

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：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870347

研究課題名(和文) 硬X線偏光観測による超新星残骸での粒子加速機構の解明

研究課題名(英文) Revealing particle acceleration mechanism in supernova remnants with hard X-ray polarimetry

研究代表者

田中 孝明 (Tanaka, Takaaki)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20600406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では将来の高感度硬X線偏光観測を目指して、シリコン半導体ピクセル型検出器の開発を行った。この検出器はSilicon-On-Insulator (SOI) 技術を用いたピクセル検出器 (SOIPIX) である。硬X線偏光観測を実現するにはSOIPIXに優れたエネルギー分解能が要求される。本研究では信号処理回路の初段の部分を改良して、信号増幅をかけることで、従来の2倍のエネルギー分解能を達成することができた。また、これまでの素子では信号電荷の収集効率が低かったためにエネルギー分解能を劣化させていたが、その原因を特定することができた。

研究成果の概要(英文)：We aim to reveal how cosmic rays are accelerated in shocks of supernova remnants. Hard X-ray polarimetry with superior sensitivity is one of the promising methods for the purpose. Semiconductor pixel sensors with good energy resolution is a key technology to realise such observations. We have been developing SOIPIX, active pixel sensors based on a Silicon-On-Insulator (SOI) technology. In this research, we successfully improved their energy resolution by amplifying signals in the early stage of the signal processing. The achieved energy resolution is 300 eV (FWHM) for 5.9-keV X-rays. We also improved charge collection efficiency of our sensors, which should be high enough to achieve even better energy resolution. We identified why our previous devices have lower charge collection efficiency.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：高エネルギー宇宙物理 X線天文 半導体検出器 放射線計測

1. 研究開始当初の背景

天体から放射されるX線の偏光観測によって、放射源のジオメトリや放射プロセスの制限に関して、他の手段では得られない情報を得ることができる。

本研究の対象は、10 keV以上の硬X線帯域での偏光観測である。超新星残骸から放射では10 keV以上の帯域において、衝撃波で加速された電子からのシンクロトン放射が卓越するため、偏光検出が期待される。偏光方向と偏光度から、衝撃波面に対する平均磁場の向きや磁場乱流の大きさなど、衝撃波における粒子加速理論の根幹に関わる情報を得ることができる。超新星残骸が銀河系宇宙線の加速源であるとする、その衝撃波において陽子が 10^{15} eV = PeVにまで加速されなければならない。偏光観測はPeVまでの加速が起きているのかどうか調べるためには非常に有効な手段であると言える。

しかしながら、X線帯域の偏光観測はそもそも、技術的に難しい。そのため、OSO-8衛星によるかに星雲からの偏光検出以降停滞しており、その後、数例の検出報告があるのみであった。ASTRO-H衛星でも偏光観測が可能であるが、40 keV以上の帯域に限られる。

2. 研究の目的

本研究で目的とする超新星残骸の観測においては、撮像能力と偏光検出能力の両立が重要である。そこで、現在の技術で集光系の実現が可能な15 keVから80 keVのエネルギー帯域を対象とする。我々が実現を目指す偏光検出器の構成を図1に示す。SOIPIXを数段積層し、テルル化カドミウム(CdTe)のピクセル検出器あるいは両面ストリップ検出器をその下部と側面に配置する。これを硬X線望遠鏡の焦点面に置く。この検出器では、SOIPIXでコンプトン散乱し、光電吸収確率の大きいCdTeで吸収されたイベントを選び出す。そして、コンプトン散乱の方位角分布を取得することで偏光方向と偏光度を求める。

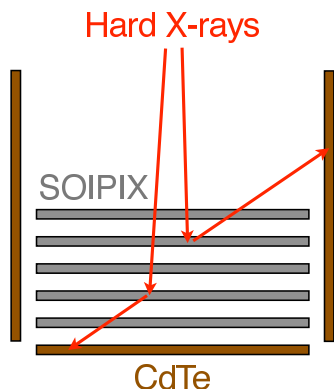


図1: 本研究が開発を目指す偏光検出器。

ここで提案する偏光検出器はASTRO-H HXIと良く似ているが、シリコン検出器と

して両面シリコン検出器(DSSD)ではなくSOIPIXを用いている点で異なる。ASTRO-H HXIで偏光検出の下限エネルギーが低くできないのは、両面シリコンストリップ検出器の等価雑音電子数が $120 e^-$ (rms)と十分に低くないためである。例えば、15 keVの光子が散乱角 90° でコンプトン散乱したイベントにおいては、反跳電子に与えられる運動エネルギーは0.43 keVでしかない。DSSDを、X線CCDに匹敵する $10 e^-$ (rms)というノイズ性能を持つ検出器に置き換えれば、このような小さなエネルギー・テポジットをとらえることができるので、偏光検出下限エネルギーを15 keVにまで下げることができる。しかしながら、このような偏光検出器では同時に2カ所でヒットしたイベントを用いるため、CCDの数秒という時間分解能では圧倒的に不十分である。一方、SOIPIXはセルフトリガによってデータ取得が可能で $< \mu s$ の時間分解能を達成することができる。また目標とするノイズ性能を達成することも期待できる。

