

X 線観測用 SOI ピクセル検出器における裏面照射での軟 X 線性能の評価

伊藤 真音 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

私たちは、次期 X 線天文衛星に搭載をする次世代の撮像分光器として Silicon On Insulator (SOI 技術) を用いた、SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。この素子は時間分解能が数 μ 秒であるので、激しい時間変動の天体現象の観測が可能である。また、非同時計測法を用いることで、10 keV 以上の非 X 線バックグラウンドを下げるのが可能となり、0.5-40 keV とした広帯域での撮像分光を行うことができる。XRPIX の表面には 10 μ m 程度の回路層が存在するため、表面照射型の観測方法では低エネルギーの X 線観測が不可能である。そこで、不感層厚が薄い裏面照射型の XRPIX の開発を開始した。LBNL によって開発された「Pizza process」と呼ばれる方法で処理された素子に裏面から X 線照射試験を行ったところ、裏面での不感層の厚みが $2.0^{+1.1}_{-0.6}$ μ m 程度存在することがわかった。本公演ではその結果を中心に、裏面照射での軟 X 線性能について述べる。

1 Introduction

現在、X 線天文衛星の標準的な検出器である Charge Coupled Device (CCD) は、エネルギー分解能 (~ 130 eV in FWHM at 6 keV) と空間分解能 (20 μ m/pixel) で優れた性能を持っている。[1] しかし、電荷転送をしながら読み出すという構造のため、時間分解能が数秒程度しかなく、ミリ秒パルサーやブラックホールなどの短い時間変動の天体現象を観測することが不可能である。また、10 keV 以上の領域において非 X 線バックグラウンドが占有的であるため、観測可能なエネルギー帯域が 0.5-10 keV に制限される。

そこで、私たちは、Silicon On Insulator (SOI 技術) を用いた検出部・読み出し回路一体型のピクセル検出器である「XRPIX」を開発している。[2] XRPIX は各ピクセルに X 線が入射したタイミングを判定するトリガー機能を備えているため、X 線が入射したピクセルのみを読み出すことができ、高い時間分解能 (~ 10 μ s) を達成することができる。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によって、検出器からの信号と反同時計数を実現できる。これにより、非 X 線バックグラウンドの大幅な除去が可能となり、観測可能なエネルギー帯域は 0.5-40 keV にまで広がる。

XRPIX は CMOS 回路用の低比抵抗の Si 回路層、

高比抵抗の Si センサー層、2つの層の間にある buried oxide (BOX) 層の 3 層構成である。各々のピクセルには回路層とセンサー層を結びつけるセンスノード (p^+) があり、センサー層で集められた電荷は回路層に運ばれる。また、CMOS 回路におけるバックゲート効果を抑制するため、センサー層にはセンスノードとつながる形状で薄い p 層 (Buried P-Well, BPW) が形成されている。

しかし、このように XRPIX の表面には 10 μ m 程度の回路層が存在しているため、表面照射型では低エネルギーの X 線を検出することは難しい。そこで、私たちは不感層が 1 μ m 以下を達成するような XRPIX の開発を開始した。それにより、観測可能なエネルギー帯域の下限は 0.5 keV を達成できる。そのような素子の 1 つに、LBNL によって開発された「Pizza process」[3] で処理された XRPIX (XRPIX2b-CZ-Pizza) がある。今回、XRPIX2b-CZ-Pizza に軟 X 線を裏面から照射し、その性能評価をした。

2 XRPIX2b-CZ-Pizza の仕様

XRPIX2b-CZ-Pizza は各ピクセルサイズが 30 μ m 角で、全部で 152 \times 152 のピクセルを有する。また、回路層の厚みが 10 μ m 程度、センサー層の厚みが 62 μ m であり、比抵抗が 1 k Ω cm の Si ウェハ (CZ ウェ

