将来ガンマ線観測に向けたコンプトンカメラ用 シリコンドリフトセンサーの基礎特性評価

広島大学理学部物理科学科 高エネルギー宇宙・可視赤外天文研究室 B114046

岡田 千穂

主查:深沢 泰司 副查:栗木雅夫

2015年2月10日

概要

宇宙に存在する物質の多くは X 線やガンマ線でしか観測できず、そのため X 線やガンマ線を出す天体を観測することは宇宙の進化を理解する上で重要となってくる。しかし、X 線やガンマ線は地球の大気で吸収されてしまうため、人工衛星や気球等を用いずに観測することは困難である。2015 年度打ち上げ予定である次期国際天文衛星 ASTRO-H は、0.3-600keV にもおよぶ広帯域の X 線やガンマ線の高感度観測を実現することで宇宙の進化の解明に繋がると期待されている。その ASTRO-H に搭載される検出器である狭視野コンプトンカメラは Si-Pad センサーが用いられている。

一方、SGD より性能の良いコンプトンカメラの実現のためには、Si センサーの改良を行う必要がある。そのため、Si-Pad センサーの改良とは別にシリコンドリフトセンサーの利用が考えられた。本研究では、試作したシリコンドリフトセンサーの基礎特性の評価を行い、コンプトンカメラを構成するセンサーとして有望であるのかの検証を行う。その先駆けとしてシリコンドリフトセンサーを読み出すための基板の設計、ボンディングや波形測定などを行った。

目 次

第1章	X 線・ガンマ線観測	6
1.1	X 線・ガンマ線による観測	6
1.2	これまでの X 線観測衛星	6
1.3	次期国際天文衛星 ASTRO-H の SGD	7
1.4	本研究の目的	8
第2章	半導体積層コンプトンカメラ	9
2.1	コンプトンカメラ	9
	2.1.1 コンプトン散乱	9
	2.1.2 コンプトンカメラによる観測方法	10
2.2	シリコン半導体センサー	11
	2.2.1 原理	11
	2.2.2 波形 (立ち上がり時間) による反応位置測定	11
	2.2.3 センサー内の移動度	13
	2.2.4 半導体センサーのノイズ源	14
	2.2.5 本研究で用いる回路でのノイズ	15
2.3	シリコンドリフトセンサー	17
	2.3.1 検出原理	17
2.4	ドリフト型シリコンドリフト検出器の原理	19
	2.4.1 空乏層の広がり方	19
	2.4.2 センサー内部の電位差による電子の収集	20
2.5	Si-pad とシリコンドリフトセンサーの比較	21
第3章	シリコンドリフトセンサーの基礎特性評価	24
3.1	本研究で用いるシリコンドリフトセンサーの構造	24
3.2	測定項目とセットアップ	26
	3.2.1 測定項目	26
	3.2.2 暗電流	27
	3.2.3 容量	27
	3.2.4 スペクトル	28
	3.2.5 波形測定 (立ち上がり時間)	29
3.3	実験準備	30
5.5	3.3.1 シリコンドリフトセンサーの基板設計	30
		-

	3.3.2 ボンディングの体験	32
	3.3.3 シリコンドリフトセンサーのボンディング	33
3.4	Si-Pad による波形測定の試行	34
	3.4.1 Si-Pad による波形測定のセットアップ	34
	3.4.2 波形の測定結果	35
3.5	製作されたシリコンドリフトセンサーの基板	37
	3.5.1 第1回目の製作	37
	3.5.2 破損の原因推測	38
	3.5.3 今後の基板製作に向けての対策	39
3.6	第 2 回目の製作	40
		-
第 4 辛		
第4章	まとめと今後	41
第 4 章 4.1	まとめと今後	41
	まとめと今後	41
4.1	まとめと今後 まとめ	41 41
4.1 4.2	まとめと今後 まとめ	41 41 41
4.1 4.2	まとめと今後 まとめ	41 41 41 42 42
4.1 4.2	まとめと今後 まとめ	41 41 42 42 42
4.1 4.2	まとめと今後 まとめ	41 41 42 42 42 43

