

宇宙 X 線観測に向けた次世代撮像分光器 SOIPIX の開発

松村 英晃 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々は、宇宙 X 線観測に向けた次世代撮像分光器として Silicon-On-Insulator(SOI) 技術を用いた Si CMOS センサー (以降、SOIPIX) を開発している。我々が開発してきた SOIPIX は XRPIX と呼ばれるシリーズで、各ピクセルにセルフトリガー機能を持ち、X 線が入射したピクセルだけを読み出すことで高い時間分解能 ($\sim \mu\text{s}$) を達成できる。これによりアクティブシールドを導入することが可能となり、宇宙線による非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background: NXB) を大幅に減らし、広いエネルギー帯域観測 (0.5–40 keV) が実現できる。これまでに、試作機として XRPIX1、XRPIX1b を製作し、基本性能を確認した。そして 2012 年、従来より 10 倍高い比抵抗を持つ Floating Zone (FZ) ウェハを検出部に用いた表面照射型の素子、XRPIX1b-FZ を制作した。X 線照射試験の結果、500 μm の完全空乏化を確認するとともに、エネルギー分解能は 14 keV の X 線に対して 7.4% FWHM、ゲインは $5.9 \mu\text{V}/\text{e}^-$ を達成した。また、裏面照射型の素子も現在開発中である。本講演ではこれらの性能試験の結果について発表する。

1 序論

現在、X 線天文衛星の主流検出器である X 線 Charge Coupled Devices (CCD) カメラはエネルギー分解能 (2% FWHM @ 6 keV) と空間分解能 (20 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) で優れた性能をもっているが、電荷転送しながら読み出すその構造上、時間分解能は数秒ほどしかない。また、観測可能なエネルギー帯域も NXB により制限され、0.5–10 keV にとどまっている。

我々は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同で、SOI 技術を用いた Si CMOS センサーである SOIPIX の開発を進めている。SOIPIX は、同じピクセル型の Si 検出器として、CCD と同様に高いエネルギー分解能、高い空間分解能が期待できる。さらにトリガー機能を備えているため、読み出し速度は数 μs と格段に向上する。この読み出し速度の向上により、検出器の周囲をアクティブシールドで囲むことで、検出器からの信号と反同時係数を実現できる。これにより、NXB の大幅な除去が可能となり、観測できるエネルギー帯域は 0.5–40 keV に広がる。2009 年、我々は KEK が開発した電荷積分型 SOIPIX である INTPIX2、INTPIX3 の X 線照射試験を行い、SOIPIX の基本的な特性を研究した。そしてその経験をもとに、初の X 線天文学用 SOIPIX とし

て XRPIX1 を製作、基本性能を確認したのち、寄生容量を大きく下げた XRPIX1b を製作した。XRPIX1b は各ピクセルに読み出し回路とトリガー機能を備えた CMOS センサーを用いているため、読み出し速度は数 μs と格段に向上する。

2012 年には、比抵抗が 10 倍高い FZ ウェハ ($\rho \sim 7 \text{ k}\Omega \text{ cm}$) を用いた素子、XRPIX1b-FZ を開発した。2013 年には、低エネルギー X 線 ($\lesssim 1 \text{ keV}$) の検出に焦点をあてた、完全空乏化を実現した裏面照射型素子も開発中である。

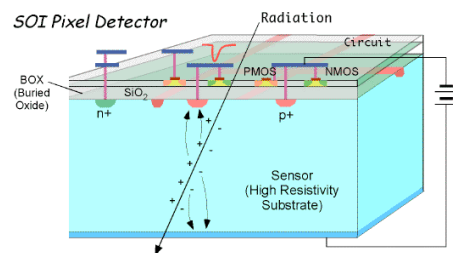


図 1: SOIPIX 検出器の構造

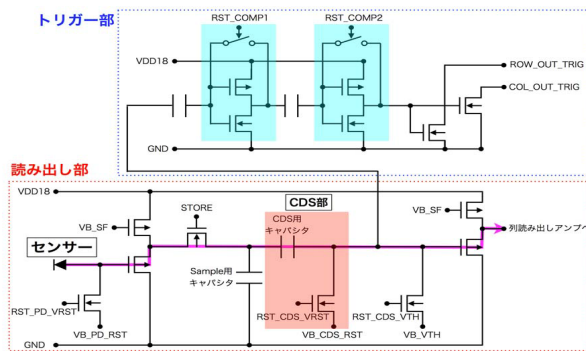


図 2: XRPIX1b 内の読み出し回路とトリガー回路



図 3: 読み出しボード

2 XRPIX1b-FZ の仕様

XRPIX1b-FZ は、一つのピクセルサイズは $30.6 \mu\text{m}$ 角であり、全部で $32 \times 32 = 1024$ 個のピクセルがある。厚みは $500 \mu\text{m}$ で、比抵抗が $7 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ の Si ウェハ (FZ ウェハ) を用いている。

