

BUNCH LENGTH MEASUREMENT USING A FEMTOSECOND STREAK CAMERA AT SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Takanori Tanikawa^{1,A)}, Toru Hara^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B),C)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)},
 Makina Yabashi^{C)}, Shinobu Inoue^{C)}, Hideo Kitamura^{A),B),C)}, Tsumoru Shintake^{B)}

^{A)}University of Hyogo

3-2-1 Koto, Kamigori, Ako, Hyogo, 678-1297

^{B)}RIKEN/SPring-8

1-1-1 Koto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{C)}JASRI/SPring-8

1-1-1 Koto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

The SCSS prototype accelerator has been constructed as a test facility for the 8 GeV SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) project. The machine commissioning was started in May 2006, and the amplification of spontaneous radiation was confirmed in June 2006. In order to obtain SASE, low emittance and high peak current electron beam is indispensable. In the prototype accelerator, the bunch length of the electron beam is compressed from 1 ns to 10 ps by velocity bunching scheme at the injector. Afterward, the bunch length is further compressed to 1 ps by the magnetic chicane. In this paper, the results of bunch length measurements by observing Cherenkov radiation and OTR (Optical Transition Radiation) with a femtosecond streak camera are shown. In addition, a new screen for Cherenkov radiation is proposed and tested.

SCSS試験加速器におけるフェムト秒ストリークカメラ を用いた電子ビームバンチ長測定

1. はじめに

X-FEL加速器でレーザー発振を得るには、低エミッタンス・高ピーク電流の電子ビームバンチが必要である。SCSS試験加速器では、電子銃で射出されたマイクロ秒の電子ビームからディフレクターによって1 nsのバンチを切り出し、入射部でのvelocity bunching、及びシケインを利用したバンチコンプレッサーによって1 ps以下までバンチを圧縮する。電子バンチの時間プロファイルはFEL発振を得る為に重要な情報であり、ストリークカメラによるバンチ長の測定を試みた。

バンチ長測定は、バンチコンプレッサー出口（ビームエネルギー約40 MeV）とアンジュレータ手前（ビームエネルギー250 MeV）において、スクリーンに電子ビームを当て、発生した光の時間幅をストリークカメラで計測することにより行った。バンチコンプレッサー出口では当初OTRを用いる予定だったが、ビームエネルギーが低く、ストリークカメラで計測するには十分な光量が得られなかった。そこで、OTRより光量が多いチェレンコフ放射を用いることとし、更に採光効率の良い形状のスクリー

ンを新たに開発してバンチ長の評価を試みた。

一方、OTRはビームエネルギーの二乗に比例して強度が増加するため、ビームエネルギーが高いアンジュレータ手前では、金薄膜から放射されたOTRを使ってバンチ長測定を行った。

なお、試験加速器では、バンチ圧縮はバンチコンプレッサー出口で終了するので、バンチコンプレッサー出口及びアンジュレータ手前でのバンチ長はほぼ同じである。

2. 光学系の配置

図1に示すように、バンチ長測定用スクリーンから放射された被測定光は、ミラーとレンズからなる光輸送ポートを通して加速器収納部内から外部へ約8 mの距離を輸送され、ストリークカメラまで導かれる。ストリークカメラ前の平凸レンズはストリークカメラ光電面への集光用である。OTR用スクリーンには、光の発散を抑え平行化するためのレンズを設置し、レンズの焦点距離や光軸を電動ステージで遠隔で調整できるようにしている。

なお、フェムト秒ストリークカメラは浜松ホトニ

¹ E-mail: tanikawa@spring8.or.jp

クス社のFESCA-200(時間分解能200 fs)を使用した。

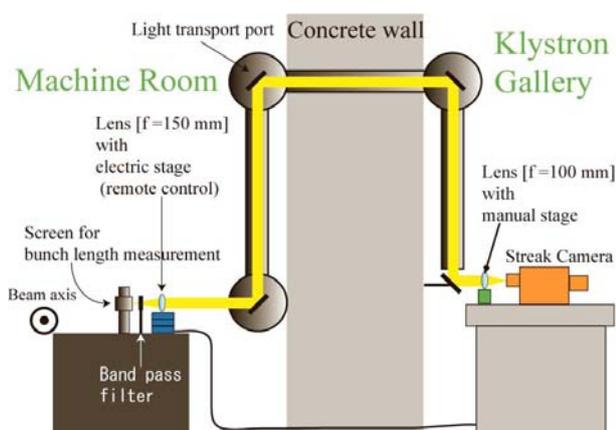


図1：バンチ長測定用スクリーンからストリークカメラまでの光学系の配置

3. チェレンコフ放射用新型スクリーンによるバンチ長の評価

3.1 チェレンコフ放射用新型スクリーンの開発

チェレンコフ放射は、屈折率 n の透明な媒質中を光速 (c/n) を超える速度で荷電粒子が進む時に発生し、開口角 $\theta = \arccos(1/n\beta)$ の円錐状に放射される。

