

次世代 X 線観測機械 (XRPIX) の基本性能の温度依存性とノイズの評価

玉澤 晃希 (東京理科大学大学院 理工学研究科)

Abstract

我々は、次世代の X 線天文衛星に搭載する SOI 技術を用いたイベント駆動型ピクセル検出器である XRPIX(X-ray soiPixel) を開発している。XRPIX は、反同時計測を可能にするために各ピクセルにイベントトリガー出力機能を持ち、ノイズを低減するために CDS(Correlated Double Sampling) 機能を兼ね備え、高い時間分解能 (数 μs) や、X 線の広いエネルギー帯域の観測 (0.5~40 keV) を実現する検出器である。XRPIX は、読み出しノイズ ($\sim 50 e^-$) が大きいため、X 線 CCD と比べるとエネルギー分解能が悪く、読み出しノイズを改善することが最も重要な開発項目の一つである。

まず我々は、ノイズの評価に重点をおいて XRPIX の性能評価を行った。実際に評価に使用した素子は、XRPIX1 と XRPIX2b_CZ の 2 種類で、動作温度を 20°C ~ -70°C と変えながら、ゲイン、エネルギー分解能、読み出しノイズ、リーク電流を測定した。その結果、読み出しノイズ、リーク電流、エネルギー分解能は、いずれも動作温度に依存しており、動作温度を -70°C まで下げることにより、XRPIX1 では、1.08 keV FWHM@5.95 keV(エネルギー分解能)、6.76 $e^-/\text{ms}/\text{pixel}$ (リーク電流)、110 e^- (読み出しノイズ)、XRPIX2b_CZ では、630 eV FWHM@5.95 keV、41.6 $e^-/\text{ms}/\text{pixel}$ 、52 e^- となることが分かった。また、読み出しノイズを、リーク電流起源のノイズと回路起源のノイズに切り分け、回路起源のノイズの評価も行った。解析結果より、回路起源のノイズは、温度の $1/2$ 乗に比例することが分かった。本講演では、XRPIX1 と XRPIX2b_CZ の基本性能の温度依存性の実験結果について報告する。

1 イントロダクション

現在、X 線天文衛星に搭載されている X 線用 CCD は、低ノイズ、高位置分解能と、優れた X 線撮像分光検出器である。ただし X 線 CCD は、時間分解能が数秒と良くなく、パイルアップが生じたり、時間変動の早い天体 (ブラックホールや孤立中性子星など) の観測に向いていないという欠点も存在する。

そこで我々は、X 線 CCD と同程度の位置分解能やエネルギー分解能を持ち、さらに、高い時間分解能 (数 μ 秒) を併せ持つ、次世代の X 線撮像分光器として、SOI 技術を用いた、CMOS X 線イメージセンサー (XRPIX) の開発を行っている。XRPIX は、各ピクセルにトリガー情報出力機能やノイズ低減のための CDS 機能が備わっている検出器である。トリガー情報出力機能により、X 線が入射した周辺のピクセルのみを読み出し、高い時間分解能での観測を可能にする。XRPIX は空乏層が厚く、また高い時間分解能により、反同時計数測定を可能にし、NXB(Non-X-ray-Background) を取り除けるので、広帯域での

観測 (0.5~40keV) が可能になる。

2 XRPIX の概要

XRPIX は、SOI 技術により、読み出し回路部の、低抵抗の Si 回路層と X 線検出部の高抵抗のセンサー層が 1 体型になっている半導体ピクセル検出器であり、センサー層にバックバイアスを印加することによって、空乏層を発生させ、検出器として利用する。ここでは、本実験に使用した二種類の XRPIX、XRPIX1 と XRPIX2b について示す。

2.1 XRPIX1

XRPIX1(X-ray soiPixel 1st) は、ピクセルにトリガー情報出力機能、CDS 機能を搭載した初の X 線天文学用の素子である。

厚さ $260\mu\text{m}$ 、比抵抗 $700\Omega\cdot\text{cm}$ のセンサー層を持ち、 $30.6 \times 30.6 \mu\text{m}^2$ サイズのピクセルが、 $32 \times 32 =$

