

平成30年6月26日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17648

研究課題名(和文)多層化SOIピクセル検出器による電子飛跡型半導体コンプトンカメラの開発

研究課題名(英文) Development of electron-tracking semiconductor Compton camera with a stacked-layer silicon-on-insulator pixel detector

研究代表者

武田 彩希 (Takeda, Ayaki)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：40736667

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)：現在、硬X線からMeVガンマ線領域の宇宙観測は発展途上である。この分野を切り拓くには、観測装置の性能向上が鍵となる。本研究は、イベント駆動型SOIピクセル検出器で電子飛跡型半導体コンプトンカメラを実現する基礎開発を行った。本研究で得られた成果は下記の通りである。1)ピクセルに新しい構造を導入することで、検出器のノイズを35電子から16電子へ低減することに成功した。さらに、近接する回路・センサ間の干渉が切れたことで、イベント駆動読み出しにおける分光性能が向上した。2)コンプトンカメラのプロトタイプとなる多層化基板を開発した。そして、開発した基板によりスペクトルの取得に成功した。

研究成果の概要(英文)：Currently, space observation using hard X-ray to MeV gamma rays region radiation is under progress. Improvement of the performance of observation instruments is important for the development of this field. Here, we developed a basic technology to realize electron-tracking semiconductor Compton camera having an event-driven silicon-on-insulator pixel detector. 1) We reduced the device noise from 35 e- (rms) to 16 e- (rms) by introducing a new structure for the pixel. The spectroscopic performance of the event-driven readout mode was improved by suppressing crosstalk between the circuit and the sensor. 2) A stacked-layer board was developed for the prototype Compton camera. We were able to obtain the spectra by the evaluation test of the developed board.

研究分野：物理計測システム

キーワード：コンプトンカメラ 電子飛跡 ピクセル検出器 半導体検出器 silicon-on-insulator 宇宙ガンマ線観測

1. 研究開始当初の背景

現在、硬X線から MeV ガンマ線領域の宇宙観測は発展途上である。この分野を切り拓くには、観測装置の性能向上が鍵となる。ガンマ線の検出手法としては、固体素子のコンプトンカメラが知られているが、いかに到来方向とエネルギーを決めるかが重要である。ガンマ線による散乱部でのコンプトン散乱と吸収部での光电吸収のエネルギーを測定することで、到来方向がコーン状に決定できる。さらに、これをリングイメージとして重ねることで、到来方向を絞っていく。従来型に加え、もしコンプトン散乱の電子飛跡をとらえることができれば、検出性能が大きく飛躍する。電子飛跡の情報を基に、より少ないイベント数で到来方向が決定できるため、高速かつ高精度なものとなる。

検出器の候補として、半導体ストリップセンサがあるが、構造とピッチの粗さ(数百 μm)ゆえ不可能である。電子飛跡をとらえることができる構造と画素サイズ(数十 μm)を持つ検出器の場合、例えば CCD 素子はそれが可能であるが、イベント検出タイミングの同期が取れないため、到来方向を決定することが困難である。電子飛跡検出型コンプトンカメラの実現には、画素サイズが小さいこと、時間分解能が高く同期計測が可能であること、この両者を併せ持つ検出器の存在が不可欠である。これらの条件を満たすものが、現在開発中のイベント駆動型 SOI ピクセル検出器である。これは、粒子検出タイミングと入射位置情報を出力することで「イベント駆動読み出し」が可能な撮像分光センサである。

2. 研究の目的

本研究は、次世代のガンマ線観測を切り拓く「電子飛跡型半導体コンプトンカメラ」を実現することが目的である。そのためには、重要な役割を担うイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の性能向上が不可欠である。また、コンプトンカメラの原理実証に必要な多層化基板の開発が必要である。電子飛跡型半導体コンプトンカメラの実現へ向け、これらの基礎開発を進めていく。

3. 研究の方法

申請者が研究開発しているイベント駆動型 SOI ピクセル検出器による電子飛跡型半導体コンプトンカメラを実現するための課題は、1) 分光性能の向上、2) 大面積素子の開発、および、3) 電子飛跡型半導体コンプトンカメラ用多層化基板の開発である。

1) 分光性能の向上: 分光性能の向上のため、ノイズの低減が重要となる。これは、センスノード部容量の低減による電荷変換ゲインの増加が効果的である。申請者は、新たにダブル SOI (Double-SOI) 構造(図 1)を導入し、センスノード部容量の低減を図った。これは、

