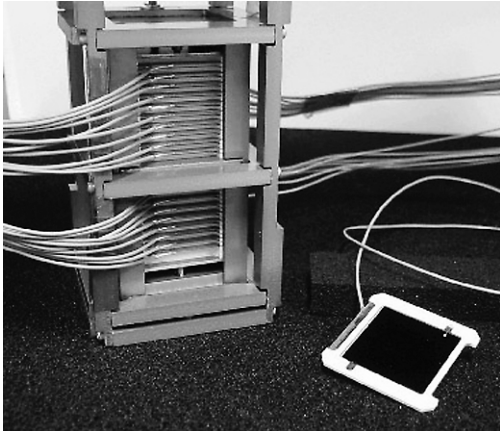


高エネルギー分解能を持つ次世代のガンマ線センサ

The Next Generation Gamma-ray Sensor with High Energy Resolution

黒田 能 克 笹原 松 隆
諫 山 武 志 玄 蕃 恵



当社は宇宙科学研究所（宇宙科学研究所次世代探査機研究センター高橋研究室）と共に、宇宙において高いエネルギー領域で起こっている様々な現象を精密に観測するために、天文衛星に搭載するガンマ線センサの研究を行っている。今回、MeVを超える高エネルギーのガンマ線を高い精度で分光することを目的として、化合物半導体テルル化カドミウム（CdTe）を使った40段スタック型ガンマ線センサを開発した。本センサによる試験の結果、CdTeを用いたセンサでは世界で初めて、6.1 MeVの高エネルギーガンマ線をFWHM 1～2%の高精度で分光することに成功した。本論文では、今回開発したセンサの概要及び測定試験結果について紹介する。

1. はじめに

宇宙には、高温・高エネルギー現象に由来するX線・ガンマ線光子が存在している。宇宙を知るためには、X線・ガンマ線の観測を行い、この現象を解明する必要がある。

X線観測は1960年代に始まり、現在では非常に高精度な観測が行えるようになってきている。その結果、あらゆる天体からのX線放射が観測され、これまで不可能とされていた現象をとらえることができるようになってきている。

しかし、このような高精度な観測は、エネルギー領域が10 keV以下のX線光子に対してのみ行われており、それ以上の高いエネルギーを持つガンマ線と呼ばれる領域では、高い感度を持つセンサが開発されておらず観測が困難であった。

そこで我々は、宇宙科学研究所（2003年10月1日から“宇宙航空研究開発機構”に改称）と共同で、40段スタック型ガンマ線センサ（以降、スタック型センサと称する）を開発した。

2. X線センサの概要

X線観測を行うためのセンサには、様々な方式があるが、高精度な観測を行うために、特にエネルギー分解能^(注1)が優れている半導体センサによる方式を採用した。

注1：FWHM（Full Width at Half Maximum）が小さいほど、分解能が優れている。

半導体センサは図1に示すとおり半導体に電極を付けたセンサ本体と、これに電場を発生させるためのバイアス電圧、並びにX線光子から変換された電気信号を増幅及び整形して出力する読み出し部から構成される。

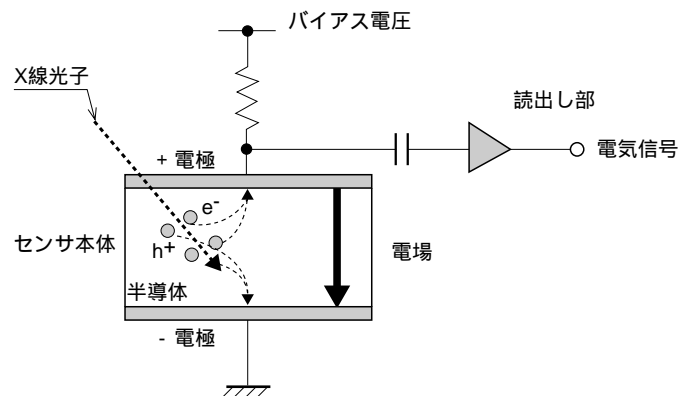


図1 半導体センサの検出原理 半導体センサの構成と動作原理を示す。

半導体内にX線光子が入射すると、X線光子のエネルギーが半導体に吸収され、そのエネルギー量に見合う電子/正孔が作られる。バイアス電圧により半導体には+電極から-電極の方向に電場が発生しているため、発生した電子/正孔は、電場に沿って電子は+電極に、正孔は-電極に引き寄せられる。この時に電子及び正孔の動きによって生じる微小な電流を、読み出し部をとおして電気信号として出力することができる。

