

平成21年 6月17日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2007年度～2008年度
 課題番号： 19740172
 研究課題名 (和文)
 テルル化カドミウム半導体を用いた高精度ガンマ線プローブの開発、実証研究
 研究課題名 (英文)
 Development and Experimental Study of CdTe Semiconductor Gamma-ray Probes
 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・宇宙科学研究本部・助教
 研究者番号：60446599

研究成果の概要：テルル化カドミウム半導体検出器を用いた高精度ガンマ線プローブを開発し、それを用いてガンマ線源の3次元位置検出法の実証を行った。1.4mm角ピクセルを持つCdTe検出器を4段積層したプローブを製作し、様々な線源からのガンマ線を用いた実証実験を通して、3次元の位置検出法を確立した。また、コンプトンカメラとして3次元イメージング手法を発明し、数cm先で、約1mmの位置分解能を達成できることを実測で確認を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	2,200,000円	0円	2,200,000円
平成20年度	1,100,000円	330,000円	1,430,000円
総計	3,300,000円	330,000円	3,630,000円

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：粒子測定技術、ガンマ線検出器、CdTe半導体

1. 研究開始当初の背景

X線、ガンマ線は、様々な分野において、対象物を調査、探査するために使用されており、エネルギー分解能と位置検出能力を兼ね備えたX線、ガンマ線検出器は、それぞれの目的のために重要な役割を担う。特に、数十keVから数MeVの硬X線、ガンマ線は、その物質に対する透過力や放射性同位体からの核ガンマ線といった観点から重要なエネルギー領域であるが、高い感度の検出器はなかなか実現していない。よりエネルギーの低いX線領域(<10 keV)では、シリコン半導体が有効な検出体となるため、X線CCDなど優れた性能を持つ検出器が実用化されているが、軽いシリコン半導体が検出体としての

役割を果たさなくなるそれより高いエネルギー領域では、シンチレータやゲルマニウム半導体検出器が実用化されるのみである。シンチレータを使った測定では、原理的に高いエネルギー分解能は得ることはできず、また、ゲルマニウム半導体検出器では、液体窒素温度までの冷却が必須のため、多数の信号読み出しを行い、位置検出能力を持たせることに困難が伴う。

テルル化カドミウム(CdTe)半導体は、近年、硬X線、ガンマ線検出器の素材として、国内外で盛んに研究され、注目されてきている。比較的大きな原子番号(48, 52)と高い密度(5.8 g/cm³)を持ち、シリコン半導体が透明になってくる領域でも、検出能力を持ち、また、

室温や簡便システムによる冷却温度での動作が可能である。しかしながら、高エネルギー分解能と位置検出能力を持つような CdTe 検出器となると、均一な CdTe 素子、電極形成、電極との接合、低ノイズ多チャンネル読み出し LSI といった確立されていなかった要素が多く、実現には困難が伴っていた。

我々は、これまでに宇宙硬 X 線、ガンマ線の高感度観測に向けて、この CdTe 半導体検出器の基礎的な研究や CdTe を使った検出器システムの研究を行ってきた。その中で、(1) 電極素材を工夫した高いエネルギー分解能を持った CdTe 半導体検出器の実用化、(2) 電極の一方を細かく分割したピクセル検出器において、ピクセル電極と読み出し部との接合方法の確立、(3) 半導体検出器用の低ノイズ (エネルギー分解能 ~ 1 keV)、多チャンネルアナログ LSI (1chip で 32ch/64ch を処理) の開発、(4) そのアナログ LSI と CdTe ピクセル検出器を組み合わせた検出器モジュールの開発といった世界的にも先駆けた研究を進めてきていた。

2. 研究の目的

本研究では、CdTe 半導体ピクセル検出器を複数積層したガンマ線プローブを開発し、それを用いて、3次元位置決定法を実証し、手法を確立することを目的とした。この3次元位置決定方法は、複数の積層型検出器、もしくは、ピクセル型検出器を積層した検出器を用いて、各層、各ピクセルのカウント数のパターンを得ることにより、ガンマ線源の位置を3次元的に決定できるというもので、特許も取得済みである。この手法には、硬 X 線、ガンマ線に対して、高い検出効率を持つ検出器が求められる。さらに高いエネルギー分解能を持つとエネルギーごとのカウント数のパターンを精密にとれるという利点があり、CdTe 半導体検出器は最適と考えられる。そこで、このガンマ線プローブには、これまでに開発研究してきた CdTe ピクセル検出器モジュールを適用し、それらの持つ高いエネルギー分解能の利点を測定実験で実証することにした。

3. 研究の方法

CdTe 半導体検出器モジュールを積層したガンマ線プローブを製作し、それを用いて、測定実験を行った。使用した検出器モジュールでは、ピクセルサイズ 1.4 mm 角で $8 \times 8 = 64$ ピクセルを持つ CdTe を 64 チャンネルの ASIC で読み出す。ガンマ線プローブとして、これを 2×2 にタイル状に並べ、さらにこれを 2mm ピッチで 4 段積層したものを製作した (図 1)。測定実験では、様々なガンマ線を放出する放