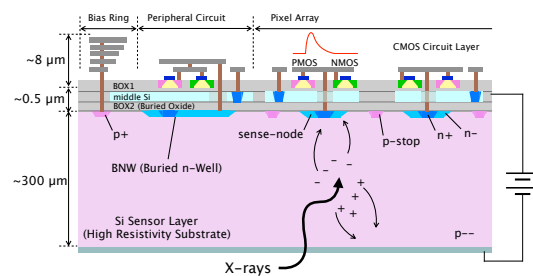


図 1. ダブル SOI 構造の模式図。

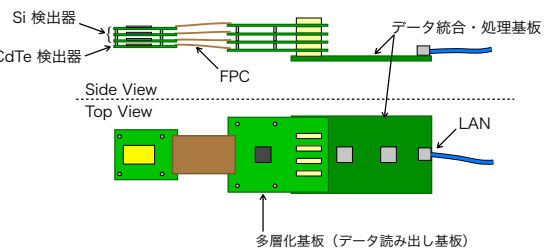


図 2. 本研究で製造する原理実証用プロトタイプの様式図。Si 検出器がイベント駆動型 SOI ピクセル検出器である。

近接する回路・センサ間のシールド層としても働き、両者の容量結合を切ることで、信号の干渉も抑えることができる。

2) 大面積素子の開発: コンプトンカメラ用途に限らず、検出器をアプリケーションとして活用するには大面積化が重要となる。実際にプロトタイプを設計し、大面積化における課題の洗い出しを行う。

3) 多層化基板の開発: コンプトンカメラの原理実証には、検証用のプロトタイプ実機が必要である。そのための多層化基板を開発する。既存のシステムをベースに、新たに多層化基板を設計する(図 2)。製造した多層化基板を用いて原理実証を進めていく。

4. 研究成果

1) 分光性能の向上: デバイス構造シミュレーションにより、新たに導入したダブル SOI (D-SOI) 構造の最適化を行った。その結果、センスノード部容量を低減するセンサ構造を実現することができた。そして、検出器の読み出しノイズも低減した。従来型のシングル SOI (S-SOI) のノイズが 48 電子 (RMS) であるのに対し、D-SOI では 16 電子 (RMS) を達成した。これは、我々のこれまでの記録である 35 電子 (RMS) を大きく上回る性能である。図 3 は、イベント情報を用いず取得した D-SOI・S-SOI の ^{57}Co 線源におけるスペクトルの比較である。6.4 keV の輝線に対する半値幅は、S-SOI では 7.8%、D-SOI では 4.5% である。これらの開発結果は、国内・国際学会で発表済みであり [2-3] [7]、投稿論文として出版予定である。