ハー) を用いている。図 1 は XRPIX2b-CZ-Pizza の断面図を示している。

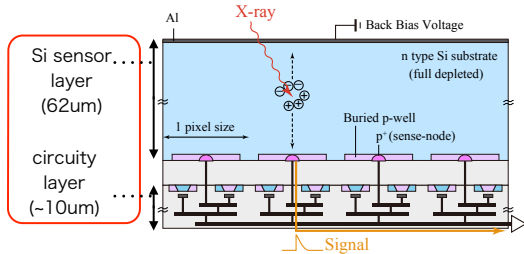


図 1: XRPIX2b-CZ-Pizza の断面図

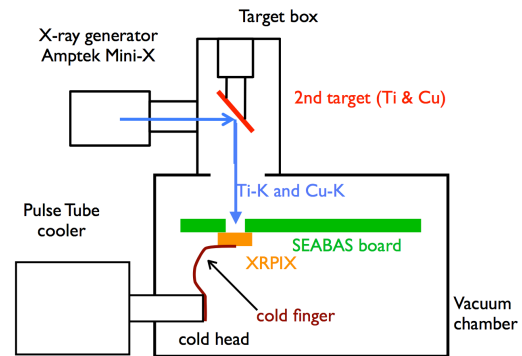


図 2: 実験模式図

3 実験セットアップ

本実験は XRPIX2b-CZ-Pizza に X 線発生装置 (Amptek mini-X) で発生させた Ti-K と Cu-K 特性 X 線を裏面から同時に照射するとにより、スペクトルを取得し、軟 X 線性能をみるのが目的である。図 2 はその実験模式図である。素子と SEABAS (Soi EvAluation BoArd with Sitcp) ボード [4] を真空チャンバーの中に入れ、真空を引き、素子を $-40^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷した。そして、バックバイアスを変えながら Ti-K と Cu-K 特性 X 線を照射し、スペクトルを取得した。素子と SEABAS ボードは図 3 のように接続されており、SEABAS ボードに搭載してある 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。

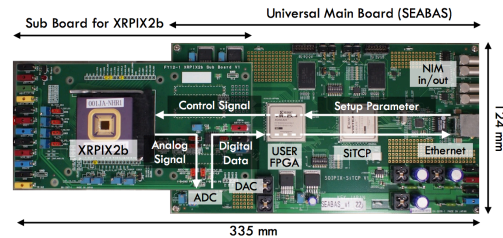


図 3: 素子と SEABAS ボード

また、上記と同じチャンバー内に Silicon Drift Detector (Amptek XR-100) を入れて真空を引き、Ti-K と Cu-K 特性 X 線を同様に同時照射した。得られたスペクトルが図 4 である。Ti-K α (4.51 keV)、Ti-K β (4.93 keV)、Cu-K α (8.04 keV)、Ti-K β (8.90 keV) が見て取ることのできる。

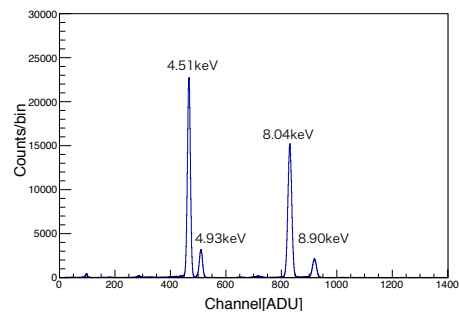


図 4: SDD で得られた Ti と Cu のスペクトル

4 XRPIX2b-CZ-Pizza の性能試験とその結果

4.1 試験内容とその解析

XRPIX2b-CZ-Pizza は逆バイアスを 20V、30V、35V、40V、50V、60V、70V と変え、それぞれの電圧で、一定時間 (今回は 1msec) 露光をおこなった後、1 ピクセルずつ順番に読み出すフレーム読み出しと呼ばれる方法で測定をおこなった。フレーム数は 30

このスペクトルと SDD の QE (quantum efficiency) (<http://www.amptek.com/products/xr-100sdd-silicon-drift-detector/>) をもちいて、Ti と Cu の強度比を算出した。XRPIX2b-CZ-Pizza でも強度比を求め、それらを用いることで裏面における不感層厚を見積もった。

万で、有効な露光時間は 300 秒である。そのデータの解析は Ryu et al. IEEE TNS 58, 2528 (2011) に沿って行った。

4.2 XRPIX2b-CZ-Pizza のスペクトル性能

逆バイアスが 20V、40V、70V のときに得られたスペクトルを図 5 に示す。X 線が入射したときに出来る電荷は読み出し回路に移動するまでに広がり、複数のピクセルにまたがるようなイベントを生じることがある。これらをマルチピクセルイベントと呼び、赤は 1 つのピクセルのみのシングルピクセルイベント、青は隣り合った二つのピクセルで共有しているようなイベントである、ダブルピクセルイベントのスペクトルを示している。[5] 逆バイアスが増加するにつれて、Ti のカウント数が増加していることが見て取れる。また、これらのシングルピクセルイベントを見ると、Ti の $K\alpha$ と $K\beta$ は分離できていないが、Cu の $K\alpha$ と $K\beta$ は分離できていることがわかる。

