

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21684015

研究課題名（和文）宇宙高精度ガンマ線撮像観測に向けた半導体撮像検出器の開発研究

研究課題名（英文）Developments of semiconductor imaging detectors for high precision gamma-ray imaging observation

研究代表者

渡辺 伸 (WATANABE SHIN)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：60446599

研究成果の概要（和文）：本研究では、ラインガンマ線の高精度な撮像、集光観測を目的に、高い位置分解能とエネルギー分解能を持った半導体撮像検出器として、テルル化カドミウム半導体(CdTe)両面ストリップ検出器の開発、研究を行なった。世界に先駆けて、数100 μ mの位置分解能、1-2keVのエネルギー分解能、3.2cm角という大面積を併せ持つCdTe半導体両面ストリップ検出器を実現し、確立した。また、小型コーデッドマスクカメラ、Si/CdTe半導体コンプトンカメラへの適用を行い、ガンマ線イメージングを実証した。

研究成果の概要（英文）：We have developed CdTe semiconductor imaging detectors with fine position resolution and high energy resolutions for high sensitive observations of gamma-ray lines in the universe. We have achieved and established the CdTe double-sided strip detector which has a few hundred μ m position resolution, 1-2 keV energy resolution, and 3.2cm x 3.2 cm large imaging area. Moreover, we applied the CdTe double-sided strip detectors to the compact coded mask camera and the Si/CdTe semiconductor Compton camera, and evaluated the performance of the gamma-ray imaging.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理(実験), X線天文学, ガンマ線天文学, ガンマ線撮像, CdTe半導体検出器

1. 研究開始当初の背景

高感度、高精度の宇宙観測はどの波長域においても、撮像、集光観測によりなされてきた。そして、現在、感度が欠けている重要な観測帯域の一つが、10keVから数MeVのガンマ線領域であり、それは、有効な撮像、集光観測が実現していないことに大きな原因がある。このエネルギー領域には、511keVの電子陽電子対消滅線を始めとして、多数のラインガンマ線が期待され、それらの空間分布、ドップラーシフトなどが測定

できれば、宇宙の高エネルギー現象や物質の進化を探る直接的なプローブとなりえる。しかし、これまでは、観測感度が足りず、限られたラインガンマ線に対して、検出、非検出や数度といった分解能による大まかな分布が議論されるのみであった。

ラインガンマ線による宇宙観測を開花させるためには、高精度の撮像、集光装置が不可欠であり、国内外で様々な研究が行われている。10-100keVまでは、10keV以下で撮像集光観測を

実現してきた X 線望遠鏡の反射板を多層膜にし、エネルギー範囲を拡大させた硬 X 線スーパーミラーが実現している。さらに、これを高精度化し、数秒角の撮像集光を可能にするものも、太陽といった非常に明るい天体向けではあるが、作られている。さらに、数 100keV から数 MeV の領域では、現在、フランスを中心にガンマ線レンズが研究、開発されている。これは、結晶でのラウエ回折を利用するもので、エネルギーの決まったラインガンマ線に対して、集光観測を行うことが可能である。

このような光学系とともに重要なのが、撮像を行う焦点面検出器である。焦点距離によるが、数秒角という角度分解能には、100 μm 程度の位置検出能力が必要である。また、位置検出能力に加えて、ラインガンマ線に感度を持つために $\Delta E/E \sim 1\%$ のエネルギー分解能、それから、10keV 以上のガンマ線と反応し検出する能力が重要である。従来からあるシリコン半導体やゲルマニウム半導体以外で、ガンマ線向けに大きな原子番号を持ち、室温動作可能な半導体が必要で、テルル化カドミウム(CdTe)やテルル化亜鉛カドミウム(CZT)半導体有望であるが、高精度の撮像可能な検出器として、実用化の域に達しているものは実現していなかった。