ここでは、新たに考案した円錐型のBK7ガラス($n=1.52$)をスクリーンとして用い、放射されたチェレンコフ光をミラーで反射させて外部へ取り出す配置とした(図2及び図3)。通常の平面板スクリーンの場合、チェレンコフ放射の開口角が 45° 以上あるため、表面の全反射により放射された光を全立体角にわたり取り込むことができない。このスクリーンは、円錐の頂角をチェレンコフ放射の放射角 θ と等しくすることにより、媒質内で放射されたチェレンコフ光を円錐側面で全反射させ、放射された全立体角の光を平行にして取り出すことができる。これにより光学系で輸送する際のロスを減らし、より強度の強い光を用いて効率的な測定が可能になる。

図4は、実際にスクリーン内で放射されたチェレンコフ光をCCDカメラで見た様子である。

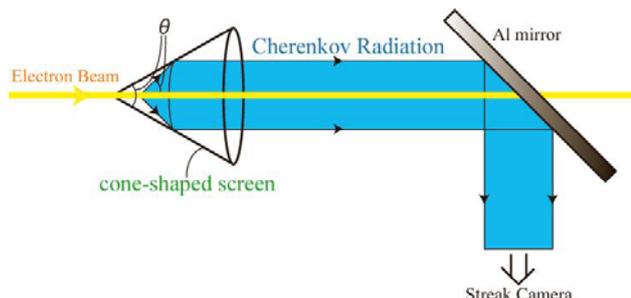


図2：チェレンコフ放射用新型スクリーンで発生したチェレンコフ光の光路

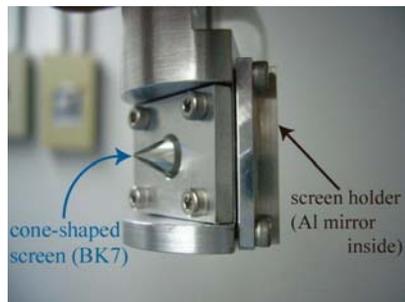


図3：チェレンコフ放射用新型スクリーンとスクリーンホルダー

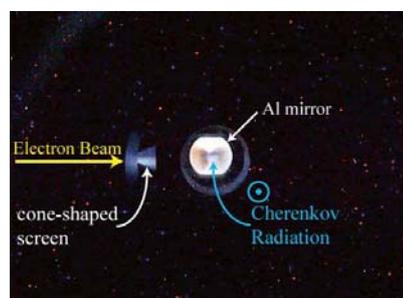


図4：CCDカメラで捉えたスクリーン内部で放射されたチェレンコフ光の様子

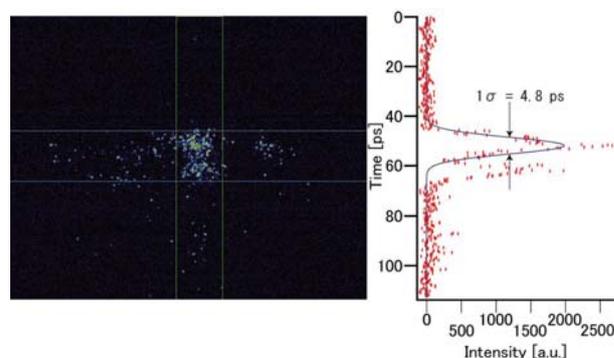


図5：ストリークカメラによるチェレンコフ光パルス幅測定(シングルショット)

3.2 ストリークカメラによるバンチ長の評価

バンチコンプレッサー後(ビームエネルギー約40 MeV)におけるバンチ長測定の結果を図5に示す。図5のキャプチャー画像(左)の縦軸は時間、横軸は位置を表している。縦軸の時間フルスケールは掃引レンジである112 psに対応しており、図5(右)は時間軸方向の輝度プロファイルである。

図5からわかるように、測定されたバンチの時間プロファイルは、ピーク間距離で約10 ps離れたダブルピークを持っている。この原因は明らかになっていないが、バンチのサテライトか或いは光学系に問題があると考えている。