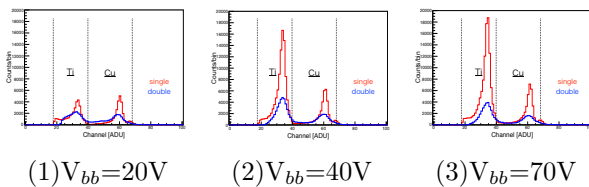


図 5: 逆バイアスが 20V、40V、70V のときの XRPIX2b-CZ-Pizza のスペクトル

4.3 不感層厚の見積もり

Ti-K と Cu-K のカウント比を用いることで不感層厚を見積もった。図 5 の縦点線のように Ti と Cu の ROI (region of interest) を選び積分してカウント数を算出した。それにより求めたカウント比は図 6 である。(カウントはシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントの合計である。) 逆バイアスが 40V 以上になると、カウント比がほぼ一定になっていることがわかる。XRPIX2b-CZ-Pizza と SDD により求めたカウント比を用いて算出した不感層厚は

図 7 である。逆バイアスの上昇とともに不感層厚が薄くなるが、40V 以上はほぼ一定になり、その厚みは $2.0^{+1.1}_{-0.6} \mu\text{m}$ であることがわかった。(ここでのエラーバーは ROI の選び方による系統誤差を含む)

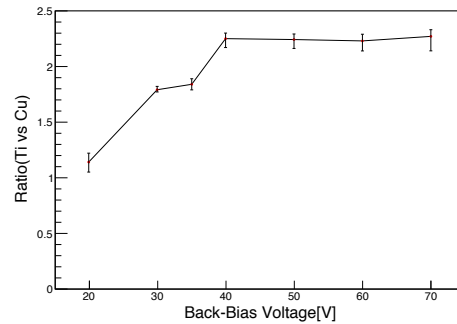


図 6: Ti と Cu のカウント比

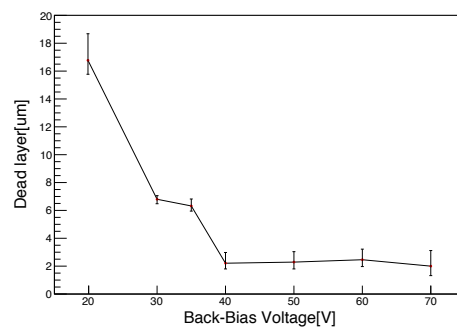


図 7: 逆バイアスに対する不感層厚

5 今後の素子開発

今回の実験で性能評価した XRPIX2b-CZ-Pizza は裏面照射に対応するよう処理された素子であり、結果として裏面に存在する不感層厚が $2.0^{+1.1}_{-0.6} \mu\text{m}$ であることがわかった。しかし、今回の実験では完全に Ti と Cu の切り離しができていない。したがって、今後は Al といった低エネルギーの特性 X 線をつかって実験の精度を上げ、軟 X 線に対する裏面照射の特性理解に努める。

6 Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- [1] K. Koyama et al., 2007, X-Ray Imaging Spectrometers (XIS) on Board Suzaku, Publication of the Astronomical Society of Japan, 59, S22 .
 - [2] Y. Arai et al., 2011, Development of SOI Pixel Process Technology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 636, S31.
 - [3] M. Battaglia et al., 2012, Characterisation of a Thin Fully Depleted SOI Pixel Sensor with Soft X-ray Radiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 674, 51-54.
 - [4] T. Uchida, 2008, Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet, IEEE Transactions on Nuclear Science, 55, 3, 1631.
 - [5] Ryu et al., 2011, First Performance Evaluation of an X-Ray SOI Pixel Sensor for Imaging Spectroscopy and Intra-Pixel Trigger, IEEE Transactions on Nuclear Science 58, 2528.
- 中島真也 京都大学 修士論文, 2010, SOI 技術を用いた広帯域 X 線撮像分光器「XR-PIX1」の評価試験と性能向上の研究.
- 松村英晃 京都大学 修士論文, 2015, 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.