2. 研究の目的

本研究では、ラインガンマ線の高精度な撮像、集光観測に向けて、高い位置分解能とエネルギー分解能を持った半導体検出器の開発、研究を行った。これまでに研究してきたテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器、および、アナログ LSI を読み出しに用いた多チャンネル検出器を発展させ、50–200 μm という位置分解能を持つ CdTe 両面ストリップ検出器の実現を図った。研究項目としては、(a) CdTe 半導体上のストリップ電極の構成、(b) ストリップ電極と読み出し LSI の接続、(c) データ処理方法の確立、が挙げられる。また、衛星搭載機器にする際に、不可欠な半導体素子段階での選別方法についての知見を得ることも目的とする。

3. 研究の方法

CdTe 両面ストリップ検出器を試作し、それらの試作機を使って、様々な測定実験を行い、性能を評価していった。ストリップ間隔 60 μm 、ストリップ数 128 のファインピッチ CdTe 両面ストリップ検出器とストリップ間隔 250 μm 、ストリップ数 128、撮像領域 3.2cm 角の大面积 CdTe 両面ストリップ検出器の試作を行なった。

測定実験は、検出器として完成した撮像領域 3.2cm 角の大面积 CdTe 両面ストリップ検出器に対して、行なった。密封ガンマ線源による動作確認、性能確認試験を繰り返し実施するとともに、撮像領域内での詳細な応答を調べるために、SPring8 の硬 X 線ビームラインを用いて、スキャ

ン実験を行った。硬 X 線ビームを 6 μm 角にスリットで絞り、10 μm 間隔で、各検出位置でのデータを取得する実験を行なった。

さらにこの CdTe 両面ストリップ検出器を組み込んだコーデッドマスクカメラやコンプトンカメラとしての実証試験も実施し、装置としての撮像能力を評価した。

4. 研究成果

本研究期間中に、250 μm のストリップピッチを持つテルル化カドミウム(CdTe)半導体両面ストリップ検出器の開発に成功し、実証を行なった。図1が完成した CdTe 半導体両面ストリップ検出器である。撮像面積、3.2cm 角、厚さ 0.75mm、ストリップピッチ 250 μm で、各面に 128 本のストリップ電極を持つ。片方の面のストリップ電極は、プラチナでもう片方の面の電極はアルミで形成されている。この構成でショットキーダイオードになっており、バイアス印可時のリーク電流を低く抑えることができる。電極からの信号は、我々が開発してきた多チャンネルの読み出し LSI を使用し、処理している。この LSI には ADC も内蔵されており、デジタル信号のみで制御できるため、周辺回路部品を減らし、コンパクトな検出器にすることに成功した。



図 1 撮像領域 3.2cm 角大面积 CdTe 両面ストリップ検出器

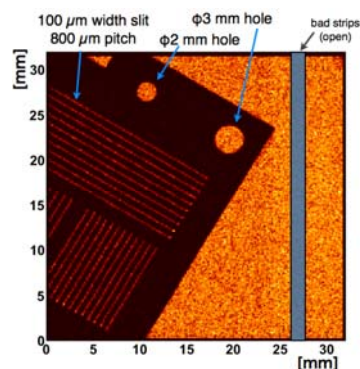


図 2 CdTe 両面ストリップ検出器によるガンマ線イメージ。ガンマ線によるタングステンスリットの影絵。直径 3mm、2mm の穴、100 ミクロン幅のスリットが識別できる。

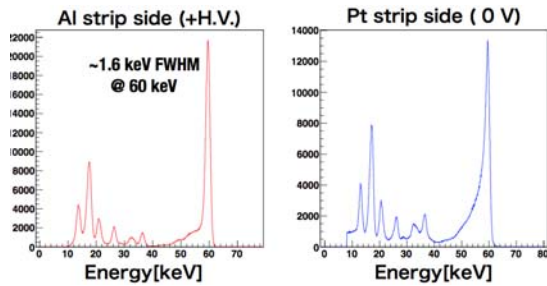


図3 CdTe 両面ストリップ検出器で得られた ^{241}Am からのガンマ線スペクトル。左が Al 側のストリップからのスペクトル。右が Pt 側のストリップからのスペクトル。60keV のガンマ線に対して、FWHM1.6keV のエネルギー分解能を達成。

図2は、この CdTe 両面ストリップ検出器で得られたガンマ線イメージである。また、図3は、得られたガンマ線のスペクトルであり、60keV のガンマ線に対して、FWHM1.6keV のエネルギーを達成している。