図目次

1.1	電磁波が届く高さ [1]	6
1.2	X 線天文学の歴史 [3]	7
1.3	ASTRO-H のイメージ図 [1]	7
1.4	SGD の断面図 [4]	8
1.5	コンプトンカメラ用に開発されたシリコンドリフトセンサー	8
2.1	コンプトンカメラで得られるコンプトンコーン	10
2.2	左図:広視野観測でのコンプトンコーン、右図:狭視野観測でのコンプトンコーン	10
2.3	左図:p-n 接合型半導体で生じる電場、右図:半導体センサーの読み出し原理	11
2.4	$\mathrm{p} ext{-}\mathrm{n}$ 接合中で一対の電子正孔対が作る波形 $[9]$	12
2.5	複数チャネルのセンサーの容量	15
2.6	半導体センサーの等価雑音回路 [5]	15
2.7	上図:円柱形ドリフト型検出器、下図:電子のポテンシャル面 [7]	17
2.8	シリコンドリフトセンサーの模式図	18
2.9	ドリフトセンサーの位置決定	18
2.10	ドリフトセンサーの空乏層の広がり方 $[8]$	19
2.11	左図:直線の領域でのポテンシャル、右図:アノード付近でのポテンシャル [8]	20
2.12	左図:SGD の Si-Pad [12] 右図:本研究で用いるシリコンドリフトセンサー \dots	21
2.13	シリコンドリフトセンサーの読み出し部分の拡大図	21
2.14	Si-Pad センサーの構造 [4]	22
3.1	上図:Pside 側の構造 、 下図:Nside 側の構造	24
3.2	本実験で用いるシリコンドリフトセンサーの断面図	25
3.3	ガードリングやインプラントに取り付けられたポリシリコン抵抗..............	26
3.4	読み出しチャネルの暗電流測定のセットアップ	27
3.5	Body 容量測定のセットアップ	28
3.6	ch 間容量測定のセットアップ	28
3.7	スペクトル測定ののセットアップ	29
3.8	波形測定のセットアップ	29
3.9	左図:表基板 右図:裏基板	31
3.10	左図:センサーを乗せた時の表面 右図:センサーを乗せた時の裏面	31
3.11	左図:P 基板と N 基板の間に挟むアクリル板、右図:基板の断面図	32
3 12	ボンディングマシン	33

3.13	練習用基板	33
3.14	読み出し予定の ch	34
3.15	読み出し以外の ch	34
3.16	Si-Pad の波形測定のセットアップ	35
3.17	$-20^{\circ}\mathrm{C}$ での逆バイアス電圧による波形の変化 \dots	36
3.18	Si-pad の反応位置と立ち上がり時間の関係	37
3.19	破損したシリコンドリフトセンサー	38
3.20	左図:PIN ヘッダからセンサーにかかる力、右図:PIN ヘッダからセンサーにかかる力の断面図	39
3.21	シリコンドリフトセンサーの固定方法	39
3.22	左図:到着後のシリコンドリフトセンサー、右図:読み出し付近ののボンディング	40

表目次

2.1	Si-Pad の電子とホールの移動度	14
2.2	Si-Pad とシリコンドリフトセンサーの仕様 [4]	21
3.1	シリコンドリフトセンサーのドリフトインプラントの仕様	26
3.2	基板の仕様	32

第1章 X線・ガンマ線観測

1.1 X線・ガンマ線による観測

宇宙では絶対零度に近い温度から数億度の超高温現象にわたる様々な温度で多くの現象が起こっている。 このような様々な温度の天体から放射される電磁波を観測することで遠方の天体の温度やエネルギーなど の情報を得ることができる。

非常に重力の強いブラックホールや活動銀河核、超新星爆発などの数億度の超高温の領域からは X 線やガンマ線といった高エネルギーの電磁波を放射しており、また、宇宙の 90%以上が X 線を放射する銀河間物質が占めていると考えられている [1]。このような高エネルギーの天体現象は銀河や銀河団の形成に大きく関わっており、宇宙の進化の解明に繋がる。しかし、宇宙からの X 線やガンマ線は地上では観測することはできない。図 1.1 は、大気圏外からくる様々な波長の光が、地上からどれくらいの高さまで届くかを示した図である。これより、X 線やガンマ線は地球の大気で吸収され地上から観測を行うことは困難であり、人工衛星や気球を用いて観測する必要があることが分かる。