射性同位体の点線源を検出器の各所に置き、データを取得した。

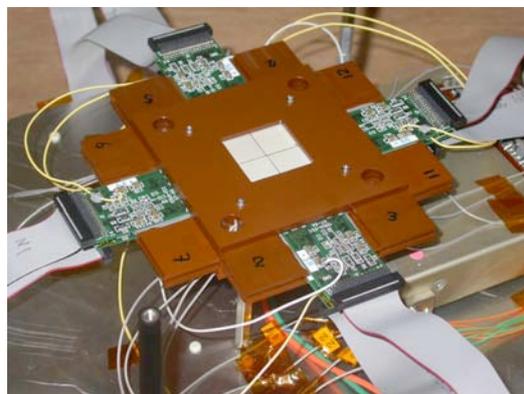


図 1

さらに、理化学研究所や群馬大医学部/原子力研究機構と協力し、非密封線源を用いた測定実験も行った。非密封線源を用いることで、点線源だけでなく、形を持ち広がったガンマ線源に対するイメージング手法に関する実証実験も可能になった。

このガンマ線プローブをさらに発展させる新しい CdTe 半導体撮像検出器を目指し、新しい電極を持った CdTe 半導体素子についても、試験を行った。その結果、可能となった新しい CdTe 半導体撮像検出器の試作を行い、性能評価試験を行った。

4. 研究成果

CdTe ピクセル検出器モジュールを 4 段積層したガンマ線プローブ (図 1) を製作し、3次元位置決定法の実証実験を行った。様々な線源からのガンマ線のスペクトル取得に成功し、また、各ピクセルのカウント数分布を実験的に得た。図 2 にこのガンマ線プローブで取得した ^{133}Ba からのガンマ線スペクトルを示す。各層ごとのスペクトルをカラーでそれぞれ表示してある。得られたエネルギー分解能は、FWHM 2-3 keV と非常に優れたものであった。

コンプトンイメージングの手法を加えることができれば、ガンマ線源の距離、位置だけでなく、その形を 3次元的にイメージングできるようになる。ガンマ線プローブの実験で得られた高いエネルギー分解能は、エネルギーの識別に重要であるだけでなく、コンプトンカメラとして動作させる上で、十分な性能で、有用であることがわかった。そこで、この CdTe ガンマ線プローブをコンプトンカメラの吸収体検出器として利用し、さらにシリコン半導体撮像検出器を加えた半導体コ

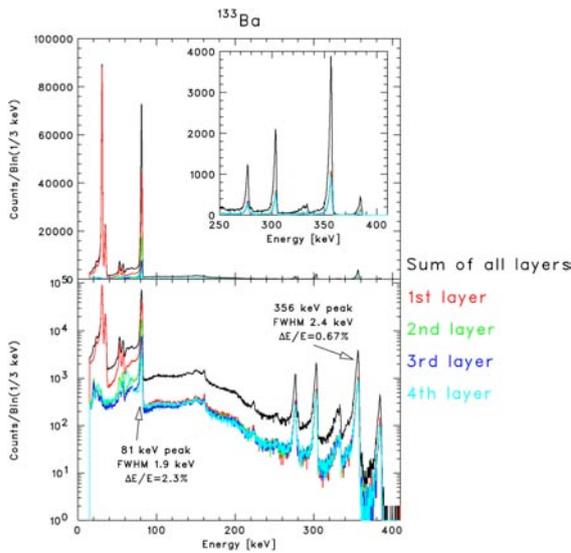


図 2

ンプトンカメラを構築し、測定実験を行った。点線源のイメージングから、角度分解能を測定し、ガンマ線のエネルギーにもよるが、FWHM 2 度の角度分解能が達成できた。また、非密封線源を用いて、広がった線源に対するイメージング実験を行った。図 3 は、その一例である。3mm の隙間を持つ C の形をしたろ紙に 364 keV のガンマ線を出す放射性同位体 ^{131}I が染み込ませてある。これを 3cm 先に置いて、測定し、取得データからイメージを描いたものが図 3 の右である。C の形を再現し、さらに 3mm の隙間をきれいに分解している。コンプトンカメラにより、このような高精度のイメージングに成功しているのは、世界的にも他にはなく、この CdTe ガンマ線プローブを利用した半導体コンプトンカメラは先駆的なものである。

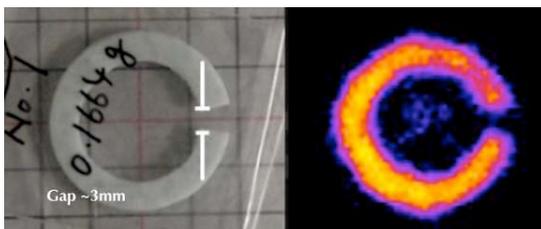


図 3

新しい電極を使用した CdTe 半導体検出器を基礎から試験し、それを利用した新しい CdTe 撮像検出器の開発の芽だしを行うことができた。これまでは、一方の電極に Pt、もう一方に In を用いた CdTe 素子の研究を進めてきたが、新たに Pt と Al を電極に用いた素子の基礎試験を行い、同等の性能を発揮することを確認した。In では、電極を微細に分割