SPring8 の硬 X 線ビームラインを用いて、スキャン実験を行い、硬 X 線ビームを $6\mu\text{m}$ 角にスリットで絞り、 $10\mu\text{m}$ 間隔で、各検出位置でのデータを取得し、波高値の均一性、2つのストリップにまたがるイベントの割合、陰極ストリップと陽極ストリップの相関、といった検出器の応答の実測値を得た。結果として、複数ストリップにまたがる一つのストリップにのみエネルギーが検出されるかという情報を使うことで、ストリップピッチの $250\mu\text{m}$ より優れた $200\mu\text{m}$ 以下という位置分解能を得ることができると分かった。

1週間、連続で動作させる長期測定を実施し、性能の変化を測定した。結果として、変化の割合は、1週間で 1%以下と小さく、さらにバイアス高電圧印可のオペレーションを工夫することで1ヶ月や1年間という長時間、性能の変化を小さく抑えたまま測定できることを実証した。これは、実際に宇宙観測を行う場合、非常に重要であり、両面ストリップ型の CdTe 半導体検出器では、初めて、実証することができた。

この CdTe 両面ストリップ検出器を組み込んだコーデッドマスクカメラやコンプトンカメラとしての実証試験を行い、ガンマ線イメージングに成功した。図4は、コーデッドマスクカメラで取得した様々な密封ガンマ線源の X 線ガンマ線イメージで、図5は、コンプトンカメラで取得したガンマ線イメージである。

コーデッドマスクカメラでは、この CdTe 両面ストリップ検出器の高い位置分解能を生かすことで、 $400\mu\text{m}$ ピッチの微細なマスクとの組み合わせが可能になり、10cm 程度のコンパクトなカメラが実現した。ガンマ線源を用いて測定を行い、30cm 先で、 $50\mu\text{m}$ の位置決定精度が達成できることを実証した。

コンプトンカメラでは、同じ構成のシリコン両面

ストリップ検出器と積層して、Si/CdTe 半導体コンプトンカメラとして動作させ、測定試験を行った。180° にわたる広視野と優れたエネルギー分解能、角度分解能を実証することができた。

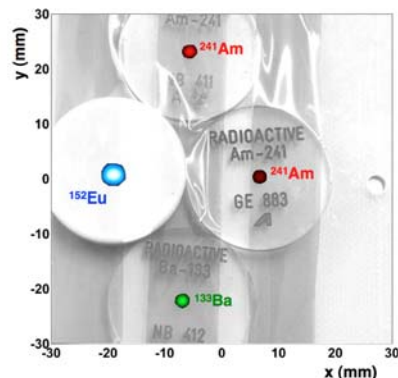


図4 コーデッドマスクカメラで得られた X 線、ガンマ線イメージ。様々な線源からの X 線ガンマ線を同時に測定。それぞれのエネルギーで色分けして、表示している。線源は検出器から45cm先にあり、1mm程度の線源の複数、同時撮像に成功している。

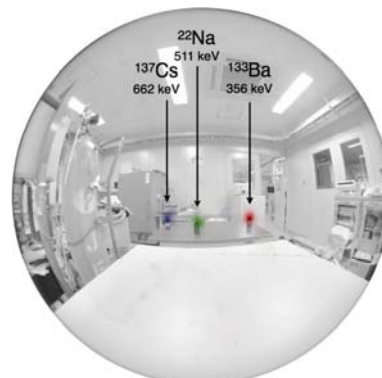


図5 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラによるガンマ線イメージングの例。3種類のガンマ線源に対応するエネルギーのガンマ線イメージをそれぞれ赤、緑、青で同時に表示している。