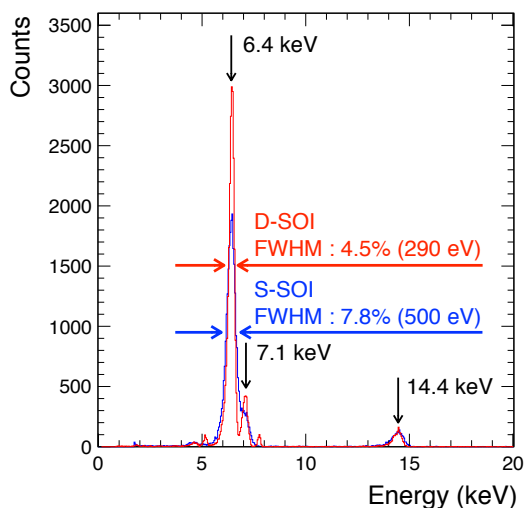


図 3. ダブル SOI (赤) とシングル SOI (青) による ^{57}Co 線源のスペクトル比較。

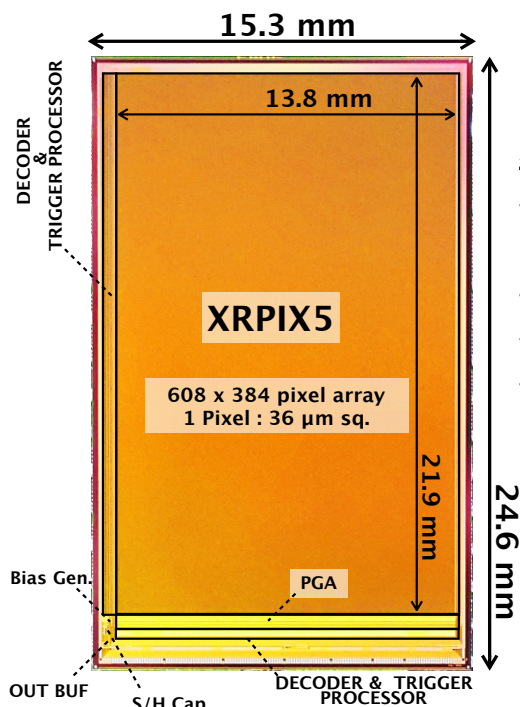


図 4. 設計した大面積素子 (XRPIX5)。

2) 大面積素子の開発：大面積化における課題の洗い出しを行うため、大面積素子を設計した。図 4 は、実際に申請者が設計したイベント駆動型 SOI ピクセル検出器である。問題無く動作し、スペクトル取得に成功した。

イベント情報を効率よく処理するために、検出パターン処理回路を開発し、素子内周辺回路へ導入した。これにより、タイミング・ヒット位置だけでなく、パターン情報も同時に得ることが可能となった。これは、本来の目的である宇宙 X 線観測にとっても有効な機能である。これらの開発結果は、国内・国際学会で発表済みであり [5-6] [8-12], 投稿論文として出版予定である。

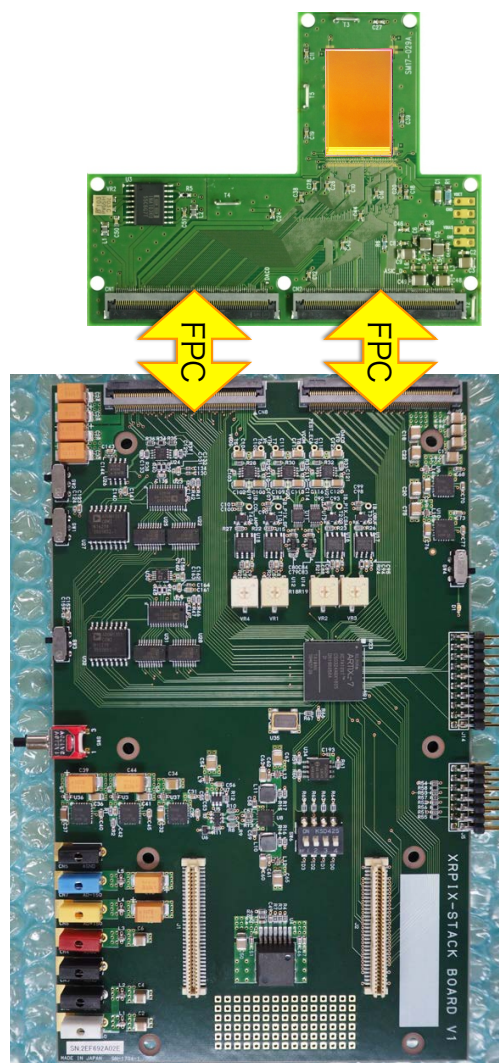


図 5. 本研究で設計・製造したチップ基板 (上) と多層化基板 (下)。

3) 多層化基板の開発：コンプトンカメラの原理実証を行うために必要なプロトタイプ実機として多層化基板を開発した。さらに、多層化基板に適合したチップ基板も開発した。図 5 は、本研究で開発した基板である。チップ基板には、2) で開発した大面積素子を実装した。多層化基板は、FPGA(Artix7)を搭載しており、イベント駆動型 SOI ピクセル検出器の制御とデータ読み出し、そして、データ統合・処理基板 (既存の基板) とのやり取りを行う。チップ基板と多層化基板は、FPC で接続している。これらのシステムによるスペクトル取得は成功しており、原理実証のための実験を進められる準備が整った。これらの開発結果は、国内学会で発表済みである [1] [4]。

本研究では、申請者が研究開発しているイベント駆動型 SOI ピクセル検出器による電子飛跡型半導体コンプトンカメラを実現するための基礎開発を行った。分光性能の向上、大面積素子の開発、多層化基板による原理実証

のためのシステム開発を遂行することができた。また、コンプトンカメラ実現へ向けた電子飛跡再構成の基礎研究も進めることができた。この結果は、査読付き投稿論文として出版済みである[2-3]。本研究で得られた成果を基に、今後は原理実証と課題解決へ向けた研究開発を進めていく。

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 6 件)