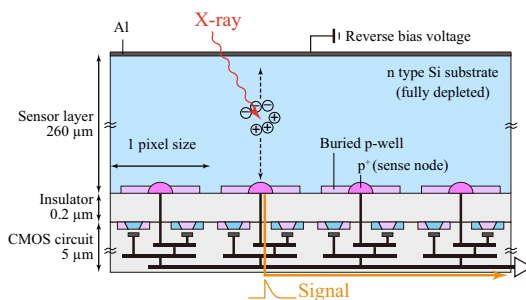


図2: SOIPIXの断面図。

3. 研究の方法

本研究では上で述べた偏光検出器実現の鍵を握るSOIPIXの開発を進めた。SOIPIXの構成を図2に示す。SOIPIXでは回路部を構成する低抵抗シリコンの下に絶縁層(SiO₂)を埋め込み反対側に高比抵抗のセンサ部を張り合わせる。X線などの放射線によりセンサ部に生成された電荷は、SiO₂層に穴を開けて設けたイプラントを通じて回路部に送られる。このようなSOIPIXは、浮遊容量を小さくできるという特徴を持ち、センサ部の容量が大きくなってしまいう両面シリコンストリップと比較して有利である。また、高速・低消費電力、高い放射線耐性など、宇宙利用に適した特徴も持つ。

このSOIPIXについて、特に最も重要となるエネルギー分解能の向上に注目して開発を進めた。これまで、エネルギー分解能が十分に良くなかった原因としては、第一に、回路部で発生するノイズが信号と比較して大きかったことが挙げられる。また、センサ部での電荷収集効率が悪かったために、スペクトルにおいてピークの低エネルギー側にテイル構造が現れ、エネルギー分解能を悪化させていた。本研究ではこの2点について大きく進展をさせることができた。

4. 研究成果

我々がこれまで開発を行ってきた SOIPIX は初段にソースフォロワ(SF)を用いていた。図 3 に回路図を示す。このような構成の回路の利得は $6 \mu\text{V}/\text{e}$ 程度であった。我々は、この利得を上げることにより、回路内で発生するノイズに対する信号の大きさを向上させ、エネルギー分解能を改善できると考えた。回路のできるだけ初段で信号を増幅させるためにソースフォロワを電荷有感型増幅器(CSA)に置き換えた素子を開発した。図 4 にその回路図を示す。図 3 の SF 部にフィードバック・コンデンサを付加することで CSA として機能するようになっている。

SF Pixel Circuit

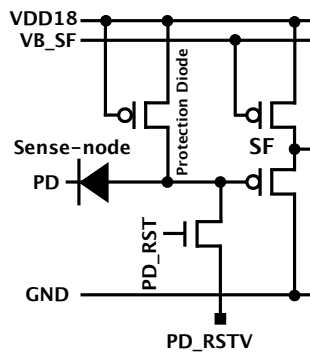


図 3: SOIPIX 初段の回路。SF を採用した場合。

CSA Pixel Circuit

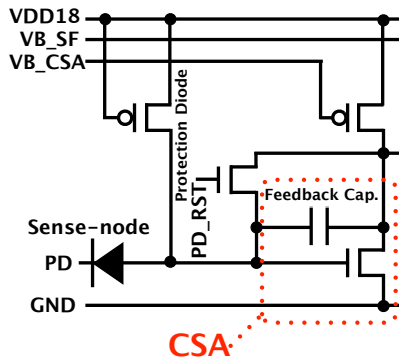


図 4: SOIPIX 初段の回路。CSA を採用した場合。

図 5 に従来の SF を用いた素子と CSA を用いた素子について利得の比較を示す。当初の狙い通り CSA を採用することにより、SF を用いた場合に比べて利得を向上させることができた。ただし、回路パラメータから期待できる利得には達しておらず、今後の改善が必要である。

実際に ^{55}Fe 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。ここでも CSA を採用することでエネルギー分解能が向上していることがわかる。得られたエネルギー分解能は 5.9 keV の X 線に対して 320 eV (FWHM) であり、これまで我々が開発した SOIPIX の中では最も良い値である。