1024 ピクセル実装されており、チップサイズ $2.4 \times 2.4\text{mm}^2$ (X 線撮像領域 $979.2 \times 979.2\mu\text{m}^2$) の素子である。XRPIX1 は、XRPIX の各種性能試験用に、回路層 (読み出し回路) に組み込まれているトランジスタや、コンデンサーの種類の違いで 4 領域 (一つの領域あたり $16 \times 16 = 256$ ピクセル) に分けられている。本研究では、その中で低温動作に適している Source Tie 型トランジスタと Body Tie 型トランジスタを使用した 44M 領域を使用し評価実験を行った。図 1 に実際の素子の写真と X 線撮像領域のブロック図を示す。

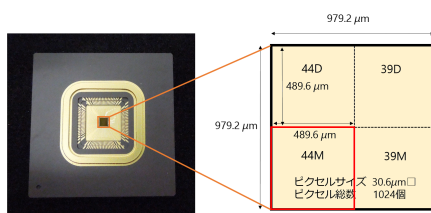


図 1: (左図)XRPIX1 のパッケージ写真。(右図)X 線撮像領域のブロック図、赤色で囲った領域が 44M 領域である。

2.2 XRPIX2b

XRPIX2b は、XRPIX1 に比べ、ピクセル数の増加 (約 20 倍) による X 線撮像領域の拡大、撮像分解能力やノイズ、ゲインなどを向上させた素子で、安定したイベント駆動読み出し¹が行える。

XRPIX2b は、センサー層の比抵抗の違いにより、XRPIX2b_CZ (比抵抗 $1.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)、XRPIX2b_FZ (比抵抗 $5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)、の二種類あり、センサー層の厚みはそれぞれ $250\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ のである。また、回路層のデザインはどちらも同じであり、 $30 \times 30\mu\text{m}^2$ サイズのピクセルが、 $144 \times 144 = 20736$ ピクセル実装されている、チップサイズ $6.0 \times 6.0\text{mm}^2$ (X 線撮像領域 $4.3 \times 4.3\text{mm}^2$)、センサー層の厚さ $250\mu\text{m}$ (CZ)、 $500\mu\text{m}$ (FZ) の素子である。

¹1 ピクセルずつ順番に読み出し、全ピクセルを読み出すのではなく、X 線が入射してきたピクセルのみを読み出すこと

3 実験環境と実験結果

3.1 実験環境

XRPIX は、X 線が入射していない時でも、リーク電流に起因して、常に一定の出力が存在する。そのため、XRPIX のゲイン、エネルギー分解能、読み出しノイズ、リーク電流などの基本性能の温度依存性を調べるために、XRPIX の動作温度を変えながら、X 線を照射した場合と、照射しない場合の素子の評価を行った。図 2 に、実験システムを示す。また今回の実験は、動作温度を $20\text{ }^\circ\text{C} \sim -70\text{ }^\circ\text{C}$ の範囲で行っている。

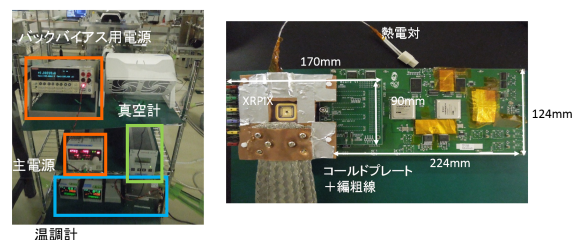


図 2: (左図) 実験システム。(右図)XRPIX1 と、読み出しボードの写真。素子には、冷却するためコールドプレートが設置されており、コールドプレートの温度を動作温度とする。測定中の真空層内の真空度は、 10^{-6}hp 程度。素子を $20\text{ }^\circ\text{C} \sim -70\text{ }^\circ\text{C}$ 程度まで、冷却することができる。

3.2 XRPIX の評価実験

3.2.1 ゲインとエネルギー分解能の温度依存性

XRPIX のゲイン、エネルギー分解能を評価するため、素子に放射性同位体である ^{55}Fe からの X 線を照射し、実験を行った。今回は、イベント駆動読み出しではなく、一定時間露光を行った後、順番にピクセルを読み出す、フレーム読み出しという方法を用いた。以下の測定は、バックバイアス 5V で、温度を $20\text{ }^\circ\text{C} \sim -70\text{ }^\circ\text{C}$ まで変更して行った。図 3 に取得したエネルギースペクトルを示す。