電気信号の大きさは、センサ内で発生した電子/正孔の数に比例するため、入射したX線のエネルギーの大きさを電気信号の大きさとして知ることができる。ただし、半導体内では、電子や正孔の一部は再結合等により失われてしまうものもあり、これは半導体の素材に依存するパラメータである。その検出器が、発生した電子/正孔のもつ電気信号をどれだけ収集しきれんかを電荷収集効率という。

表1 各種半導体特性比較

	CdTe	Si	Ge	特 徴
密度 (gcm ⁻³)	5.9	2.3	5.3	大きいほど、検出効率が高い
原子番号Z	48.52	14	32	
バンドギャップ (eV)	1.44	1.12	0.67	小さいほど、熱の影響を受ける
μ_e (V ⁻¹ cm ²)	$\sim 2 \times 10^{-3}$	0.42	0.72	小さいほど、電子が電極に引き寄せられにくい
μ_h (V ⁻¹ cm ²)	$\sim 1 \times 10^{-4}$	0.22	0.84	小さいほど、正孔が電極に引き寄せられにくい

3. 40段スタック型ガンマ線センサの開発

3.1 化合物半導体テルル化カドミウム (CdTe)

従来の半導体センサ本体には、主にシリコン (Si) 半導体やゲルマニウム (Ge) 半導体が使われている。しかし、これらの半導体でよりエネルギーの高いガンマ線光子を検出しようとすると、次のような問題がある。

Si半導体では原子番号が小さいため、入射したガンマ線光子の多くが全く反応を起こさずにそのまま通り抜けてしまい、十分な検出効率^(注2)を得ることが難しい。

次に、Ge半導体では原子番号が大きいため検出効率が高い。さらに、バンドギャップ^(注3)が小さいうえ、電子と正孔の移動度 μ と寿命の積 $\mu \tau$ が大きいことから、電荷収集効率が高く、入射したX線光子のエネルギーをより正確に電気信号に変換できるため、優れたエネルギー分解能を得られる。

しかし、バンドギャップが小さいため、室温では熱による電子/正孔が半導体内に数多く発生してしまうことからリーク電流が大きくなり、液体窒素温度 (-196) 環境でしかセンサとして優れた能力を発揮しない。液体窒素冷却の設備は運用上の大きな制約となる。

注2：センサを通過したX線のうち、何%のX線を検出することができたかを表している。

注3：最外殻電子が自由電子になるために必要なエネルギー。

そこで我々は、近年注目されている化合物半導体CdTeをセンサの素材に採用した。CdTe半導体と従来半導体の特性比較を表1に示す。CdTe半導体をガンマ線領域のセンサとして使用する場合、下記に示すような特徴がある。

(1) 検出効率が高い

CdTe半導体は、SiはもとよりGeと比較しても原子番号が大きいため、図2に示すように非常に優れた検出効率を持っている。図2は40 keVのX線光子に対する各半導体の検出効率を厚さの関数として比較したものである。CdTe半導体は厚さ0.5 mmもあれば、ほぼ90%の検出効率があるのに対し、Si半導体では10%、Ge半導体でも75%である。

(2) 室温動作が可能

Ge半導体のバンドギャップは0.67 eVと小さいため、熱の影響を受けやすく、液体窒素温度 (-196) という極低温の動作環境が必要となる。それに対し、CdTe半導体のバンドギャップは1.4 eVと比較的大きく、室温動作が可能である。

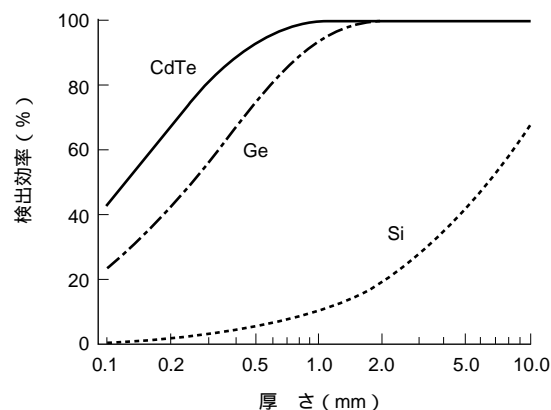


図2 各種半導体センサの検出効率 各種半導体センサの厚さと検出効率の関係を示す。

(3) 低いエネルギー分解能

SiやGe等の従来半導体に比べて、CdTe半導体の $\mu \tau$ 積は小さいため、電荷収集効率は一般に低くなりがちである。これは、エネルギー分解能の劣化の原因となる。