XRPIX1b-FZ の回路図を図 2 に示す。センサー部の電圧はソースフォロワーを介して Sample キャパシタに蓄積される。リセットノイズを抑制するための Correlated Double Sampling (CDS) 回路を通したのち読み出しアンプへと転送される。トリガー信号を生成するための回路も搭載されている。この回路では波高値がある基準電圧を超えたピクセルがあるかどうかを判定する。また、どのピクセルにヒットがあったかヒットパターン信号も生成する。

セラミックパッケージにワイヤーボンディングした素子を読み出しボードに搭載し、試験を行った。読み出しボードに搭載された FPGA で素子の制御並びにデータ処理を行う。素子から出力される波高値は ADC でデジタル変換され、イーサネットを通じて計算機に転送される。

3 XRPIX1b-FZ の性能試験とその結果

XRPIX1b-FZ のゲイン、エネルギー分解能、空乏層厚などの基本性能を評価を行った。今回は、トリ

ガー機能は用いずに、一定時間露光を行った後、1 ピクセルずつ順番に読み出すフレーム読み出しをと呼ばれる方法で測定を行った。以下の測定はすべて常温 (25°C) で行った。

XRPIX1b-FZ は X 線が入射していないときでも、リセット電圧やリーク電流に起因して、各ピクセルごとに固有の出力がある。これをペDESTAL と呼ぶ。このペDESTAL を評価するために各ピクセルごとの X 線が入射していないときの出力値の平均値を計算した。そして、これを生の出力から差し引いた。

X 線が入射して発生した電荷が複数のピクセルにまたがるようなイベントをマルチピクセルイベントという。入射した X 線の持つエネルギーを正しく求めるには、マルチピクセルイベントを識別し、複数のピクセルからの出力を足し合わせる必要がある。空乏層の深い位置で X 線が光電吸収された場合、読み出し回路への入力に到達するまでに、発生した電荷の広がりが大きくなってしまふ。XRPIX1b-FZ では、完全空乏したときの空乏層が $500 \mu\text{m}$ と厚いためマルチピクセルの影響は大きくなると考えられる。

マルチピクセルイベントを補正するために、以下のような解析を行った。まず、あるピクセルに着目する。そのピクセルがあらかじめ設定したイベント閾値よりも大きく、かつ、隣り合った周囲 8 ピクセルの出力値よりも大きいイベントを抽出する。次に、周囲 8 ピクセルの出力値が全てがあらかじめ設定したスプリット閾値よりも小さいとき、これを“シン

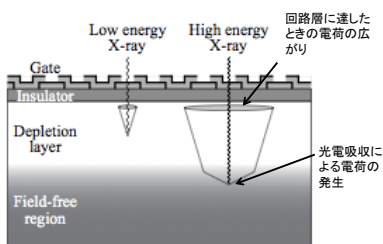


図 4: 電荷の移動距離と広がり

“ダブルイベント”とする。このようなイベントは、電荷の広がりが1つのピクセル内に収まったものだと考えられる。よって、中心ピクセルの出力値のみを使う。抽出したイベントに隣り合う上下左右のピクセルのうち、どれか一つのみがスプリット閾値よりも大きいとき、これを“ダブルピクセルイベント”とする。これは電荷が広がり、2つのピクセルにまたがった場合に対応する。よって、中心ピクセルとスプリット閾値を超えたピクセルの合計の出力を出力値とする。上の二つに判定されなかったイベントはその他のイベントとされる。三つ以上のピクセルにまたがるマルチピクセルイベントも存在するため、本来はこのようなイベントも判定しデータとして使用すべきである。しかし今は読み出しノイズが大きく、三つ以上のピクセルを足し合わせると分解能が悪くなるため、今回の解析には含めていない。