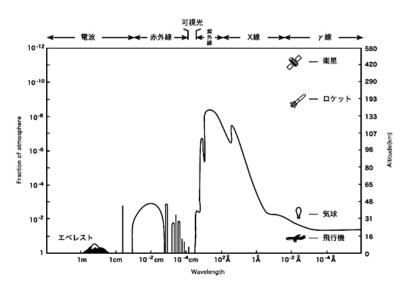


図 1.1: 電磁波が届く高さ [1]

1.2 これまでの X 線観測衛星

恒星や中性子星、ブラックホール周辺から来る X 線の存在は理論的に予測されていたが、宇宙由来の X 線やガンマ線などは地上では観測しにくいので、衛星の開発が行われ、1970 年に NASA によって世界で最初の X 線天文衛星ウフルが打ち上げられた。

日本でも 1979 年にはくちょう (CORSA-b) の打ち上げに成功し、これによって当時発見されたばかりの X 線バースト線源を次々と見つけ、中性子星の研究で目覚しい成果を挙げた [2]。その後も、1983 年にてんま、1987 年にぎんが、1993 年にあすか、2005 年にすざくを打ち上げ、観測性能を大幅に向上させながら継続的に観測を行なってきた (図 1.2)。

そして、従来よりも 10 倍以上の精度で観測を行うことができる、次期国際天文衛星 ASTRO-H が 2015 年度に打ち上げ予定である。これによって、今までは感度が足りなくて観測できなかった生まれたての銀河の中心にある巨大ブラックホールなどの観測を行い、宇宙がどのように進化したのかを探ることができる。

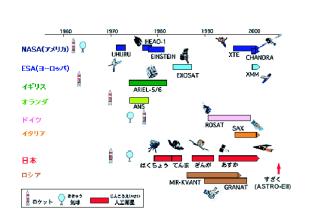


図 1.2: X 線天文学の歴史 [3]



図 1.3: ASTRO-H のイメージ図 [1]

1.3 次期国際天文衛星 ASTRO-H の SGD

より感度の良い観測を行い宇宙の構造や進化を探るために、2015 年度に次期国際天文衛星 ASTRO-H が日本から打ち上げ予定である。この ASTRO-H は、軟 X 線分光検出器 SXS(Soft X-ray Spectrometer)、軟 X 線撮像検出器 SXI(Soft X-ray Imager)、硬 X 線撮像検出器 HXI(Hard X-ray Imager)、軟ガンマ線検出器 SGD(Soft Gamma-rau Detector) の 4 つの検出器を搭載することで、0.3-600keV にもおよぶ広帯域において従来の検出器より 10-100 倍の高感度での観測ができると期待されている。

図 1.4 は軟ガンマ線検出器 SGD の断面図で、 SGD は 4 つの検出器の中で最も高エネルギーの領域である $40\text{-}600\mathrm{keV}$ の観測を行い、観測天体以外からのバックグラウンドを除去するために「井戸型アクティブシールド」と「狭視野半導体積層コンプトンカメラ」を用いている。井戸型アクティブシールドは、コンプトンカメラを囲む部分で BGO 結晶シンチレータで構成されている。また、アクティブシールド自体が検出器として動作し、主検出器と反同時計数をとることで、荷電粒子や荷電粒子由来のガンマ線などのイベントを除去できるので、バックグラウンドの低減につながる。狭視野半導体積層コンプトンカメラは図 1.4 の Si センサーと CdTe が積層されている部分で、ここで入射した X 線やガンマ線がコンプトン散乱や光電吸収を起こすことで光子の到来方向を推定する装置である。この SGD に用いられている Si センサーには構造が簡単で機器に組み込みやすく、コストの低い、 $\mathrm{Si-Pad}$ センサーが用いられており、これは SGD が目標としている性能を十分達成している。

