

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610047

研究課題名(和文) イベント駆動型SOIピクセル検出器による大立体角X線監視観測の開拓

研究課題名(英文) Development of wide field X-ray monitors with event driven SOI pixel detectors

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：10keV以下の軟X線の大立体角監視には超新星爆発の瞬間のショックブレイクアウトX線を始め、突発天体の豊富なサイエンスが存在する。そこで大立体角監視X線カメラの実現を目指す。本研究ではこれに必要なX線SOIPIX素子の基礎開発を行った。(1) 回路層での回路や配線の配置を変更することで、電荷雲重心法による高空間分解能に必要な高い電荷収集効率を得た。(2) 高い軟X線感度を得るために、裏面プロセスとして、レーザーアニールとピザプロセスの2つを試した。その結果、要求性能(1 μ m以下)を満たす見込みを得た。

研究成果の概要(英文)：In contrast of the gamma ray band, the science of X-ray transients with wide field X-ray monitors at the energy band lower than 10 keV is a remaining unexplored field in spite of its importance. We are aiming for the realization of a wide field X-ray camera with X-ray SOIPIXs. We made basic developments of X-ray SOIPIXs in this research. (1) A good uniformity of the quantum efficiency is required to obtain high angular resolution by the method of the determination of the center of gravity of the charge cloud. We modified the in-pixel circuit layout and successfully improved the uniformity. (2) We tried two methods of the back-side processes, "laser annealing" and "low temperature annealing" and successfully show prospect of achieving the requirement of 1 μ m for the dead layer thickness.

研究分野：数物系科学

キーワード：X線ガンマ線天文学 X線ガンマ線天文学 大立体角X線監視 SOI型シリコンピクセル検出器

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト研究で発展したガンマ線領域の大立体角監視観測に対し、X線帯域、とりわけ 10keV 以下の軟 X 線の大立体角監視による突発天体の観測実績は、意外に少ない。これは従来の軟 X 線天文学では X 線ミラーが急激に発展し、暗く遠方の天体を観測するため小立体角の精密撮像に研究者の関心が指向したからである。その結果、X 線ミラーの不得意な大立体角 X 線監視と突発天体のサイエンスは後回しになってしまった。しかし、そこは不毛の地ではなく、広大なディスカバリースペースが存在する。その例として「超新星ショックブレイクアウト」を示す。

通常、超新星爆発は実際の爆発から数日遅れた可視光の増光によって発見される。しかし 2008 年 1 月、Swift 衛星 X 線望遠鏡(XRT)は偶然 27Mpc はなれた銀河の超新星爆発の瞬間の X 線放射(継続時間 ~ 400 秒間)を捉えた[1](SN1987A のニュートリノ検出を除けば)超新星爆発の瞬間の初めての観測例である。同じ感度を持つ大立体角 X 線監視を実現すれば、年間数百個の超新星爆発の瞬間の観測が可能になる[1]。そして同期観測からニュートリノや重力波の同定検出と天体の同定も可能になる。この他にも魅力的な突発天体や理論的予言は数多くある。しかし、それを実現する上で現行装置は様々な点で性能が不足している。これが本研究を開始するきっかけとなった。[1]Nature (2008),453, 469

2. 研究の目的

10keV 以下の軟 X 線では大立体角監視装置による突発天体研究の広大なディスカバリースペースを開拓することを最終的な科学目的である。研究代表者は 2008 年から新型のシリコンピクセル検出器「X線 SOIPIX」を開発している。CCD と同じピクセル・素子サイズを備えつつ、全てのピクセルに閾値回路を持ち、イベント駆動読み出しできる。CCD の百万倍速い 1 μ 秒の時間分解能など優れた性能を持つ。研究代表者はこの X 線 SOIPIX が大立体角監視に最適であると着想した。そこで、2 次元符号化マスクを組み合わせて空間分解能 0.01 度、時間分解能 1 μ 秒、0.3-40keV の広帯域、非同時計数による低バックグラウンド性能を 5cm 高のコンパクトなカメラサイズの実現を最終的に目指すこととした。本研究の直接の目的は、この大立体角監視 X 線カメラに必要な X 線 SOIPIX 素子の基礎開発を行うことである。

