

PERFORMANCE CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF X-RAY STREAK CAMERA IN SPRING-8 BEAM DIAGNOSTICS BEAMLINE

Akira Mochihashi^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Yoshito Shimosaki^{A)}, Kouichi Soutome^{A)},
Shiro Takano^{A)}, Masaru Takao^{A)}, Kazuhiro Tamura^{A)}, Yoshihito Tanaka^{B)}

^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198 Japan

^{B)}RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148 Japan

Abstract

An X-ray streak camera (X-SC) can directly measure the temporal width of X-ray synchrotron radiation (SR) pulse. The temporal resolution of X-SC depends on the initial velocity distribution of the photoelectrons from a photocathode which converts the X-ray photons to the photoelectrons. Because of larger photon energies, the conversion process is more complicated than that in a visible SC. At the SPring-8, we are investigating characters of an X-SC by observing monochromatic X-ray photons at the diagnostics beamline II (BL05SS). The experimental setups, and the preliminary results of the experiments of the temporal response at several photon energies are presented. At the SPring-8, challenges to generate shorter X-ray pulse by changing the operating conditions of the storage ring are in progress. The temporal width of X-ray pulse measured by the X-SC in the short bunch operations, low-alpha operation and tilted bunch operation, are also presented.

SPRING-8加速器診断ビームラインにおける X線ストリークカメラの特性評価

1. はじめに

放射光に代表されるナノ～ピコ秒X線パルス光のパルス長の直接観測の手段として、X線ストリークカメラ（以下X-SC）による方法が挙げられる。X-SCの時間分解能を与える要因として、X線入射部光電面での光電子の初速度分布、光電子の空間電荷効果、Image Intensifier内のMCPの増倍揺らぎ、タイミング信号のジッターなどが挙げられる。X-SCの光電面における（光子→光電子）変換過程は、光子エネルギーがkeV領域と高いため、一次電子はkeV程度の高いエネルギーを持つ。一方、典型的な二次電子エネルギーは十～数十eV、エネルギー広がり数は数eV程度である^[1]。ストリーク像の形成に寄与するのは後者の二次電子であるため、二次電子の初速度分布がX-SCの時間分解能に影響する。この二次電子の初速度分布に起因するストリーク像の時間幅の広がり、単一光子が光電面をヒットした時に発生する光電子の初速度分布すなわちストリーク像上での時間広がりとして観測される。このことに着目し、X-SCへの入射X線強度をフォトンカウンティング領域まで減少させ、単一光子イベントにおけるストリーク像の時間幅を観測した。また、異なるX線エネルギーについて同様の観測を行ったので報告する。

SPring-8ではmomentum compaction factorの制御による低アルファ運転や、head-tail motion励起により鉛直方向にバンチを傾斜させることによる短パルスX線発生研究が進行中である。X-SCによる短パルスX線のパルス長の評価についても報告する。

なお、一連の観測実験はSPring-8加速器診断ビームライン(BL05SS)において行った。当該ビームライ

ンの詳細と光源性能評価等については本学会のプロシーディングス^[2,3]を参照されたい。

2. X-SCによる単一光子の観測

2.1 実験のセットアップ

単一光子イベントの時間広がりを観測するため、X-SC（浜松ホトニクス、C5680-06）にはシンクロスキャンモジュール(M5675)を取付けた。SPring-8のRF信号(508.58MHz)を分周信号発生器で7分周した信号(72.65MHz)をシンクロスキャンユニットのタイミング信号として用いた。これにより、常にある特定の電子バンチからのX線のみを観測することができる。実験では、垂直掃引時間は最速（全スキャン幅141ps）とした。使用したX-SCのストリーク管末端部の蛍光材はP43(100%→10%減衰時間1ms)なので、蛍光材をヒットする光電子に対して1ms以下の時間ゲートを設けなければならない。時間ゲートがないと過去のイベントが蛍光材上で重なり、単一光子イベントを特定することができなくなる。そこで、X-SCに水平掃引ユニット(M5679、繰り返し10Hz以下)を用いて水平掃引時間を100μsとし、電子ビーム周囲に同期したタイミング信号（繰り返し9Hz）で水平方向掃引を行うことで、ストリーク管末端部の蛍光材をヒットする光電子に対して100μsの時間ゲートを設けることとした。