3.2 CdTe半導体の高エネルギー分解能化

前項で述べたように、室温でもセンサとして動作するなど、従来半導体よりも優れている点が多いCdTeであるが、主として電荷収集効率の低さの問題から、そのままでは、X線観測におけるエネルギー分解能の要求に対して、満足いく性能が得られない。そこで我々は、CdTe半導体に対して、以下の2つの対策を行った。

(1) 電極間隔の縮小化

CdTe半導体素子の厚さを薄くすることにより、半導体内で発生した電子/正孔から電極までの距離が短くなり、かつ電極間隔も狭くなることから、同じバイアス電圧でも、より大きな電場が得られるようになる。

(2) ダイオード化

CdTe半導体の電極材料を選択することにより、電極に正孔に対する障壁を生じさせ (ショットキーバリアダイオード化)、電極間のリーク電流を大幅に低減した。これにより、さらに高いバイアス電圧を印加できる。

この2つの対策により、 $\mu \tau$ 積が小さいCdTeでも電子/正孔をより確実に収集できるようになり、数十keVクラスのX線観測に十分なエネルギー分解能を得ることができた。

3.3 センサのスタック (積層) 化

図3に示すように、光子エネルギーと検出器の厚さと検出効率との間には相関があり⁽¹⁾、厚みの薄いCdTeセンサ単体

では、ガンマ線^(注4)のようなX線を超える高エネルギー領域では、十分な検出効率が得られない。一方で3.2の(1)で示したように、厚い検出器では優れたエネルギー分解能を得ることは難しい。そこで、我々は以下に述べるようなスタック型センサを開発した。

注4：ガンマ線は、本質的にX線と同じ電磁波であり、一般的にエネルギーがX線よりも高い。

スタック型センサとは、図4の右側に示してある単体の薄いCdTeセンサを、同図の左側に示してあるように、40枚積み重ねたものである。これにより、高エネルギーに対して、エネルギー分解能を下げることなく高い検出効率を得ることができる。

4. 実証と成果

(1) スタック型センサの実証

スタック型センサの評価試験は図5に示すようなセットアップで行った。スタック型センサ、容器に入れた塩化ナトリウム(NaCl)及びポリエチレンで囲まれた中性子源カリフォルニウム(²⁵²Cf)を直線ライン上に配置した。Cf

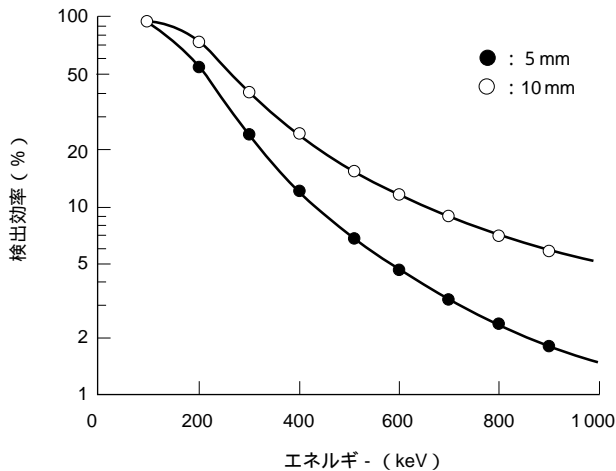


図3 エネルギーと検出効率の関係 半導体センサの厚さ5 mmと10 mmのエネルギーと検出効率の関係を示す。

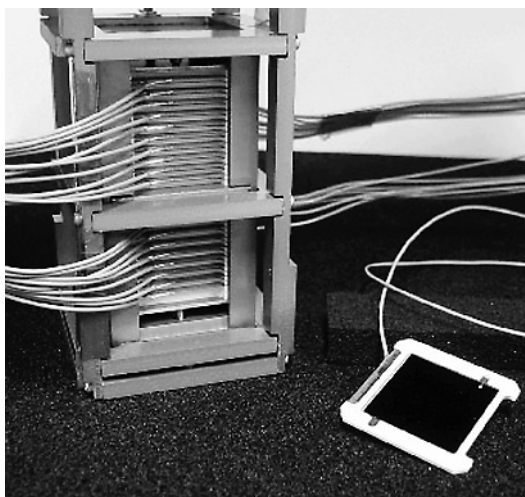


図4 スタック型ガンマ線センサ 今回、開発した40段スタック型ガンマ線センサの外観を示す。

から放射された中性子をNaClに衝突させ、中性子とNaCl分子との相互作用から発生した数MeVを超える2次ガンマ線を測定した。センサの構成は、バイアス電圧350 Vを印加したスタック型センサを中心に置き、その周りをシールドで囲んだ。