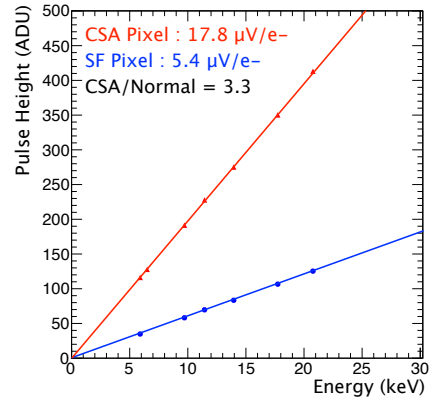


図 5: SF を用いた場合 (青) と CSA を用いた場合 (赤) の回路利得の比較。

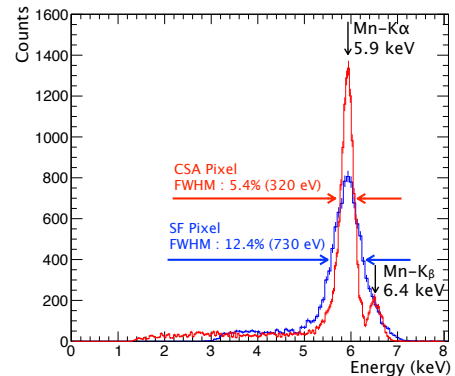


図 6: SF を用いた素子 (青) と CSA を用いた素子 (赤) で得られた ^{55}Fe からの X 線のスペクトル。

以上のように、信号に対して相対的にノイズレベルを下げることで、エネルギー分解能を向上させることができた。しかしながら、ノイズレベルを下げるだけでは不十分であることがわかった。図 7 は SOIPIX で得られた ^{241}Am のスペクトルである。この図からわかるように、X 線の入射位置によって、スペクトルが大きく崩れてしまい、エネルギー分解能が悪化することがわかった。そこで SPring-8 にてピクセルの様々な位置に直径 $10 \mu\text{m}$ に絞った X 線ビームを照射し、場所ごとの検出器応答を調べる実験を行った。

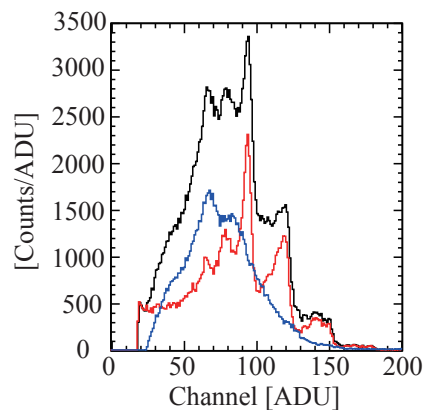


図 7: SOIPIX で得られた ^{241}Am のスペクトル。赤は 1 ピクセルのみから信号が出てきた場合のスペクトルで、

比較的ピクセル中心で X 線が反応したと考えられる。青は隣り合う 2 ピクセルから信号が出てきた場合のスペクトルであり、ピクセル境界近くで X 線が反応したと考えられる。黒は赤と青の和。

ピクセルの中央、境界、角に 8 keV の X 線ビームを照射して得られたスペクトルを図 8 に示す。境界で得られたスペクトルのうち 2 ピクセルから信号が検出された場合のものは、1 ピクセルのみから信号が検出された場合に比べてピーク位置が低エネルギー側にあることがわかる。また、ピクセルの角から得られたスペクトルでピーク構造がほとんど見られない。これらの実験結果は、ピクセルの境界あるいは角付近においては信号電荷が著しく失われていると考えると説明できる。

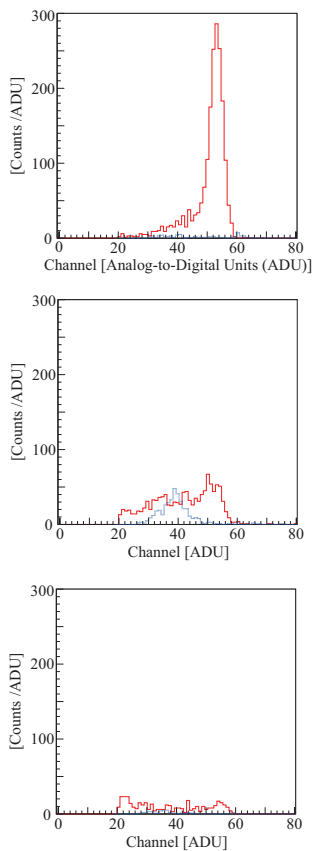


図 8: SPring-8 実験で得られた 8 keV X 線ビームのスペクトル上からピクセルの中心部、境界、角で得られたスペクトル。赤が 1 ピクセルのみから信号が出てきた場合、青が隣り合う 2 ピクセルから信号がでてきた場合のスペクトル。