3. 研究の方法

X 線 SOIPIX 素子に要求される性能は空間分解能 0.01 度、時間分解能 1 μ 秒、0.3-40keV の広帯域、非同時計数による低バックグラウンドである。このうち、時間分解能と非同時計数の要求に必要なトリガ出力機能はすでに実現済みである。そこで本研究では下記の方法で空間分解能 0.01 度と 0.3-40keV の広

帯域の実現に必要な開発を行う。

(1) 電荷雲重心法：空間分解能 0.01 度を得るには電荷雲重心法による、出来るだけ小さな位置分解能を実現する必要がある。1 つのピクセルに全ての電荷が収まってしまう場合は、ピクセル内のどこに X 線が入射したかわからない。しかし複数のピクセルにまたがる場合はそれを逆手に取り、その電荷の分布の重心計算をすることで、ピクセルサイズより細かい位置分解能を得る事が可能である。

(2) 高い軟 X 線感度：超新星ショックブレイクアウト X 線のスペクトルは比較的ソフトであると考えられており、素子の軟 X 線感度を向上させる必要がある。本 X 線 SOIPIX は裏面照射型を採用しているので、裏面側の不感層をできるだけ薄くする必要がある。

4. 研究成果

(1) 電荷雲重心法：この方法を行う上でピクセル内部のどこに X 線が入射したら、どのように電荷雲が生成し、最終的に複数のピクセルのそれぞれにどれだけの電荷が出来るかを調べる必要がある。そこで、2013 年に行った SPring-8 で行った細かい X 線ビームのサブピクセルレスポンス実験の詳しいデータ解析を行った。その結果予想と違い、ピクセル境界付近に X 線を入射した際には、電荷が失われる事がわかった。このままでは、ピクセルサイズより細かい位置分解能を得る事ができない。そこで、電荷が失われるメカニズムをセンサー内部の電場シミュレーションツールを用いて詳しく調べた所、回路層が X 線センサー層の電荷収集電場を乱している事がわかった。そこで、回路層での回路や配線の配置を変更した所、この特性は改善する事ができた(図 1)。この成果は、査読付き投稿論文として出版した。

(2) 高い軟 X 線感度：薄い不感層を得るためにイオンインプラとレーザーアニーリングと、低温イオンインプラと低温アニーリングを行う 2 つのプロセスを開発し、評価を行った。軟 X 線線性能を測定するために、まず評価系として、真空冷却を破らずに X 線エネルギーを自由に変更できる多色 X 線発生装置を建設し、Silicon Drift Detector 等を用いてその校正を行った。それを用いて、従来標準的に行ってきた裏面レーザーアニール素子の評価を行い、不感層厚み 1.1-1.5 μ m を得た(図 2)。最低限の要求性能(1 μ m 以下)に近いものの、性能の向上が必要だとわかった。そこで「ピザプロセス」と呼ぶ、低温イオン注入と低温アニーリングでアモルファス Si 層を形成する方法が有望であると結論した。実際に素子をプロセスし、軟 X 線感度向上に成功した(図 2)。不感層厚みは 0.9-1.0 μ m であり、要求性能を満たす見込みを得た。この結果は投稿論文として出版予定である。