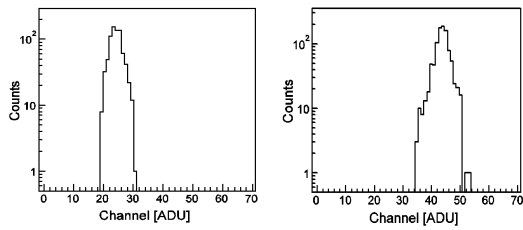


図 3: (左図) 動作温度-53 °C時に XRPIX1 で取得した ^{55}Fe の Mn-K α と Mn-K β スペクトル。(右図) 動作温度-70 °C時に XRPIX2b_CZ で取得した ^{55}Fe の Mn-K α スペクトル。XRPIX1 と XRPIX2b_CZ でゲインが異なるため、右図と左図でピークの位置がずれている。

図3より、XRPIX1、XRPIX2b_CZ両方とも、Mn-K α とMn-K β が重なっていた。以下、Mn-K α とMn-K β を合わせてK輝線と呼ぶ。エネルギースペクトルの中心値、幅、高さを求めるために、エネルギースペクトルのピークを一個のガウス関数で近似し、フィッティングを行った。算出した中心値と幅から、ゲイン (G [$\mu\text{V}/e^-$]) とエネルギー分解能 (FWHM [keV]) は以下の式のように与えられる。

$$G = \frac{\text{中心値}}{5.895} \times 244 \times W_{\text{Si}} \quad (1)$$

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \times \text{幅} \div G \times 244 \times W_{\text{Si}} \quad (2)$$

1 ADU は 244 [$\mu\text{V}/e^-$]、 W_{Si} は、Si の平均電離エネルギーで、3.65 [eV/e^-] である。

(1)、(2) 式から算出した、ゲインとエネルギー分解能の温度依存性結果を図 4、5 に示す。

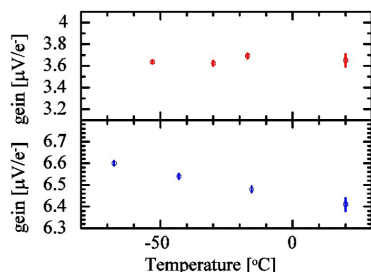


図 4: (上段)XRPIX1 のゲインの温度依存性結果。(下段)XRPIX2b_CZ のゲインの温度依存性結果。

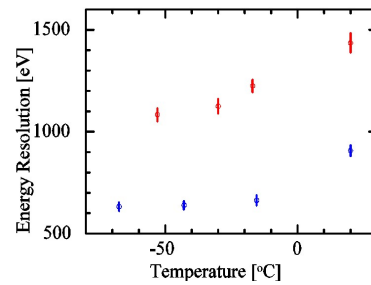


図 5: ^{55}Fe の K 輝線のエネルギー分解能の温度依存性結果。赤色、XRPIX1、青色、XRPIX2b_CZ のデータ。

図 4 より、XRPIX1 のゲインは温度に寄らず一定であり、XRPIX2b のゲインは、動作温度を下げることで、増加することが分かった。また、図 5 より、エネルギー分解能は、XRPIX1、XRPIX2b_CZ 両方とも、動作温度が低くなると、指数関数的に減少することが分かった。

3.2.2 読み出しノイズとリーク電流の温度依存性

XRPIX の読み出しノイズ、リーク電流を評価するため、X 線を照射しない状態での素子の出力を調べた。図 6、7 に読み出しノイズとリーク電流の温度依存性結果を示す。

