

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340047

研究課題名(和文) 超低バックグラウンドを実現するAD変換器一体型の広帯域X線SOI撮像分光器の開発

研究課題名(英文) Development of low-background, wide-band and ADC integrated SOI X-ray sensor

研究代表者

鶴剛 (Tsuru, Takeshi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10243007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：「非熱的宇宙」を解明するには非X線バックグラウンドを下げる必要がある。そこで各ピクセルにイベント駆動読み出し機能を持つX線SOIPIXを開発する。

本研究で開発した4つのSOIPIX素子の最大のは6mm角である。厚み500 μ mの完全空乏、フレーム読み出しモードで6 keVでのエネルギー分解能320eV (FWHM)、読み出しノイズ35e (rms)を達成、Mn-K とK の分離した。ピクセル内回路がセンサー内部の電場を乱し、電荷収集効率を減らすことがわかった。ピクセル回路の配置を変更し、解決した。時間分解能10 μ 秒、スループット1kHzでのイベント駆動読み出しに成功した。

研究成果の概要(英文)：We develop monolithic active pixel sensors, X-ray SOIPIXs, based on the SOI technology for next-generation X-ray astronomy satellites. In order to reduce the non-X-ray background dominating above 5-10 keV using the anti-coincidence technique, we develop the event trigger output function implemented in each pixel.

In this study, we developed 4 sensors. The largest chip has the size of 6mm. We successfully produced a fully depleted layer with a thickness of 500 μ m. We also achieved an energy resolution of 320 eV (FWHM) at 6 keV and a read-out noise of 35e- (rms) in the frame readout mode, which allows us to clearly resolve Mn-K and K. We found in-pixel circuitries disturb the electric fields in the sensor and degrade the charge collection efficiency. We successfully solved the problem by changing the location of the in-pixel circuitries. The event-driven readout mode was successfully demonstrated with the time resolution of 10 μ sec and the throughput of 1kHz.

研究分野：数物系科学

キーワード：X線天文学 宇宙物理 X線 検出器 SOI

1. 研究開始当初の背景

最新の高エネルギー宇宙観測は、宇宙の構造形成過程で起こる高温プラズマ同士の衝突が、熱平衡から外れた天体や高エネルギー粒子(宇宙線)の「非熱的宇宙」を産み出すことを明らかにした。それを端的に示すのが、「すぎく」による天の川銀河中心領域の拡散X線放射の観測結果である。申請者はベキ関数型連続成分と中性輝線の非熱的成分を検出し、熱的プラズマの熱制動放射と電離輝線と匹敵する光度を持つことを明らかにした。非熱的宇宙には、想像以上の大きなエネルギーが集中している可能性が高まった。

その探査には、元となる熱的プラズマ成分(軟X線=10keV以下で卓越)と非熱的放射(硬X線=10keV以上で卓越)の両方を同時にカバーする広エネルギー帯域・精密撮像・精密分光観測が必要である。しかし、それを実現するX線検出器は存在しない。「すぎく」等が搭載するX線CCDやドイツのDEPFETは非X線バックグラウンドが高く、ASTRO-Hに搭載する両面シリコンストリップやCdTe/CdZnTeピクセル検出器は分光性能が低い上に、軟X線の観測が不可能である。

2. 研究の目的

その状況を打破するため申請者は、平成20年度よりSOI(Silicon-On-Insulator)と呼ぶ新しい半導体技術を用いた新型のX線SOIピクセル検出器(以下、SOIPIX)の開発を開始した。その最終ゴールは、(1)精密分光(6keVのX線に対し分解能140eV以下)、(2)精密撮像(1秒角)、(3)広エネルギー帯域(0.3-40keV)、(4)低バックグラウンド(20keVのX線で 5×10^{-5} c/s/keV/10mm角以下)、を実現することである。さらに、(5)アナログ・デジタル変換回路(以下、AD変換回路)などのインテリジェント機能回路を素子内部に組み込み、システム全体の単純化・信頼性と耐ノイズ性能を向上させる。

3. 研究の方法

広帯域、超低バックグラウンド、精密撮

像、精密分光性能を備え、内部にアナログ・デジタル変換回路を持つAD変換器一体型X線SOIピクセル検出器を実現することが、本研究の最終ゴールである。平成20年から2年半のパイロット研究から技術的な困難がないことを確認した。それを受けて、本研究では衛星搭載品に向けた本格的開発を開始する。具体的内容は下記の通りである。