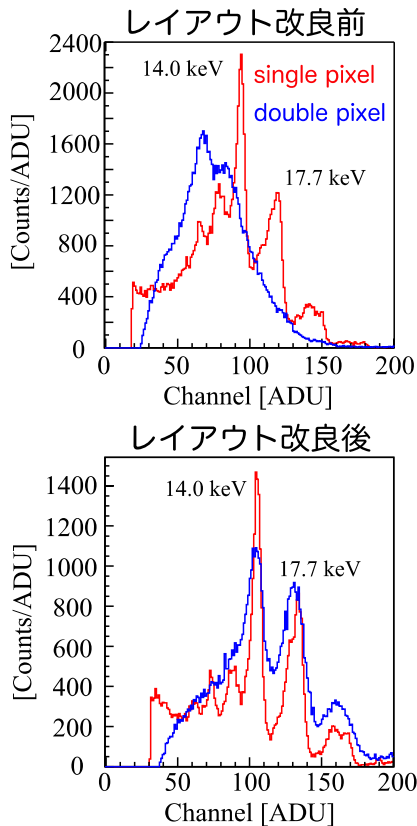


図 2. Am-241 の X 線スペクトル．レイアウト改良前(上図)では 14.0keV および 17.7keV X 線のダブルピクセルイベント (青色) の波高値がシングルピクセルイベント(赤色)よりも低い．これはピクセル境界で一部の電荷が失われていることを示す．レイアウト改良後(下図)では、ほぼ同じ波高値が得られた．ピクセル境界でも電荷が失われずに収集されていることを示す．

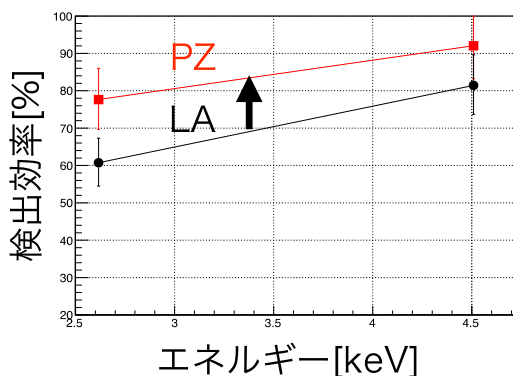


図 2. 軟 X 線(CI-K:2.6keV, Ti-K:4.5keV)における裏面照射型 SOIPIX のレーザーアニーリング法(LA)と低温アニーリング法(PZ)に対する検出効率．低温アニーリング法により性能が明らかに向上したことがわかる．

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 3 件)

査読有 18 編, 査読無 25 編のうち, 査読有のみを下記に示す .

1. ``Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto's X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer'', Shunichi Ohmura, , Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Hiroyuki Uchida, Ayaki Takeda, Hideaki Matsumura, Makoto Ito, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Toshinobu Miyoshi, Shinya Nakashima, Koji Mori, Yusuke Nishioka, Nobuaki Takebayashi, Koki Noda, Takayoshi Kohmura, Kouki Tamasawa, Yusuke Ozawa, Tadashi Sato, Takahiro Konno, Shoji Kawahito, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Hiroki Kamehama, Sumeet Shrestha, Kazuhiko Hara, Shunsuke Honda, 2016, NIM A, in publish, doi:10.1016/j.nima.2016.04.024
2. ``The first back-side illuminated types of Kyoto's X-ray astronomy SOIPIX'', Makoto Ito, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Ayaki Takeda, Hideaki Matsumura, Shunichi Ohmura, Hiroyuki Uchida, Shinya Nakashima, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Koji Mori, Ryota Takenaka, Yusuke Nishioka, Takayoshi Kohmura, Koki Tamasawa, Craig Tindal, 2016, NIM A, in publish, doi:10.1016/j.nima.2016.04.012
3. ``Electron Pattern Recognition using trigger mode SOI pixel sensor for Advanced Compton Imaging'', Shimazoe, K.; Yoshihara, Y.; Fairuz, A.; Koyama, A.; Takahashi, H.; Takeda, A.; Tsuru, T.; Arai, Y. 2016, JINST, 11 article id. C02030, doi:10.1088/1748-0221/11/02/C02030
4. ``Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector'', Ayaki Takeda, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Hiroyuki Uchida, 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, 2015, JINST, 10 C06005,

- doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005
5. ``Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy'', 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, Dai Takei, Takashi Kameshima, 2015, NIM A, 794, 255-259, doi:10.1016/j.nima.2015.05.008
 6. ``Development and Evaluation of Event-Driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy'', 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, 2014, PoS (TIPP2014) 138
 7. ``Use of a charge-injection technique to improve performance of the Soft X-ray Imager aboard ASTRO-H'', Kumiko Kawabata Nobukawa, Takeshi Go Tsuru, Masayoshi Nobukawa, Takaaki Tanaka, Hiroyuki Uchida, Hiroshi Tsunemi, Kiyoshi Hayashida, Naohisa Anabuki, Hiroshi Nakajima, Ryo Nagino, Tadayasu Dotani, Masanobu Ozaki, Chikara Natsukari, Hiroshi Tomida, Masashi Kimura, Makoto Yamauchi, Koji Mori, Isamu Hatsukade, Yusuke Nishioka, Takayoshi Kohmura, Junko Sato Hiraga, Hiroshi Murakami, On behalf of the SXI team, 2014, NIM A, 765, 269-274
 8. ``Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX'', Hideaki Matsumura, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Shinya Nakashima, Syukyo G. Ryu, Ayaki Takeda, Yasuo Arai, Toshinobu Miyoshi, 2014, NIM A, 765, 183-186
 9. ``Recombining plasma in the remnant of a core-collapsed supernova, Kes 17'', Washino, Ryosaku; Uchida, Hiroyuki; Nobukawa, Masayoshi; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Kawabata Nobukawa, Kumiko; Koyama, Katsuji, 2016, PASJ, 68, SP1, id.S4 7 pp. DOI: 10.1093/pasj/psv095
 10. ``X-ray study of the supernova remnant G337.2-0.7'', Takata, Akihiro; Nobukawa, Masayoshi; Uchida, Hiroyuki; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Koyama, Katsuji, 2016, PASJ, 68, SP1, id.S3 9 pp., DOI: 10.1093/pasj/psv025
 11. ``Number density distribution of near-infrared sources on a sub-degree scale in the Galactic center: Comparison with the Fe XXV K line at 6.7 keV'', Yasui, Kazuki; Nishiyama, Shogo; Yoshikawa, Tatsuhito; Nagatomo, Schun; Uchiyama, Hideki; Tsuru, Takeshi Go; Koyama, Katsuji; Tamura, Motohide; Kwon, Jungmi; Sugitani, Koji; Schodel, Rainer; Nagata, Tetsuya 2015, PASJ, 67, article id.1237 pp., DOI: 10.1093/pasj/psv100
 12. ``Spectrum of Relativistic and Subrelativistic Cosmic Rays in the 100 pc Central Region'', Dogiel, V. A.; Chernyshov, D. O.; Kiselev, A. M.; Nobukawa, M.; Cheng, K. S.; Hui, C. Y.; Ko, C. M.; Nobukawa, K. K.; Tsuru, T. G. 2015, ApJ, 809, id.48, 12 pp. DOI: 10.1088/0004-637X/809/1/48
 13. ``Enhancement of the 6.4 keV Line in the Inner Galactic Ridge: Proton-induced Fluorescence ?'' Nobukawa, K. K.; Nobukawa, M.; Uchiyama, H.; Tsuru, T. G.; Torii, K.; Tanaka, T.; Chernyshov, D. O.; Fukui, Y.; Dogiel, V. A.; Koyama, K. 2015, ApJL, 807, article id. L10, 6 pp.
 14. ``Discovery of new X-ray sources near the unidentified gamma-ray source HESS J1841-055'', Nobukawa, K. K.; Nobukawa, M.; Tsuru, T. G.; Koyama, K., 2015, Advances in Space Research, Volume 55, Issue 11, p. 2493-2499.
 15. ``X-ray filament with a strong 6.7-keV line in the Galactic center region'', Yamauchi, Shigeo; Shimizu, Miku; Nakashima, Shinya; Nobukawa, Masayoshi; Tsuru, Takeshi Go; Koyama, Katsuji, 2015, PASJ, 66, 1256
 16. ``Abundances in the ejecta of core-collapse supernova remnants G350.1-0.3 and G349.7+0.2'', Yasumi, Masato; Nobukawa, Masayoshi; Nakashima, Shinya; Uchida, Hiroyuki; Sugawara, Ryusuke; Tsuru, Takeshi Go; Tanaka, Takaaki; Koyama, Katsuji 2014, PASJ, 66, 68 (9pp)
 17. ``Discovery of Enhanced Radiative Recombination Continua of He-like Iron and Calcium from IC 443 and its Implications'', Ohnishi, Takao; Uchida, Hiroyuki; Tsuru, Takeshi Go; Koyama, Katsuji; Masai, Kuniaki; Sawada, Makoto, 2014, ApJ, 784, 74 (4pp)
 18. ``Serendipitous ALMA Detection of a Distant CO-emitting X-Ray Bright Galaxy'', Tamura, Yoichi; Saito,