1. H. Kamehamai, S. Kawahito, S. Shrestha, S. Nakanishi, K. Yasutomi, A. Takeda, T. G. Tsuru, Y. Arai, “A Low-Noise X-ray Astronomical Silicon-On-Insulator Pixel Detector Using a Pinned Depleted Diode Structure”, *Sensors*, **18**, 27-43, 2018, doi: 10.3390/s18010027, 査読有
2. Y. Yoshihara, K. Shimazoe, Y. Mizumachi, H. Takahashi, K. Kamada, A. Takeda, T. G. Tsuru, Y. Arai, “Development of electron-tracking Compton imaging system with 30- μ m SOI pixel sensor”, *Journal of Instrumentation*, **12**, C01045, 2017, doi: 10.1088/1748-0221/12/01/C01045, 査読有
3. K. Shimazoe, Y. Yoshihara, A. Fairuz, A. Koyama, H. Takahashi, A. Takeda, T. G. Tsuru, Y. Arai, “Electron Pattern Recognition using trigger mode SOI pixel sensor for Advanced Compton Imaging”, *Journal of Instrumentation*, **11**, C02030, 2016, doi: 10.1088/1748-0221/11/02/C02030, 査読有
4. M. Itou, T. G. Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, H. Matsumura, S. Ohmura, H. Uchida, S. Nakashima, Y. Arai, I. Kurachi, K. Mori, R. Takenaka, Y. Nishioka, T. Kohmura, K. Tamasawa and C. Tindall, “The first back-side illuminated types of Kyoto’s X-ray astronomy SOIPIX”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **831**, 55 - 60, 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.04.012, 査読有
5. S. Ohmura, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, A. Takeda, H. Matsumura, M. Ito, Y. Arai, I. Kurachi, T. Miyoshi, S. Nakashima, K. Mori, Y. Nishioka, N. Takebayashi, K. Noda, T. Kohmura, K. Tamasawa, Y. Ozawa, T. Sato, T. Konno, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H.

Kamehama, S. Shrestha, K. Hara, S. Honda, “Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto’s X-ray Astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **831**, 61 -64, 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.04.024, 査読有

6. 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, S. Shrestha, “Improvement of spectroscopic performance using a charge-sensitive amplifier circuit for an X-ray astronomical SOI pixel detector”, *Journal of Instrumentation*, **10**, C06005, 2015, doi: 10.1088/1748-0221/10/06/C06005, 査読有

[学会発表] (計 19 件)

1. 武田彩希, 田中孝明, 鶴剛, 立花克裕, 林秀輝, 原田颯大, 島添健次, 中田直樹, 上ノ町水紀, 水町祐貴, 小貫良行, 新井康夫, 他 SOIPIX グループ, 「多層化 SOI ピクセル検出器による電子飛跡型半導体コンプトンカメラの開発」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22 日-25 日), 東京理科大学
2. 武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 武林伸明, 横山聖真, 福田昂平, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 立花克裕, 林秀輝, 原田颯大, 幸村孝由, 萩野浩一, 大野顕司, 根岸康介, 鎌田敬吾, 新井康夫, 倉知郁生, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X線天文衛星搭載用イベント駆動型 SOI ピクセル検出器における分光性能向上のための研究開発」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22 日-25 日), 東京理科大学
3. A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, N. Takebayashi, S. Yokoyama, K. Fukuda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, K. Tachibana, H. Hayashi, S. Harada, T. Kohmura, K. Hagino, K. Oono, K. Negishi, K. Yarita, Y. Arai, I. Kurachi, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, S. Nakanishi, “Design and Development of an Event-driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy”, 11th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) and 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017), OIST, Okinawa, Japan, Dec. 10-15, 2017.