測定結果を図6に示す。スペクトルから分かるように、NaClの構成元素である塩素(Cl)の2次ガンマ線の検出に成功した。全エネルギーピーク^(注5)6.1 MeVのラインに加えて、5.6 MeVシングルエスケープピーク^(注6)及び5.1 MeVのダブルエスケープピーク^(注7)がみられており、検出器内でガンマ線が電子・陽電子対生成を起こしていることが分かる。また、ポリエチレンに含まれる水素(H: 2.2 MeV)や検出素子自体のカドミウム(Cd: 559 KeV)の2次ガンマ線もスペクトルから判別することができる。これにより、世界で初めて6 MeVのガンマ線をスタック型CdTeセンサで測定することに成功した⁽²⁾。しかし、得られたエネルギー分解能は2%であり、目標の1%に届いていない。次章に更なる高分解能化のための対策について述べる。

注5：放射線のエネルギーがすべてセンサ内で吸収されたときに検出できるピーク。

注6：放射線によって電子・陽電子対が発生し、そのうち陽電子が再び消滅するときに発生する2つの511 keVのガンマ線のうち、1つを、センサ外へ逃がしてしまったために、全エネルギーピークより低い位置に現れるピーク。

注7：511 KeVのガンマ線を2つとも、センサ外へ逃がしてしまったために、シングルエスケープピークより低い位置に現れるピーク。

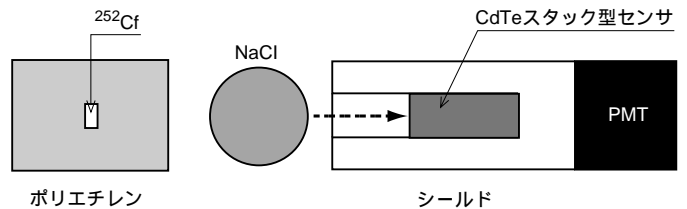


図5 セットアップ図 スタック型センサ評価試験のセットアップの構成を示す。

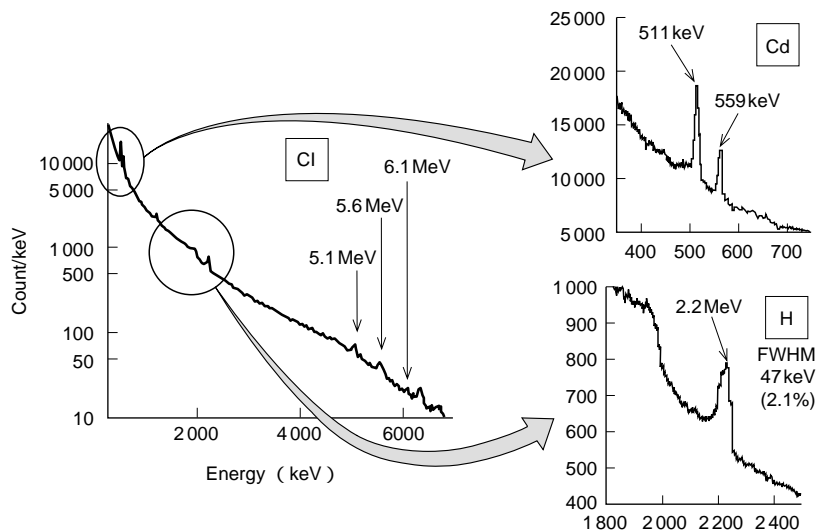


図6 NaClのスペクトル スタック型センサでの測定結果を示す。

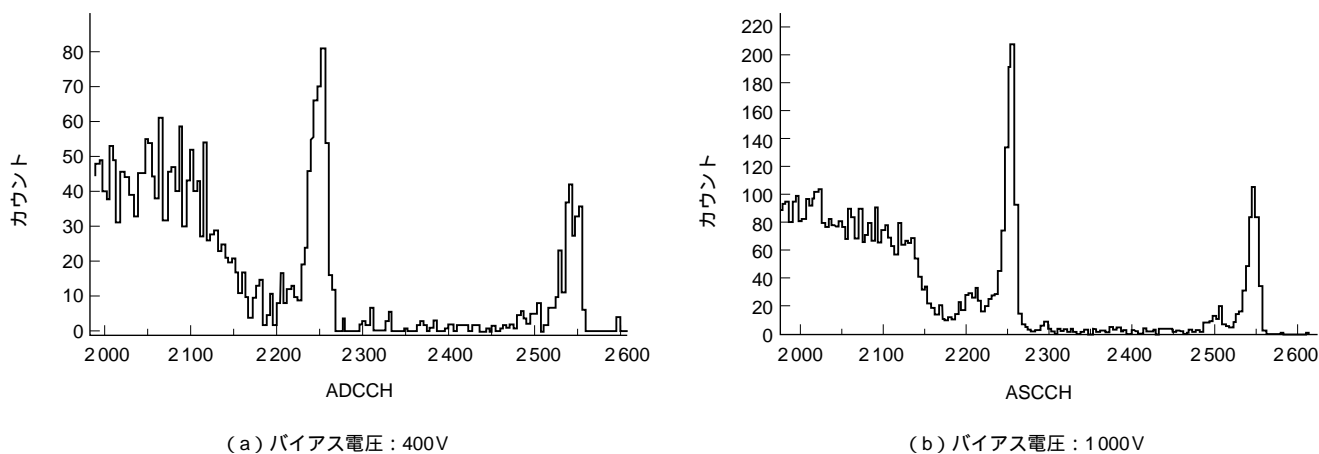


図7 バイアス電圧によるスペクトル測定結果の比較

5. 更なるエネルギー分解能の向上

高分解能化のためには、バイアス電圧を更に高くして、電荷収集効率の一層の向上が必要であるが、高電圧化には、リーク電流の抑制が必要である。抑制の方法として、当社はガードリング電極^(注8)をCdTe半導体素子に初めて本格的に採用した。CdTeダイオード検出器のリーク電流のほとんどは、検出器の端面を流れるため、ガードリング電極に集中する。これによって、信号電極にはリーク電流を心配することなく高いバイアス電圧が印加できるようになる⁽⁹⁾。

注8：ガードリングとは、信号を取り出す電極の周りを別の電極で囲むことにより、リーク電流を抑制する一般的な手法の一つである。リーク電流とは、半導体素子に入射するX線とは無関係に流れ続ける電流で、その揺らぎがノイズとなる。