単一光子イベントをできるだけ明確に観測するため、ストリーク管下流のImage Intensifier（以下I.I.）

内のMCPをゲート動作させることにより、MCP暗電流によるバックグラウンドイベントを極力軽減するようにした。MCPゲートは水平掃引スタートと同時にオープンとし、P43の全発光量の90%を収集することを目安に、ゲート幅は1msとした。また、I.I.出力側の蛍光材もP43なので、I.I.下流のCCDカメラ露光時間は約2msとした。CCDカメラは外部トリガ動作とし、水平掃引とMCPゲートに同期させて撮像した。また、ビームライン上流からの放射線がI.I.やCCDカメラを直接ヒットすることによるバックグラウンドイベントを抑制するため、X-SC前方にビーム軸方向に300mm厚みの鉛遮蔽体を設けた。

実験ではBL05SS多極ウィグラーを光源とし、二結晶分光器で単色化したX線をAlフィルターで強度を調整し、Taスリットアパーチャーを通してX-SCに入射した。1回の水平方向掃引で1ショット撮像して1データを取得し、これを1000ショット程度連続して撮像・記録した。X線の光量の調整の目安としては、1ショットのデータに単一光子イベントが0~3イベント程度含まれる程度とした。なお、実験で用いたX-SCの光電面はCsI（厚み300nm、金とパレリン有機膜で挟んだ構造）である。

2.2 単一光子イベントの観測

図1に10.6keVのX線を観測した場合のX-SCによる単一光子イベントの観測例を示す。図1中のドット状のものが光子由来もしくは何らかのバックグラウンドに由来するイベントである。孤立したドットの中に塊状のドットが見られる。このドットグループとして見られるイベントは、X-SCのタイミングを電子バンチのないRFバケツに設定した場合や、ビームラインのビームシャッターを閉じた場合には見られず、X線を観測しているときのみ見られるので、このドットグループが単一光子イベントに由来するものと思われる。Alフィルターの設定を変えて光量を増加させると、このドットグループの出現頻度が増すことを確認した。このドットグループの時間方向プロファイルが、単一光子イベントに対するX-SCの時間応答であると解釈できる。ドットグループ以外の散在するドットは、ビームのないタイミングやビームシャッターを閉じた状態でも見られ、またMCP電圧を降下すると出現頻度が減ることから、I.I.内部の暗電流によるバックグラウンドと考えられる。ストリーク像に現れたドットを拾い上げ、各ドットの強度の頻度グラフとしたものを図2に示す。図2にはX-SCのタイミングを電子バンチに合わせた場合とそうでない場合の結果を示した。図2を見ると、ドット強度によってバックグラウンドイベントと光子によるイベントとを区別できることが分かる。図中の横軸（ストリーク像上のイベント強度に相当）が200以上の場合、X線の有無のイベント頻度比は1/100程度である。ここで、図1の例のように光子に由来するイベントはグループ状のドットとして観測

されることを考慮し、ドット強度の解析では、有意な強度を持つドットの周囲（ドットを中心として縦151pixel(約42ps),横20pixel)のCCDカウントを積算して求めた。強度が有意なドットの選定方法は、1画面(640x512データ点)上に3x3の窓を設けて1データポイントずつ窓をずらしながら窓内のCCD合計計数を求め、窓内の合計計数がCCDカメラのバックグラウンド計数揺らぎの10倍以上であるとき、そこに有意なドットがあるとした。この方法でバックグラウンドのドット（X線由来と思われるイベントよりも強度は小さい）も十分拾い上げることが可能であることを確認した。