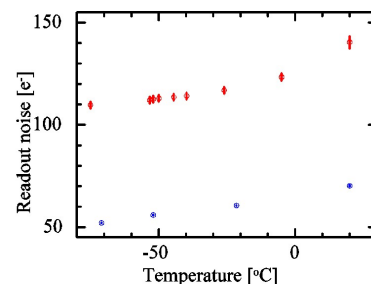


図 6: (左図) 読み出しノイズの温度依存性結果。赤色、XRPIX1、青色、XRPIX2b_CZ のデータ。

図 6、図 7 より、読み出しノイズ、リーク電流ともに、温度依存性があることが分かり、リーク電流は、動作温度を下げることで、指数関数的に減少することが分かった。

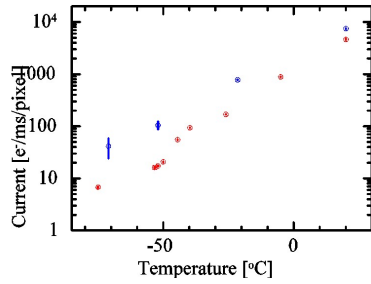


図 7: リーク電流の温度依存性結果。赤色、XRPIX1、青色、XRPIX2b.CZ のデータ。

3.3 回路起源のノイズ評価

読み出しノイズ N は、リーク電流起源のノイズ σ_I と回路起源のノイズ σ_{circuit} から構成されており、(3) 式のように表すことができる。

$$N = \sqrt{\sigma_{\text{circuit}}^2 + \sigma_I^2 \times T} \quad (3)$$

T は露光時間である。さらに、(3) 式を式変形することで、(4) 式を得ることができる。

$$\sigma_{\text{circuit}}^2 = N^2 - \sigma_I^2 \times T \quad (4)$$

従って、(4) 式に、読み出しノイズと、リーク電流を代入することで、回路起源ノイズを見積もることができる。図 8 に (4) 式、図 6、7 から算出した回路起源のノイズの温度依存性結果を示す。

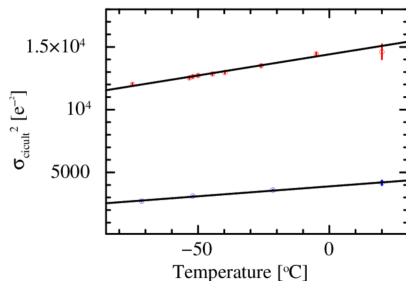


図 8: 回路起源ノイズの温度依存性。赤色、XRPIX1、青色、XRPIX2b.CZ のデータ。図中の黒線は、一次関数で近似したモデルの線である。

図 8 より、回路起源のノイズの二乗の値 ($\sigma_{\text{circuit}}^2$) は動作温度に比例することが分かった。表 1 にフィッティング結果を示す。

表 1: フィッティング結果

	傾き	切片
XRPIX1	31.5 ± 5.0	$(1.43 \pm 0.03) \times 10^4$
XRPIX2b.CZ	15.8 ± 0.2	$(3.89 \pm 0.07) \times 10^3$

4 まとめ

今回我々は、XRPIX1 と XRPIX2b.CZ の基本性能の温度依存性を調べた。動作温度を下げることで、読み出しノイズ、リーク電流、エネルギー分解能の値が減少することが分かった。また、エネルギー分解能の値が、XRPIX1 では、 -40°C 、XRPIX2b では、 -20°C 以下で一定の値を示したので、XRPIX1 は、 -40°C 、XRPIX2b は、 -20°C が最適動作温度である。

また、読み出しノイズをリーク電流起源のノイズと回路起源のノイズに切り分け評価し、回路起源のノイズが、動作温度の $1/2$ 乗に比例することが分かった。

Reference

- S.G. Ryu et al., *First Performance Evaluation of an X-ray SOI Pixel Sensor for Imaging Spectroscopy and Intra-Pixel Trigger*, *IEEE TNS* **58**, 2528-2536, (2011).
- A. Takeda et al., *Design and Evaluation of an SOI Pixel Sensor for Trigger-Driven X-Ray Readout*, *IEEE TNS* **60**, 586-591 (2013).
- A. Takeda et al., *Development and Evaluation of Event-Driven SOI Pixel Detector for X-Ray Astronomy*, *NIM A* submitted (2014).
- 中島真也, SOI 技術を用いた広帯域 X 線撮像分光器「XRPIX1」の評価試験と性能向上の研究, 京都大学, 2011, 修士論文.
- 松村英晃, 宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における電荷収集効率の改善, 京都大学, 2015, 修士論文.