Toshiki; Tsuru, Takeshi G.; Uchida, Hiroyuki; Iono, Daisuke; Yun, Min S.; Espada, Daniel; Kawabe, Ryohei, 2014, ApJL, 781, L39 (5pp)

〔学会発表〕(計 59件)

研究代表者が国際会議で行った口頭講演のみを下記に示す。

19. (招待講演) ``Event driven type of SOI pixel sensors for future X-ray astronomy satellites'', T.Tsuru, International Forum on Detectors for Photon Science (IFDEPS), Lake Kawaguchi, Feb. 28- Mar. 01, 2016
20. ``Recent progress in the development of Kyoto's X-ray astronomy SOI pixel sensor - XRPIX'', T.Tsuru, A.Takeda, H.Matsumura, T.Tanaka, S.Ohmura, M.Itou (Kyoto U.), Y.Arai (KEK), K.Mori, Y.Nishioka, R.Takenaka (U. Miyazaki), T.Kohmura (Tokyo U. of Science), S.Nakashima (ISAS/JAXA), T.Hatsui, T.Kameshima, Y.Kohmura, D.Takei (Riken), S.Kawahito, S.Shrestha, H.Kamehama, K.Kagawa, K.Yasutomi (Shizuoka U.), C.S.Tindall (LBNL), 2015, the SPIE · San Diego, USA · 2015/08/09-13, 9601-12.
21. (招待講演) ``Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor - XRPIX'', T.Tsuru, H.Matsumura, T.Tanaka, S.Ohmura, M.Itou (Kyoto U.), Y.Arai (KEK), K.Mori, Y.Nishioka, R.Takenaka (U. Miyazaki), T.Kohmura (Tokyo U. of Science), S.Nakashima (ISAS/JAXA), T.Hatsui, T.Kameshima, Y.Kohmura, D.Takei (Riken), S.Kawahito, S.Shrestha, H.Kamehama, K.Kagawa, K.Yasutomi (Shizuoka U.), C.S.Tindall (LBNL) 2015, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), Tohoku University, Sendai, Japan, 3-6, June, 2015. C15-06-03
22. ``Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor'', Takeshi G. Tsuru; Hideaki Matsumura; Ayaki Takeda; Takaaki Tanaka; Shinya Nakashima; Yasuo Arai; Koji Mori; Ryota Takenaka; Yusuke Nishioka; Takayoshi Kohmura; Takaki Hatsui; Takashi Kameshima; Kyosuke Ozaki; Yoshiki Kohmura; Tatsuya Wagai; Dai Takei; Shoji Kawahito; Keiichiro Kagawa; Keita Yasutomi; Hiroki Kamehama; Sumeet Shrestha, SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2014: ``Ultraviolet to Gamma Ray'' held in Montreal, Canada, June 22-27, 2014, Proceedings of the

- SPIE, 9144, pp. 914412 (7pages) (2014)
23. (招待講演) ``Development and Performance of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor'', T.G.Tsuru, H. Matsumura, A.Takeda, T.Tanaka, Y.Arai, K.Mori, Y.Nishioka, R.Takenaka, T.Kohmura, S.Nakashima, T. Hatsui, T. Kameshima, K.Ozaki, Y.Kohmura, T. Wagai, D.Takei, S. Kawahito, 2014, in FEE2014 "Front End Electronics 2014", held 19-23 May, 2014 at Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA
 24. (招待講演) ``Origin of the 6.4-keV line of the Galactic Ridge X-ray Emission - First Report -'', Tsuru, T. G.; Uchiyama, H.; Nobukawa, K. K.; Nobukawa, M.; Nakashima, S.; Koyama, K.; Torii, K.; Fukui, Y. in Suzaku-MAXI 2014 ``Expanding the Frontiers of the X-ray Universe'', proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda, 2014., p.20-24

〔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/X/in dex.html>

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
(なし)
- (3) 連携研究者
前田 啓一 (MAEDA, Keiichi)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 00503880