

Si-APD を受光素子とする高感度・高速 X 線シンチレーション検出器の開発 Development of a fast X-ray scintillation detector with a Si-APD photosensor

岸本 俊二^{1,*}, 井上 圭介²

¹ 高エネルギー加速器研究機構, 物質構造科学研究所, 放射光科学研究施設
〒305-0801 つくば市大穂 1-1

² 総合研究大学院大学, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

Shunji Kishimoto^{1,*} Keisuke Inoue²

¹ Photon Factory, IMSS, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

² SOKENDAI, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

1 はじめに

シンチレーション検出器の受光素子として光電子増倍管 (PMT) がよく使用される。PMT は 10^6 を超える増幅度が得られるものの、電圧印加回路部を含めると小型のものでも直径 16mm、長さ 20mm 以上である。多チャンネル化により最大許容計数率を 10^7 cps 以上にしたいときや検出器を試料に近接させるときは、アノード分割型 PMT による多素子化は可能ながらチャンネルごとに高計数率を確保できない。そのため PMT を複数並べることになり PMT の大きさが検出効率の確保を制限する。我々の研究：2012G062「ナノ秒発光シンチレータによる高エネルギー X 線用高速検出器の開発」でも PMT を採用して検出器を構成してきたが放射光実験で要求される小型で高計数率・高速特性を満たす多素子検出器を開発する上では、PMT が性能や機能を制限するものだった。一方、シリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD) はミリサイズでシンチレーション光の代表的な波長 400 nm 付近での量子効率が PMT の ~2 倍である。パルス幅は 100 ns 程度ながら増幅度 10^6 が低印加電圧で簡便に得られるガイガーモード Si-APD の開発が近年進展し (浜松ホトニクス MPPC など) 弱点だった雑音計数率も 1M cps から 10k cps オーダーに改善されつつある。比例モード Si-APD は増幅度が 10^2 程度ながら 10^2 cps の低雑音で PMT よりも速いナノ秒パルスが得られる利点がある。本研究では放射光実験に適した多素子高速 X 線検出器の開発を進めるために、シンチレーション検出器の受光素子として小型で高速・高感度の比例モード Si-APD を採用して検出器を製作、その特性を評価した。

比例モード Si-APD は浜松ホトニクス製 S8664-30 型を採用した。搭載するシンチレータとして市販の鉛添加プラスチック・シンチレータ (PLS)、または新たに開発する重元素化合物の超微粒子を添加した PLS を用いた。雑音低減、比例モード Si-APD の増幅度増大のため、ペルチェ素子上に無酸素銅製ホルダーを介して Si-APD を冷却できるように装着した検

出器を製作して X 線を照射し、得られる波高分布、温度およびエネルギー依存性、ハイブリッドモード運転またはシングルバンチモード運転を利用した時間スペクトル、低計数率から 10^7 cps を超える領域までの計数率特性を測定した。1 素子型検出器による評価のあと、核共鳴散乱実験で実用になる多素子検出器 (3-4 チャンネル) の製作や、より大規模な検出器システム開発の基礎とすることを目指した。

2 実験

図 1 は、ペルチェ素子の上に取り付けた銅製ホルダーと比例モード Si-APD 受光素子 (S8664-30 型) である。鉛添加 PLS (E1jen 社製 EJ-256, 3 mm 径・厚さ 2 mm) を Si-APD 受光部に搭載し、Si-APD を -35°C まで冷却できるようにした。Si-APD に X 線ビームが直接入射しないようにシンチレータ側面から X 線ビームを入射して比例モード Si-APD について、以下の測定を行った。