し、ピクセルやストリップ電極を形成することが難しかったが、Al では、それが可能となる。そこで、Pt、Al それぞれをストリップ電極に分割した CdTe 両面ストリップ検出器の開発を行った。両面ストリップ検出器では、ピクセル検出器に比べ、比較的少ない現実的な読み出しチャンネル数で、高い位置分解能と大面積を同時に実現できる。CdTe 両面ストリップ検出器の実現には、この CdTe 素子の電極だけでなく、両面の電極と ASIC との接合に困難が伴うが、これまでピクセル検出器モジュールで培った技術を工夫することで、克服した。図 4 が世界的にも初めて実現に成功した CdTe 両面ストリップ検出器である。初期の性能試験を行い、400 μm の位置分解能と FWHM ~ 2 keV という高いエネルギー分解能を実証した。今後、この両面ストリップ型の CdTe 撮像検出器が実用化され、ガンマ線プローブやコンプトンカメラへ適用が可能になれば、さらなる高精度の位置検出やガンマ線イメージングへの道が開かれることになる。



図 4

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. Shin Watanabe, Shin-nosuke Ishikawa, Hiroyuki Aono, Shin'ichiro Takeda, Hirokazu Odaka, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa, Hiroyasu Tajima, Mitsunobu Onishi, Yoshikatsu Kuroda, "High energy resolution hard X-ray and gamma-ray imagers using CdTe diode devices", IEEE Transactions on Nuclear Science, 査読有, 2009年, 掲載決定済
- ②. Shin'ichiro Takeda, Hiroyuki Aono, Sho Okuyama, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Shin Watanabe, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa, Hiro Tajima, Naoki Kawachi, "Experimental results of the gamma-ray imaging capability with a Si/CdTe semiconductor Compton camera", IEEE Transactions on Nuclear Science, 査読有, 2009年, 掲載決定済
- ③. Shin Watanabe, Shin-nosuke Ishikawa, Shin'ichiro Takeda, Hirokazu Odaka, Takaaki Tanaka, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa, Masaaki Yamazato, Akira Higa, Sakari Kaneku, "New CdTe Pixel gamma-ray detector with pixelated Al Schottky anode", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 46(9A), 2007年, pp.6043-6045
- ④. Shin Watanabe, Shin'ichiro Takeda, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Masayoshi Ushio, Takaaki Tanaka, Kazuhiro Nakazawa, Tadayuki Takahashi, Hiroyasu Tajima, Yasushi Fukazawa, Yoshikatsu Kuroda, Mitsunobu Onishi, "Development of semiconductor imaging detectors for a Si/CdTe Compton Camera", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 査読有, A 579, 2007年, pp.871-877

[学会発表] (計6件)

- ①. Shin Watanabe, "High Energy Resolution Gamma-Ray Imagers Using CdTe Diode Devices", The first West Coast meeting of the Symposium on Radiation Measurements and Applications, 2008年6月3日, 米国、カリフォルニア州バークレー

- ②. 青野博之, 石川真之介, 武田伸一郎, 渡辺 伸, 高橋忠幸, 中澤知洋, "硬 X 線, γ 線観測に向けたショットキー型 CdTe 半導体検出器の性能評価", 日本天文学会 2008 年春季年会, 2008 年 3 月 25 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ③. 石川真之介, 青野博之, 渡辺 伸, 武田伸一郎, 小高裕和, 高橋忠幸, 中澤知洋, 田中孝明, 兼久盛, 比嘉 晃, 黒田能克, 加藤昌浩, 大西光延, "X 線・ γ 線観測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像検出器 II", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学
- ④. 武田伸一郎, 渡辺 伸, 高橋忠幸, 小高裕和, 石川真之介, 青野博之, 田島宏康, 深沢泰司, "Si と CdTe を用いた半導体コンプトン望遠鏡の開発 VI", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学
- ⑤. 青野博之, 石川真之介, 小高裕和, 武田伸一郎, 渡辺 伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, "宇宙ガンマ線観測に向けたショットキー型 CdTe 半導体検出器の評価実験", 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 22 日, 北海道大学
- ⑥. 石川真之介, 渡辺 伸, 武田伸一郎, 小高裕和, 青野博之, 高橋忠幸, 中澤知洋, 田中孝明, "X 線・ γ 線観測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像検出器", 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 22 日, 北海道大学

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: コンプトンカメラ

発明者: 山口充孝, 渡辺伸ほか

権利者: 群馬大学, 日本原子力研究開発機構, 宇宙航空研究開発機構, 三菱重工

種類: 特許権

番号: 特願 2008-213928

出願年月日: 2008 年 8 月 22 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計1件)

名称: 放射線源位置検出方法、及び放射線源位置検出システム

発明者: 黒田能克, 益子良和, 高橋忠幸, 渡辺 伸

権利者: 三菱重工, 宇宙航空研究開発機構

種類: 特許権

番号: 特許第 4238373 号

取得年月日: 2009 年 1 月 9 日

国内外の別：国内

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

科学研究本部・助教

研究者番号：60446599