 475, 296-302, 2001.
- [2] J. Rönsch, et al, “Investigations of the longitudinal beam properties at the photoinjector test facility in Zeuthen”, FEL’06, BESSY, Berlin, Germany, August 2006, p.597, <http://www.jacow.org>.
- [3] H. Loos, et al, “Experimental Studies of Temporal Electron Beam Shaping at the DUV-FEL Accelerator”, FEL’05, Stanford, August 2005, p.632, <http://www.jacow.org>.
- [4] S. Zhang, et al, “Temporal Characterization of Electron Beam Bunches with a Fast Streak Camera at the JLab FEL Facility”, FEL’05, Stanford, August 2005, p.640, <http://www.jacow.org>.
- [5] R. Kato, et al, “Longitudinal phase-space measurements of a high-brightness single-bunch beam”, FEL’06, BESSY, Berlin, Germany, August 2006, p.676, <http://www.jacow.org>.