素子の各場所で得られた X 線のカウントレートと回路の配置を比較したところ、図 9 のようになった。この図から回路の位置と電荷収集効率に相関があることがわかる。回路がセンサ部の電場構造に何らかの影響を及ぼしていることが示唆された。

Spring-8 での実験結果を受けて、電場シミュレーションを行い、センサ部の電場が回路によってどのように影響を受けるか調べた。その結果、我々が予想したように、回路の配

置によってセンサ部の電場が変化し、Spring-8 で用いた素子の場合、電場が読み出しノードの方には向かわず、回路層の方に向いてしまっていることがわかった。電荷収集効率が低かった原因を特定することができた。

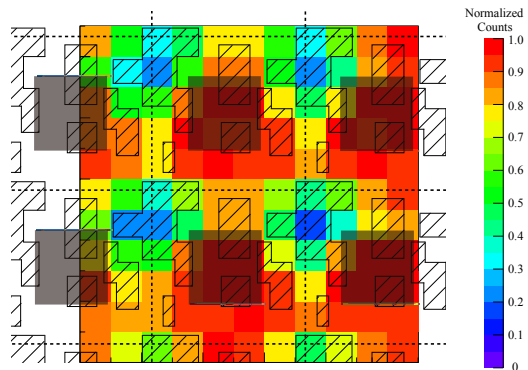


図 9: SPring-8 実験で得られたカウントレートのマップと回路配置 (斜線) の比較。

これらの結果を受けて、我々は電場が読み出しノードに向かうように回路配置を工夫した素子の評価を行った。その結果、図 10 に示すように電荷収集効率を向上させることに成功した。

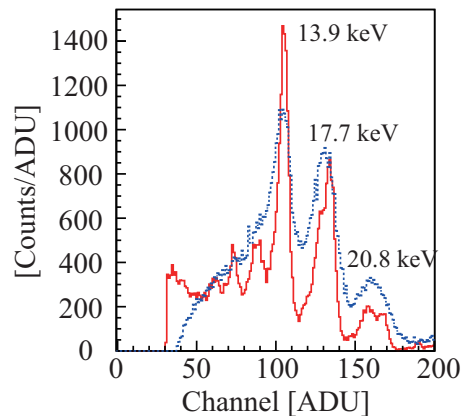


図 10: 電場が読み出しノードに向かうように回路配置を工夫した素子で得られた ^{241}Am のスペクトル。図 7 と比較すると電荷収集効率が改善されていることがわかる。

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 4 件)

- ① Hideaki Matsumura, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Ayaki Takeda, Yasuo Arai, Koji Mori, Yusuke Nishioka, Ryota Takenaka, Takayoshi Kohmura, Shinya Nakashima, Takaki Hatsui, Yoshiki Kohmura, Takashi Kameshima, and Dai Takei, “Improving Charge-Collection Efficiency of SOI Pixel Sensors for X-ray Astronomy”, NIM A, 査読有り, 掲載決

定済み

- ② A. Takeda, T.G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, “Improvement of spectroscopic performance using a charge-sensitive amplifier circuit for an X-ray astronomical SOI pixel detector”, JINST, 査読有り, Volume 10, 2015, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005
- ③ Ayaki Takeda, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Hideaki Matsumura, Yasuo Arai, Koji Mori, Yusuke Nishioka, Ryota Takenaka, Takayoshi Kohmura, Shinya Nakashima, Shoji Kawahito, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Hiroki Kamehama and Sumeet Shrestha, “Development and Evaluation of an Event-Driven SOI Pixel Detector for X-Ray Astronomy”, Proc. of Science, 査読有り, PoS(TIPP2014), 2014, 138, http://pos.sissa.it/archive/conferences/213/138/TIPP2014_138.pdf
- ④ H. Matsumura, T. G. Tsuru, T. Tanaka, S. Nakashima, S. G. Ryu, A. Takeda, Y. Arai, T. Miyoshi, “Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto’s X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX”, NIM A, 査読有り, Volume 765, 2014, 183

[学会発表] (計 1 件)

- ① Takaaki Tanaka, “Development of SOI Pixel Sensors for X-ray Astronomy”, IEEE NSS, 2013 年 10 月 28 日, ソウル (韓国)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 孝明 (Takaaki Tanaka)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：20600406

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(3) 研究協力者

松村 秀晃 (Hideaki Matsumura)