さらに高い位置分解能を持ったイメージングに向けて、ストリップピッチ $60\mu\text{m}$ 、ストリップ数 128 の CdTe 両面ストリップ検出器の試作に取り組み、CdTe 素子上の電極との接合技術を確認した。CdTe 半導体は、もろく柔らかいため、シリコンストリップ検出器で適用できるワイヤーボンディング技術が使えず、ストリップ電極と読み出し LSI の接続に工夫が必要である。ストリップピッチ $200\mu\text{m}$ 以上であれば、貫通導線と配線を持ったセラミック基板を使い、CdTe ピクセル検出器向けに開発した金バンプ接合技術と組み合わせ、さらにセラミック基板にワイヤーボンディングすることで、この接続を実現していた。しかし、 $60\mu\text{m}$ ピッチでは、セラミック基板上に形成することが可能な配線の幅、間隔の限界のため、新たな

素材での基板開発を行い、その基板による金バンプ接合技術を確立した。次にこの $60\ \mu\text{m}$ ストリップピッチ CdTe 素子を検出器として動作させることを進めていたが、新しい素材の基板を支えてワイヤーボンディングする過程がうまくいかず、本研究期間で $60\ \mu\text{m}$ ストリップピッチの CdTe 両面ストリップ検出器の実現はできなかった。ワイヤーボンディングまでを考慮した基板の設計が課題として残った。

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 5 件)

- ① Sato G., Fukuyama T., Watanabe S., Ikeda H., Ohta M., Ishikawa S., Takahashi T., Shiraki H., Ohno R., "Study of polarization phenomena in Schottky CdTe diodes using infrared light illumination", Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 査読有, A 652 (1), pp. 149-152 (2011)
- ② Odaka, H., Sugimoto, S., Ishikawa, S.-N., Katsuta, J., Koseki, Y., Fukuyama, T., Saito, S., Sato, R., Sato, G., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Takeda, S., Fukazawa, Y., Tanaka, T., Tajima, H., "Development of an integrated response generator for Si/CdTe semiconductor Compton cameras", Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 査読有, A 624 (2), pp. 303-309 (2010)
- ③ Kokubun, M., Watanabe, S., Nakazawa, K., Tajima, H., Fukazawa, Y., Takahashi, T., Kataoka, J., Kamae, T., Katagiri, H., Madejski, G.M., Makishima, K., Mizuno, T., Ohno, M., Sato, R., Takahashi, H., Tanaka, T., Tashiro, M., Terada, Y., Yamaoka, K., "Hard X-ray and gamma-ray detector for ASTRO-H based on Si and CdTe imaging sensors", Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 査読有, A 623 (1), pp. 425-427(2010)
- ④ 渡辺 伸, 佐藤 悟朗、高橋 忠幸、"CdTe 半導体を用いた高エネルギー分解能ガンマ線イメージャーの開発", 放射線, 査読無, 36 (2), 59-78, (2010)
- ⑤ Watanabe, S., Ishikawa, S.-N., Aono, H., Takeda, S., Odaka, H., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakazawa, K., Tajima, H., Onishi, M., Kuroda, Y., "High energy resolution hard X-ray and gamma-ray imagers using CdTe diode devices", IEEE Transactions on Nuclear Science, 査読有, Vol 56 (3), pp. 777-782 (2009)

〔学会発表〕 (計 12 件)

- ① 萩野浩一, 中野俊男, 小高裕和, 佐藤悟朗, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, 牧島一夫, 石橋和紀, 宮澤拓也, 酒井理人, 坂廻邊果林, 加藤大佳, 滝澤峻也, 上杉健太郎, 他 HXI/SGD チーム, ASTRO-H 衛星搭載 HXI 用両面ストリップ検出器の応答の研究, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19-22 日, 龍谷大学
- ② S. Watanabe, S. Takeda, G. Sato, K. Hagino, T. Sato, Y. Ichinohe, S. Saito, T. Fukuyama, M. Ohta, H. Odaka, M. Kokubun, T. Takahashi, High Energy and Position Resolution CdTe Diode Double-Sided Strip Detectors 2011 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 18TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROOM-TEMPERATURE SEMICONDUCTOR DETECTORS, 2011 年 10 月 23-29 日, VALENCIA, SPAIN
- ③ Goro Sato, Taro Fukuyama, Koichi Hagino, Hirokazu Ikeda, Shin'nosuke Ishikawa, Junichiro Katsuta, Motohide Kokubun, Kazuhiro Nakazawa, Hirokazu Odaka, Masayuki Ohta, Shinya Saito, Tamotsu Sato, Tadayuki Takahashi, Shin'ichiro Takeda, Takaaki Tanaka, Shin Watanabe, Recent Developments of Schottky CdTe Diodes and Applications to Imaging Devices, the 17th International Workshop on Room-Temperature Semiconductor X- and Gamma-ray Detectors (RTSD), 2010 年 10 月 30 日-11 月 6 日, Knoxville, Tennessee
- ④ Taro Fukuyama, Shin Watanabe, Shin'nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Shinya Saito, Masanori Ohno, Masayuki Ohta, Goro Sato, Yasuyuki Tanaka, Motohide Kokubun, and Tadayuki Takahashi, Response of CdTe Double-Sided Strip Detectors, Symposium on Radiation Measurements and Applications, 2010 年 5 月 24-27 日, Ann Arbor, Michigan