4. 武田彩希, 「多層化 SOI ピクセル検出器による電子飛跡型半導体コンプトンカメラの開発」, Open-It 物理計測技術若手の会・若手研究会 (2017 年 10 月 3 日-6 日), 函館アリーナ
5. 武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 武林伸明, 横山聖真, 福田昂平, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 立花克裕, 林秀輝, 原田颯大, 幸村孝由, 大野顕司, 根岸康介, 鎌田敬吾, 新井康夫, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X線天文衛星搭載を目指した SOI ピクセル検出器の面積素子におけるイベント駆動読み出しの評価」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12 日-15 日), 宇都宮大学
6. A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, N. Takebayashi, S. Yokoyama, K. Fukuda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, M. Itou, S. Ohmura, K. Tachibana, H. Hayashi, T. Kohmura, K. Oono, K. Negishi, K. Yarita, Y. Arai, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Development and Evaluation of an Event-driven SOI Pixel Detector for an X-ray Astronomy", 19th International Workshops on Radiation Imaging Detectors (iWoRiD2017), AGH, Krakow, Poland, Jul. 2-6, 2017.
7. 武田彩希, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 伊藤真音, 大村峻一, 林秀輝, 新井康夫, 森, 浩二, 西岡祐介, 武林伸明, 横山聖真, 幸村孝由, 玉澤晃希, 大野顕司, 根岸康介, 鎌田敬吾, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X線天文衛星搭載を目指したイベント駆動型 SOI 検出器のピクセル構造に関する研究開発」, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17 日-20 日), 大阪大学
8. 武田彩希, 「X線天文衛星搭載へ向けたイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の開発」, 核融合・加速器科学分野合同計測技術ワークショップ (2016 年 10 月 28 日), 自然科学研究機構・核融合科学研究所
9. 武田彩希, 「宇宙 X 線観測へ向けたエレクトロニクス一体型イベント駆動イメージング検出器の開発」, 平成 28 年度研究会「放射線計測における高密度実装フロントエンド回路の先端技術」(2016 年 10 月 17 日), 電気学会, 東京大学 (招待講演)
10. 武田彩希, 「X線天文衛星搭載を目指したイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の面積化へ向けた開発」, Open-It 物理計測技術若手の会・若手研究会 (2016 年 10 月 5 日-7 日), 阿蘇プラザホテル
11. 武田彩希, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 伊藤真音, 大村峻一, 林秀輝, 新井康夫, 森, 浩二, 西岡祐介, 武林伸明, 横山聖真, 幸村孝由, 玉澤晃希, 小澤祐亮, 佐藤将, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X線天文衛星搭載を目指したイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の面積化へ向けた開発」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21 日-24 日), 宮崎大学
12. A. Takeda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, M. Ito, S. Ohmura, H. Hayashi, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, N. Takebayashi, S. Yokoyama, T. Kohmura, K. Tamasawa, Y. Ozawa, S. Sato, S. Nakashima, K. Miuchi, N. Oka, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Design and Development of an Event-driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy and Light Dark Matter Search", 8th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2016), Sestri Levante, Italy, Sep. 5-9, 2016.
13. A. Takeda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Matsumura, M. Ito, S. Ohmura, H. Hayashi, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, N. Takebayashi, S. Yokoyama, T. Kohmura, K. Tamasawa, Y. Ozawa, S. Sato, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Improvement and Evaluation of an SOI Pixel Detector with an Event-driven Readout Mode for an X-ray Astronomy", 18th International Workshops on Radiation Imaging Detectors (iWoRiD2016), Barcelona, Spain, Jul. 3-7, 2016.
14. 武田彩希, 「B01 班の研究開発状況」, 第 6 回 SOI 新学術領域研究会 (2016 年 6 月 28 日-29 日), 北海道大学
15. 武田彩希, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 伊藤真音, 大村峻一, 新井康夫, 森浩二, 西岡祐介, 竹中亮太, 武林伸明, 野田向輝, 幸村孝由, 玉澤晃希, 吉野祐馬, 小澤祐亮, 佐藤将, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X 線天文衛星搭載を目指したイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の開発」, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19 日-21 日), 東北学院大学
16. A. Takeda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Matsumura, M. Ito, S. Ohmura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, K. Tamasawa, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, S. Shrestha, "Development of an Event-driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy - Improvement of an Intra-chip Readout Circuit for Low Noise Performance -",

The 14th Vienna Conference on Instrumentation (VCI 2016), Vienna University of Technology, Vienna, Austria, Feb. 15-19, 2016.

17. 武田彩希, 「次世代の X 線天文衛星の搭載を目指した SOI-CMOS 技術による放射線イメージセンサの開発」, 宮崎大学 特別講演 (2015 年 11 月 11 日), 宮崎大学

18. 武田彩希, 鶴剛, 田中孝明, 松村英晃, 伊藤真音, 大村峻一, 新井康夫, 森浩二, 西岡祐介, 竹中亮太, 幸村孝由, 玉澤晃希, 吉野祐馬, 中島真也, 川人祥二, 香川景一郎, 安富啓太, 亀濱博紀, Sumeet Shrestha, 他 SOIPIX グループ, 「X線天文用 SOI ピクセル検出器における低ノイズ化を目指した素子内新型読み出し回路と評価」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 25 日-28 日), 大阪市立大学

19. 武田彩希, 「次世代 X 線天文衛星搭載を目指したイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の開発」, 計測システム研究会 (2015 年 7 月 24 日-26 日), 大阪大学

[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

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 彩希 (TAKEDA, Ayaki)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号: 40736667