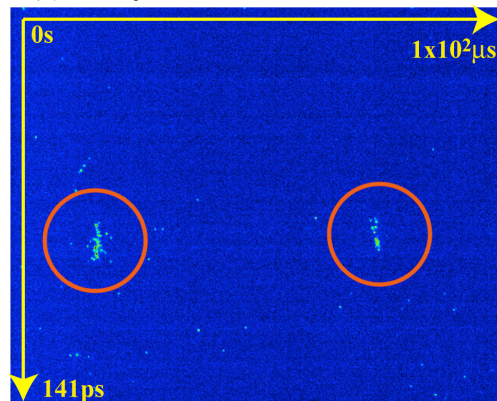


図1 単一光子イベントの観測例。円内のドットの塊が単一光子イベントと思われる。

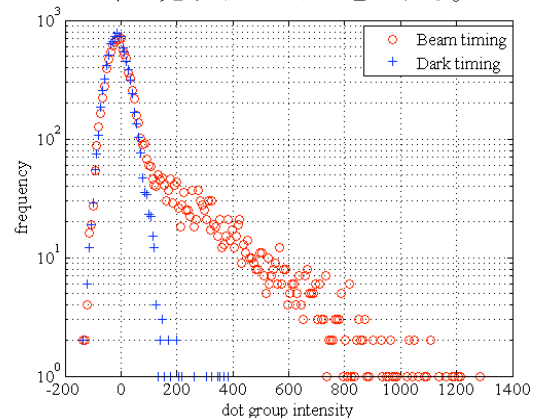


図2 光の有(○)無(+)でのストリーク像内のドットグループの強度頻度。

ドットグループ強度の条件を満たすドットグループの平均的な時間プロファイルを求めた結果を図3に示す。同様の実験と解析をX線エネルギー4.5keV~30keVについて行った結果を示した。解析の結果、単一光子イベントによるX-SCの観測パルス幅はFWHM値でほぼ3.5~4psであった。今後はパルス幅のエネルギー依存性の詳細について、また異なる光電面条件（材質、厚みなど）の依存性等に着目した研究を続ける。またデータ解析法の向上（定量的な誤差評価等）も同時に進めてゆく。

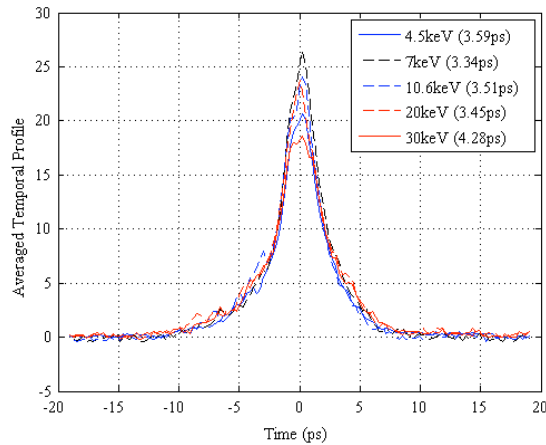


図3 単一光子イベントの平均時間プロファイル。凡例中の時間はFWHM値。

3. 短パルスX線の観測

3.1 低アルファ運転での短パルスX線発生

SPring-8ではmomentum compaction factorを制御してバンチ長を短縮し、短パルスX線の発生実験を行っている^[4]。X-SCを用いて、短パルスX線のパルス長の評価を行い、またX-SCの時間分解能の評価も行った。電子バンチ長(σ_t)はシンクロトロン振動数(fs)の逆数に比例することから、RF電圧を変えてシンクロトロン周波数(fs)を制御してバンチ長の変化を測定した。結果を図4に示す。測定における時間ジッター等の影響は自乗和で加算されることを考慮し $1/\text{fs}$ に対する σ_t 依存性をフィットした結果、X-SCシステムとしての時間分解能4psを得た。バンチ長測定にはシンクロスキャンによるアナログ積算を用いているので、この数値には単一光子広がりに加えてシステムの時間ジッターや開口サイズによる効果が重畳している。図4には可視光ストリークカメラ(V-SC)での測定結果も示した。この測定の場合、V-SCの時間分解能は2.7psとX-SCと比較して小さい。これは単一光子入射による光電子の初速度分布の差が影響していると思われる。V-SCとX-SCの相違とその較正方法について今後定量的な考察が必要である。