上記の理由から片側のピークをバンチ長として評価した結果、現状では 1σ で4.8 ps程度と測定された。

新たに考案した円錐型スクリーンは、光量を増加させることができるが、電子ビームサイズによってスクリーン内部で放射されたチェレンコフ光に光路差が生じる問題は依然として残っている。即ち時間分解能は、電子ビームサイズによって制限されてしまう。よって、スクリーンの前にスリット等を入れ、ビームサイズを小さく抑えることで、時間分解能をいかに向上させることができるかが今後の課題である。

4. OTRによるバンチ長の評価

OTR (Optical Transition Radiation) は電子ビームが金属フォイルに衝突した際、 45° 入射の場合フォイル表面に対して鏡面反射方向に $1/\gamma$ (γ : Lorentz Factor)の角度広がりを持って放射される。チェレンコフ放射に比べて、OTRはフォイル表面で発生する為時間分解能に優れ、指向性が良い反面、光量は少ない。

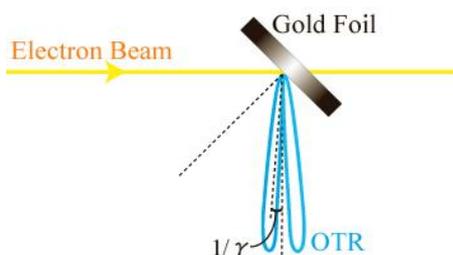


図6: OTRの放射の様子

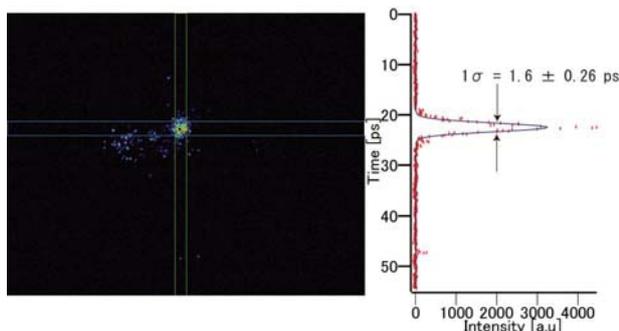


図7: ストリークカメラによるOTRパルス幅測定 (シングルショット)

アンジュレータ手前 (ビームエネルギー250 MeV) におけるバンチ長測定結果を図7に示す。図7のキャプチャー画像 (左) の縦軸の時間フルスケールは掃引レンジである55 psとなっている。OTRによるバンチ長測定では、 1σ で1.6 ps程度であるという結果が得られた。

一方、C-band加速管RFのゼロクロス位相で電子ビームを加速することにより、電子バンチ長に対応したエネルギー分散を与え、シケイン部のビームサイズによってバンチ長を間接的に測定した結果は、全幅約1 ps程度となった^[1]。今回ストリークカメラ

によって得られたバンチ長は、それに比べると 1σ で1.6 ps程度と長すぎる。今回の測定では可視光域の広帯域バンドパスフィルター (400-750 nm) を用いたが、OTRはスペクトル幅が広いので、収束系や大気の色収差によって、本来のバンチ長よりも長く見積もられている可能性がある。狭帯域フィルター (バンド幅 ± 5 nm) も試したが、測定に十分な光量を得ることができなかった。これを改善するため、平凸レンズをアクロマティックレンズに換えて色収差を無くすことや真空パスの設置など、測定系に問題がないかどうかを検証していき、真のバンチ長を評価できるよう改善していくことが今後の課題である。

5. まとめと今後の課題

バンチ長評価の結果、チェレンコフ放射用新型スクリーンでの測定結果は 1σ で4.8 ps程度、OTRは 1σ で1.6 ps程度と評価された。

新たに開発したチェレンコフ放射用円錐スクリーンを用いることで、従来のスクリーンに比べ光の強度上げ、平行光を取り出すことができた。チェレンコフ光は、ビームエネルギーに依存せず電荷量に依存する為、ビームエネルギーの低い電子ビームバンチを10 ps程度以上の分解能で評価するには、チェレンコフ放射用新型スクリーンは有用であるだろう。但し、バンチ長の短い電子ビームを測定するにはビームサイズをできるだけ絞る等の工夫が必要である。

OTRについては光学系または測定系の問題点を早急に見つけ出し、正確なバンチ長評価を行う必要がある。

6. 謝辞

SCSSプロジェクトに携わる多くの研究員の方々にご指導・ご協力していただいたことをこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "BEAM PERFORMANCE OF THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.