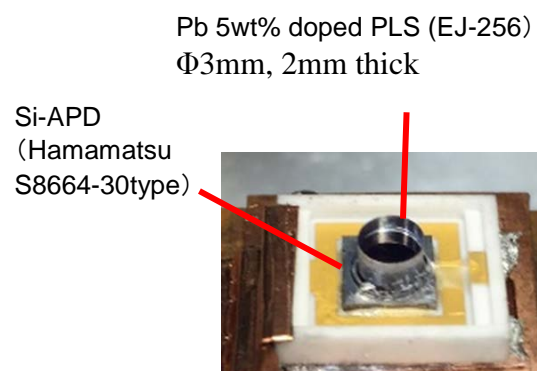


図 1 : 検出器内部のシンチレータと Si-APD

- A. 単色 X 線 (67.41 keV-⁶¹Niの核励起準位に相当) を入射。波高分布測定 (電荷感応型前置増幅器 Canberra2001A を使用、数k cpsまで) を行った。温度制御しながら-35°Cまでの各温度での波高分布、雑音レベルを記録した。ピーク位置を電荷量に換算できるようにパルサー信号入力によるスペクトルと比較してSi-APDの内部増幅度を決定した。
- B. 金属フィルターとNaI(Tl)検出器により求めた入射 X 線ビーム強度とエネルギー・スペクトルのピーク積分強度と比較してシンチレータの検出効率を求めた。
- C. 高速パルス増幅器 (キーコムLNA012-2) を介して出力パルス波形を記録。検出器に入射するビーム強度を金属フィルターで調整しながら検出器の出力計数率を測定した。
- D. PFリング・シングルバンチまたはハイブリッドモード運転を利用した時間スペクトル測定を実施した。ピーク波形、とくにピーク中心前後の「すそ」の広がり注意到して記録した。シンチレータ形状 (円筒、角柱) に対する時間幅やピーク波形の変化も調べた。

3 結果および考察

実験 A の波高分布測定によって-35°C、印加電圧 383 V のとき、半値幅 : 46% を得た。このときの APD 増幅率は 180、B の測定により検出効率は $6.9 \pm 0.1\%$ であった。D に述べたように、PF リング・マルチバンチ運転モードにおけるパルス X 線時間構造を時間-波高変換器 (TAC) を使って測定した。2 ns のパルス列間隔をもとにピーク幅を評価して $0.50 \pm 0.06 \text{ ns}$ (FWHM) の時間分解能が得られた。Si-APD が受けるシンチレーション光を最大とするには、シンチレータと Si-APD 受光部の距離を最短

とすること (厚さ 0.4 mm の樹脂製受光窓を除去) やシンチレータ断面積より APD 受光窓の大きさが同じか大きい必要があった。シンチレーション受光量は検出器パルス波高に影響し、雑音レベルとの比が大きくなると検出効率や時間分解能の悪化を招いた。これらの結果を文献[1]に報告した。

実験 C の計数率は、ビームサイズを $12 \times 1 \text{ mm}^2$ まで広げて計測した。入射ビーム強度が $(1.4 \pm 0.1) \times 10^8 \text{ photons/s}$ のとき、出力計数率 $(8.2 \pm 0.7) \times 10^6 \text{ cps}$ が得られた[2]。直線性は十分であったが 10^4 cps 程度での検出効率が 4% 程度となった。この測定では、パルス増幅器の損傷によるアンプゲインの低下が生じていた可能性がある。

4 まとめ

比例モード Si-APD と市販の鉛添加 (5wt%) プラスチック・シンチレータを使った APD シンチレーション検出器を製作し、高エネルギー X 線用高速検出器としての特性を評価した。BL-14A での実験により時間分解能 (FWHM) 0.5 ns、 10^7 cps に近い計数率が得られており実用化の目処が立ったといえる。今後、パルス波高/雑音レベルの比をさらに上げることや核共鳴散乱での応用を行うための多チャンネル化を行いたい。

参考文献

- [1] K. Inoue and S. Kishimoto, *Nucl. Instr. and Meth.* **A806**, 420 (2016).
 [2] K. Inoue and S. Kishimoto, *AIP Conf. Proc.* **1714**, 040032 (2016).

*syunji.kishimoto@kek.jp

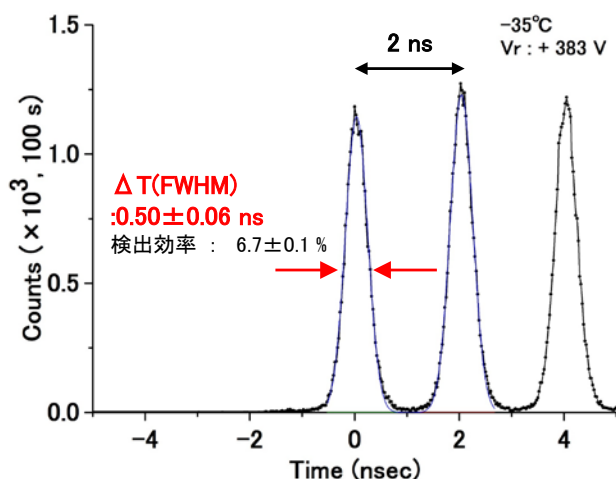


図 2 : PF リング・マルチバンチモード運転時のパルス X 線時間構造。X 線エネルギーは 67.41 keV。Si-APD シンチレーション検出器で測定した。