3.2 Head-tail motion励起による短パルスX線発生

Vertical chromaticityがゼロでない場合、電子バンチに鉛直方向シングルキックを与えると電子バンチの前後でのチューンの差によって電子バンチが起立し、damping timeの間鉛直方向head-tail motionを起こす^[5]。電子バンチが起立したタイミングで発生する放射光を鉛直方向スリットで成形することで短パルスX線を観測できる。SPring-8ではキッカーマグネットを開発し^[6]電子バンチに鉛直方向シングルキックを与え、バンチが起立したタイミングで発生するX線をTaスリットを介してX-SCにて観測した。結果を図5に示す。実験は単バンチ1mAで行った。図5(a)の

鉛直キック前ではX線パルス幅は35ps(FWHM)である一方、キック後~65ターン後(図5(b))では明らかにパルス長が短縮されており、図中のA,Bパルス長はFWHMでそれぞれ14,18psとなっている。図5(a)でキック後パルスが消えているが、これは電子バンチのコヒーレント振動によりスリット開口から光軸が外れるためである。また図5(b)ではX線パルス強度とタイミングに構造が見られるが、これは鉛直方向チューン値の小数部が~0.3であるため電子バンチがほぼリング3周回の周期で振動していることを反映している。

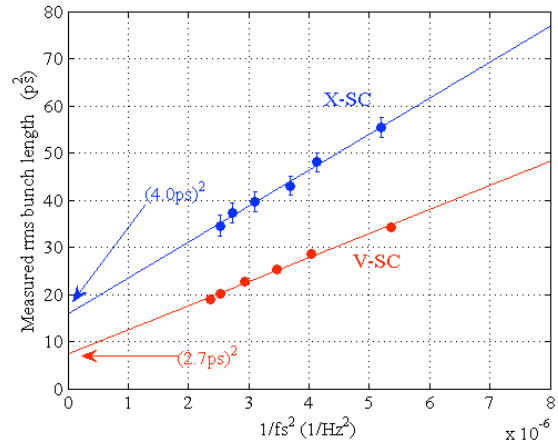


図4 低アルファ運転時のバンチ長のシンクロトロン振動数依存性。X-SC, V-SCについての結果。

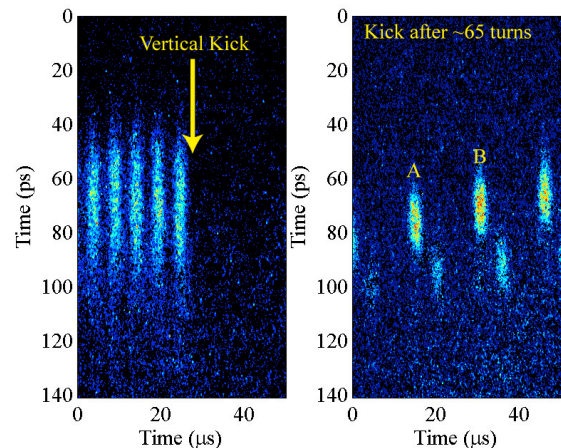


図5 (a)(左)鉛直キック直前/直後と(b)(右)キック後65ターン付近でのX線パルス。

参考文献

- [1] B. L. Henke, et al., "The characterization of x-ray photocathodes in the 0.1-10-keV photon energy region", J. Appl. Phys. **52**(3), 1509 (1981).
- [2] S. Takano, et al., in this proceedings.
- [3] M. Masaki, et al., in this proceedings.
- [4] SPring-8 Research Frontiers 2008 (in press).
- [5] W. Guo, et al., "Generation picosecond x-ray pulses in synchrotron light sources using dipole kickers", Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** 020701 (2007).
- [6] C. Mitsuda, et al., in this proceedings.