- パイロット研究で空乏層厚み110 μ mに到達した。本研究では300 μ m以上の完全空乏層と裏面照射型を同時に実現し、広いエネルギー帯域(0.3-40keV)に渡って高い感度を得る。
- 1mm角のSOIPIX素子とAD変換回路素子のそれぞれをパイロット研究で開発した。本研究ではこの両者を1つの素子の中に持つ一体型SOIPIXを開発する。素子内部で微弱な信号電荷をデジタル信号に変換することで、システム全体の簡素化と耐ノイズ性能の向上を実現する
- パイロット研究で実現したヒット出力機能とアクティブシールドを組み合わせた反同時計数により、超低バックグラウンド性能を実証する(20keV X線で 5×10^{-5} c/s/keV/10mm角以下)。
- 中型素子(5mm角)を試作することで、素子の大型化に伴う問題の特定と解決をする。

4. 研究成果

本予算の4年間で私達は4個のテスト素子を開発した。一気に大きな素子を作るのではなく、低コストの小さな素子(チップサイズ2.4mm \square -6.0mm \square)として製作し、出来るだけ高い頻度でフィードバックを掛ける事している。本予算で作成した6mm角素子を図1に示す。この素子は図の左と下だけにボンディングパッドを持つ、2サイドバタブル型である。

硬X線に対する感度は、空乏層の厚みで決まる。そのためには比抵抗の高い素材が必要である。Floating Zoneと呼ばれる手法で製造した高比抵抗シリコンウェハを用い、バックバイアス200Vを引火することで500 μ mの厚い空乏層と完全空乏は達成した[5,10]。

分光性能の開発は、まずCCDと同様に全ピクセルを読み出す「フレーム読み出しモード」で進めている。動作が単純でピクセル回路内部の干渉の問題が少ないからである。当初は開発当初はCd-109を照射し、22keV X線とおぼしき「肩」をヒストグラムに見いだすレベルであった。その後、読み出しノードの寄生容量を減らす、各ピクセルに電荷有感アンプを組み込む等の努力を行い、性能を向上させることに成功した[4,6,7,9,10,13]。最新の素子であるXRPIX3bでは読み出しノイズは33e-(rms)、エネルギー分解能320eV (6keV X線に対するFWHM)を達成し、Fe-55のMn-K α とK β の分離に成功した(図2)[9]。

寄生容量を下げることでゲインはあがるが、その一方でデルタ関数的なX線を入射した際に、ガウス関数的なヒストグラムに加えテールを引き、スペクトルのクオリティが下がることがわかった。SPRING-8でのビームテストを行なったところ、電荷収集効率や検出感度がサブピクセルレベルで付記何時であることがわかった。詳しい検討からこれは回路層の回路素子がセンサー層の電場を乱していることが原因であることがわかった。そこで、回路の配置を見直したところ、この問題を解決することに成功した。

本命のイベント駆動読み出しについても、駆動に成功した。既に10 μ 秒の時間分解能と、1kHz以上の高レート検出を既に達成している[8]。これによりアクティブシールドによる低バックグラウンドは原理的に達成できると考えている。常温の蛍光灯下でAm-241からの10-30keVの多数のX線を4本の分解し、60keV X線も検出できている。試験に使用した素子は電荷有感アンプを搭載していない1世代前なので、エネルギー分解能は1keVである。様々な試験から、イベント駆動時に配線や回路素子の間で干渉が起こっている事を確認した[11]。問題点に対する対処の方法を現在検討中であり、今後の素子で、改善を行いたいと考えている。

5. 主な発表論文等（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）（多数あるので査読有のみに限る）

1. Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-Driven Readout, A.Takeda, T.G.Tsuru (15名2番目), Y.Arai, 2014, PoS, Accepted, 査読有
2. Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX, H.Matsumura, T.G.Tsuru (8名中2番目), Y.Arai, 2014, NIM A, 765, 183-186, 査読有
3. Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-driven Readout, A.Takeda, T.G.Tsuru (8名中5番目), Y.Arai, 2013, IEEE TNS, 60, 586-591
4. Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-Driven Readout, A.Takeda, T.G.Tsuru (8名中5番目), Y.Arai, 2013, IEEE TNS 60, 586-591, 査読有
5. Development and characterization of the latest X-ray SOI pixel sensor for a future astronomical mission, S.Nakashima, T.G.Tsuru(9名中4番目), Y.Arai, NIM A,731,74-78(2013)査読有
6. Tests With Soft X-rays of an Improved Monolithic SOI Active Pixel Sensor, S.G.Ryu, T.G.Tsuru(13名中2番目), Y.Arai, 2013, IEEE TNS, 60, 465-469, 査読有
7. Soft X-ray Characterizations of an Improved Monolithic SOI Active Pixel Sensor, S.G.Ryu, T.G.Tsuru (13名中2番目), Y.Arai, 2012, IEEE TNS, 60, 465-469, 査読有
8. Progress in Development of Monolithic Active Pixel Detector for X-ray Astronomy with SOI CMOS Technology, S.Nakashima, T.G.Tsuru (11名中3番目), Y.Arai, 2012, Phys. Procedia, 37, 1373-1380, 査読有
9. First Performance Evaluation of an X-Ray SOI Pixel Sensor for Imaging Spectroscopy and Intra-Pixel Trigger, S.G.Ryu, T.G.Tsuru (12名中2番目), Y.Arai, 2011, IEEE TNS, 58,

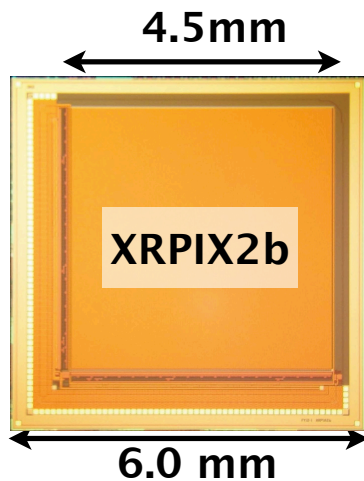


図1：6mm角素子(XRPIX2b).

2528-2536, 査読有

10. Development of SOI pixel process technology, Y.Arai, T.G.Tsuru (50名中23番目), 2011, NIM A, 636, pp.S31-S36, 査読有

〔学会発表〕 (計5件) (多数あるので研究代表者の国際会議口頭講演にのみに限る)

1. (国際会議口頭講演) Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, T.G.Tsuru (21名中1番目), Y.Arai, SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2014: "Ultraviolet to Gamma Ray" held in Montreal, Canada, June 22-27, 2014
2. (国際会議口頭講演) Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor', T.G.Tsuru (19名中1番目), Y.Arai, "Scientific Detector Workshop 2013" held in Florence, Italy, Oct. 7-11, 2013
3. (国際会議口頭講演) Development of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor, T.G.Tsuru (19名中1番目), Y.Arai, "SOI Collaboration Meeting at Krakow", held in Krakow, Poland, May 06-07, 2013
4. (国際会議口頭講演) Development and Performance of Kyoto's X-ray

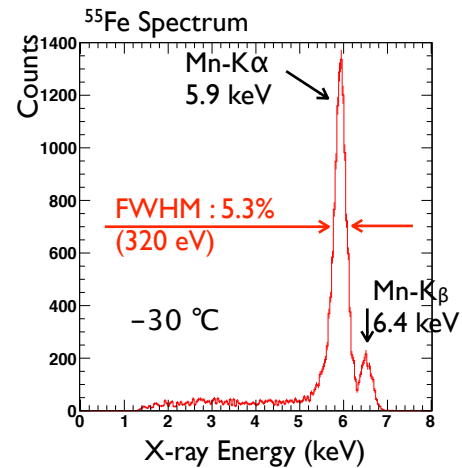


図2：XRPIX3bで得た、Fe-55のスペクトル。Mn-KαとKβが分離されている。

Astronomical SOI pixel sensor, T.G.Tsuru (17名中1番目), Y.Arai, "High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V.", SPIE held in Amsterdam, 2012 July 01-06

5. (国際会議口頭講演) Development and Performance of X-ray Astronomical SOI pixel sensor, T.G.Tsuru (9名中1番目), Y.Arai, IEEE-NSS2011, held in Valencia, Spain, Oct. 23-29, 2011

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

鶴 剛 (TSURU TAKESHI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10243007

(2)研究分担者

新井 康夫 (ARAI YASUO)
大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構・
素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：90167990

(3)連携研究者

中嶋 大 (NAKAJIMA HIROSHI)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：70570670

(4)研究分担者

中澤 知洋 (NAKAZAWA KAZUHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・講師
研究者番号：50342621