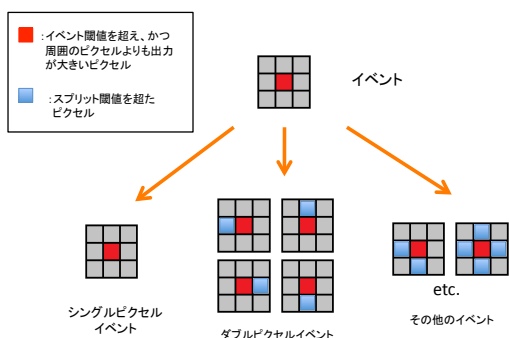


図 5: マルチピクセルイベントの判定方法

線源 ^{241}Am からの X 線を照射して得られたスペクトルを図 6 に示す。14.0 keV、17.7 keV、20.8 keV

の輝線を分離して検出することができた。シングルピクセルイベントによるスペクトルについて、各輝線をガウシアンでフィッティングし、エネルギー分解能を求めたところ、14.0 keV、17.7 keV、20.8 keV の輝線に対してそれぞれ FWHM で 7.42%、8.16%、8.17% であった。

ガウシアンフィッティングで求めた各輝線の中心チャンネルと輝線のエネルギーの関係を図 7 に示す。各点を直線でフィッティングし、その傾きが 6.6 ADU/keV と求まった。1 ADU あたり 244 μV 、Si 内でのイオン化エネルギーは 3.65 eV/e⁻ であるので、XRPIX1b-FZ のゲインは 5.9 $\mu\text{V}/e^-$ となる。

次に線源を変えて ^{109}Cd からの X 線 (22.1 keV) を用いて X 線カウント数の逆バイアス依存性を調べた。逆バイアス値を、20 V、40 V、... 260 V と変化させて測定を行った結果を図 8 に示す。逆バイアスが 200 V 以上でカウント数が一定となっている。この結果から、逆バイアス 200 V で素子が完全空乏したと考えられる。

4 今後の素子開発

今回の性能試験で用いた素子は、表面照射型素子である。回路層の厚みが $\sim 10 \mu\text{m}$ であるため、 $\sim 1 \text{ keV}$ 以下の X 線は回路層で吸収され空乏層へ達することができない。そこで我々は回路層がある表面からではなく、反対側の裏面から X 線を入射する裏面照射型素子を開発中である。この素子での測定結果も本講演で発表する予定である。

Reference

S. Nakashima, S. G. Ryu, T. G. Tsuru, A. Takeda, Y. Arai, T. Miyoshi, R. Ichimiya, Y. Ikemoto, T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata, “Progress in Development of Monolithic Active Detector for X-ray Astronomy with SOI CMOS Technology”, Physics Procedia, Vol. 37, pp 1373 – 1380, 2012.

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.

劉周強.SOI 技術を用いた次世代における広帯域 X 線撮像分光検出器の開発および評価試験. 京都大学,2010, 修士論文.

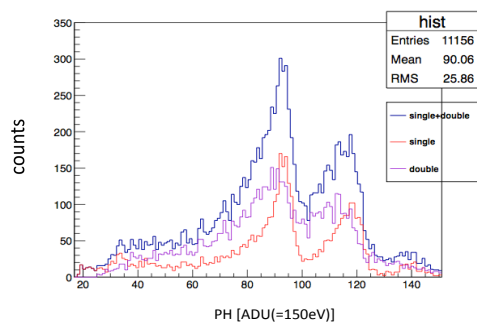


図 6: XRPIX1b-FZ で得られた ^{241}Am の X 線スペクトル。赤線：シングルピクセルイベント、紫線：ダブルピクセルイベント、青線：シングル+ダブル

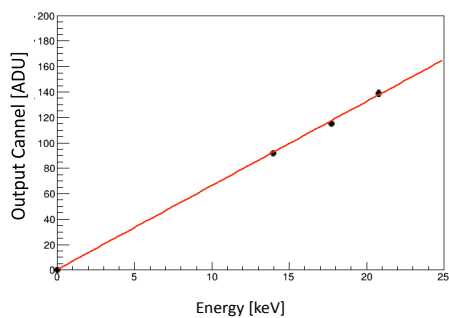


図 7: XRPIX1b-FZ における出力チャンネルと X 線のエネルギーの関係

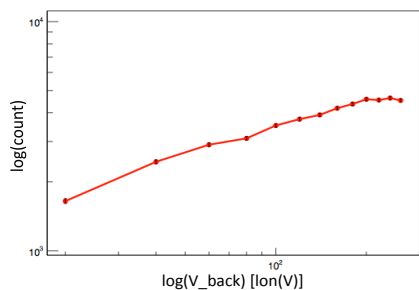


図 8: ^{109}Cd の X 線カウント数の逆バイアス依存性