ガードリング付きCdTe半導体センサを使用して、取得したコバルト60 (^{60}Co : 1.17 MeV, 1.33 MeV) のデータを図7に示す。図7(a)はバイアス電圧400V、図7(b)はバイアス電圧1000Vを印加したものである。エネルギー分解能(FWHM)は1.33 MeVにおいて、21 keVから9.2 keVと劇的に改善され、ガードリング電極の有効性が確かめられた。

6. ま と め

今回、宇宙科学研究所と共同開発した40段スタック型ガンマ線センサによって高エネルギー領域における高エネルギー分解能、高検出効率でのガンマ線分光に成功した。本センサを次期X線天文衛星へ搭載することにより、宇宙での高温・高エネルギー現象をより精密に観測することが可能となる。本センサによって人類が今まで見たことのない、宇宙の新しい側面が浮かび上がってくると予想される。

当社ではX線及びガンマ線領域における画像センサについても開発を進め、世界最先端の成果を得ているが、画像セン

サの詳細については、別の機会に譲る。

高い検出効率、優れたエネルギー分解能を特徴とする本センサは天文衛星への適用を目的として開発を進めているが、衛星のみならず、従来型のX線センサが使われている医療分野、セキュリティ分野及び資源探査分野などさまざまな民生分野で、より短時間に、より精密な測定が可能となり、社会貢献が期待できる。

最後に、本開発に当たり多大なご指導、ご助言を頂いた宇宙科学研究所の高橋忠幸教授、中澤知洋助手及び渡辺伸氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) Tadayuki Takahashi (ISAS). et.al., Recent Progress in CdTe and CdZnTe Detector, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.48 NO.4 AUGUST 2001
- (2) Shin Watanabe (ISAS) & Yoshikatsu Kuroda (MHI). et.al., Stacked CdTe Gamma-ray Detector and its application to a range finder, Symposium on Radiation Measurements and Applications
- (3) 中澤知洋 (ISAS) ほか, CdTe/CdZnTe半導体を用いた宇宙ガンマ線検出器の現状とその応用, 日本電気学会原子力(放射線)研究会(2002年9月)



黒田能克
名古屋誘導推進システム製作所
誘導電子機器技術部
電子機器・ソフト設計課長



笹原松隆
名古屋誘導推進システム製作所
誘導電子機器技術部
電子機器・ソフト設計課主席



諫山武志
名古屋誘導推進システム製作所
誘導電子機器技術部
電子機器・ソフト設計課



玄蕃恵
名古屋誘導推進システム製作所
誘導電子機器技術部
電子機器・ソフト設計課