- ⑤ Goro Sato, Taro Fukuyama, Shin Watanabe, Hirokazu Ikeda, Masayuki Ohta, Shin'nosuke Ishikawa, Tadayuki Takahashi, Photo-induced Polarization and Depolarization Effects in Schottky CdTe Diodes, Symposium on Radiation Measurements and Applications, 2010年5月24-27日, Ann Arbor, Michigan
- ⑥ Shin Watanabe, Shin-nosuke Ishikawa, Taro Fukuyama, Shinya Saito, Hirokazu Odaka, Goro Sato, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Developments of CdTe Diode Double-Sided Strip Detectors, Symposium on Radiation Measurements and Applications, 2010年5月24-27日, Ann Arbor, Michigan
- ⑦ 杉本宗一郎、小高裕和、石川真之介、福山太郎、斉藤新也、渡辺伸、高橋忠幸、藤悟朗、国分紀秀, ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージング検出器に用いる電極分割型 CdTe 素子の応答の研究, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 26 日, 広島県東広島市広島大学東広島キャンパス
- ⑧ 福山太郎, 渡辺伸, 小高裕和, 石川真之介, 杉本宗一郎, 斉藤新也, 国分紀秀, 高橋忠幸, 硬 X 線・軟 γ 線用 CdTe 両面ストリップ検出器の基礎性能, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山県岡山市岡山大学
- ⑨ S. Watanabe, S.-N. Ishikawa, H. Odaka, S. Saito, T. Fukuyama, S. Sugimoto, G. Sato, M. Kokubun, T. Takahashi, "Recent Results of CdTe Diode Double-Sided Strip Detectors", IEEE 2009 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2009 年 10 月 24-31 日, Orlando, Florida
- ⑩ Shin Watanabe, "Measuring X/Gamma-ray Polarization using a Si/CdTe Compton Camera", VERTEX 2009, 2009 年 9 月 16 日, Netherlands, Putten
- ⑪ 杉本宗一郎, 小高裕和, 福山太郎, 渡辺伸, 石川真之介, 国分紀秀, 高橋忠幸, 硬 X 線, γ 線観測に向けたピクセル分割型 CdTe 半導体撮像検出器の応答, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 10 日, 兵庫県神戸市甲南大学岡本キャンパス

- ⑫ 渡辺伸, CdTe 半導体を用いた高エネルギー分解能ガンマ線イメージャーの開発 2009 年秋季学術講演会 放射線分科会 企画「室温動作半導体放射線検出器の最新動向」, 2009 年 9 月 9 日, 富山県富山市 富山大学

〔図書〕 (計 2 件)

- ① Tadayuki Takahashi, Shin Watanabe, Shin-nosuke Ishikawa, Goro Sato, Shin'ichiro Takeda, "High-Resolution CdTe Detectors and their Application to Gamma-Ray Imaging", Sensor Technologies: Biological and Medical Sensors, chapter 14, (2011)
- ② Takahashi, T., Watanabe, S., Ishikawa, S., "High-Resolution CdTe Detectors and Application to Gamma-Ray Imaging", Semiconductor Radiation Detection Systems", Chapter 8, CRC Press, (2010)

〔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.astro.isas.jaxa.jp/~watanabe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺伸 (WATANABE SHIN)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：60446599