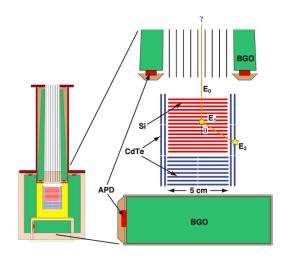


図 1.4: SGD の断面図 [4]

1.4 本研究の目的

Si を用いた検出器で、硬X 線ガンマ線観測衛星で用いられているものには、主に Si-Pad センサーとシリコン両面ストリップセンサーがある。シリコン両面ストリップセンサー は Si-Pad に比べ、高エネルギー分解能、高位置分解能の検出器にするために構造が複雑となるためコストが高い。一方、SGD に用いられている Si-Pad センサーは、構造を簡単にすることでコストを低くすることができるが、シリコン両面ストリップセンサーのように良い分解能を得るために構造を複雑にしたものと比べると分解能が悪い。しかし、SGD の目標性能は Si-Pad センサーで十分に達成できるという理由から、SGD のコンプトンカメラには Si-Pad センサーが使用されている。

SGD より性能の良いコンプトンカメラの実現するためには、Si-Pad センサーの改良を行う必要がある [5]。一方、新たな試みとして構造は Si-Pad に比べてやや複雑になるが、地上実験により位置分解能やエネルギー分解能の向上が期待されるシリコンドリフトセンサーを X 線天文衛星に導入することができないかと考え、コンプトンカメラ用に図 1.5 シリコンドリフトセンサーが開発された。本研究ではシリコンドリフトセンサーがコンプトンカメラを構成するセンサーとして有望であるのかを検証する。



図 1.5: コンプトンカメラ用に開発されたシリコンドリフトセンサー

第2章 半導体積層コンプトンカメラ

2.1 コンプトンカメラ

コンプトンカメラは、コンプトン散乱を用いることでガンマ線源の位置やエネルギーといった情報を得ることができる装置である。 SGD のコンプトンカメラは散乱体である Si センサーと吸収体である CdTe センサーから構成されている。コンプトン散乱しやすい Si センサーでコンプトン散乱させた後に CdTe センサーで光電吸収させることで、この反応を運動学に基づいて再構成できるのでガンマ線源からの情報を得ることができる。

2.1.1 コンプトン散乱

コンプトンカメラ内で起こるコンプトン散乱の模式図を図 2.1 左に示す。エネルギー E_0 で入射した入射光子はまず散乱体の Si センサーで角度 θ だけ変えてコンプトン散乱される。このとき、反跳電子は散乱体の Si センサー内でエネルギー E_1 を失い、散乱光子はエネルギー E_2 で散乱されて吸収体の CdTe センサーで光電吸収される。散乱前の電子のエネルギーを 0 とするとき、エネルギーと運動量の保存則の連立方程式を解くことで、散乱後の光子のエネルギーは、

$$E_2 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2 (1 - \cos \theta)}} \tag{2.1}$$

となる。ただし、 m_e は電子の質量、c は真空中の光速であるとする。このときの入射光子のエネルギーは、

$$E_0 = E_1 + E_2 \tag{2.2}$$

であるので、散乱体と吸収体で吸収されたエネルギー E_1 と E_2 を求めることで、入射光子のエネルギー E_0 を求めることができる。

また、このときの散乱角は式(2.1)より、

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \tag{2.3}$$

と求めることができる。 E_1 と E_2 の入射光子の反応位置から進行方向が測定でき散乱角 θ を求めることができるため、この散乱角から入射光子の到来方向をコンプトンコーンと呼ばれる円錐の側面上に制限することができる。図 2.1 右のように同一の線源からの複数イベントから各コンプトンコーンを求めることで、そのコンプトンコーンの交点が線源からの光子の到来方向であると特定することができる。このようにして、コンプトンカメラは検出器内で起こるコンプトン散乱を運動学に基づいて再構成することで、入射光子からの情報を得ることができる。

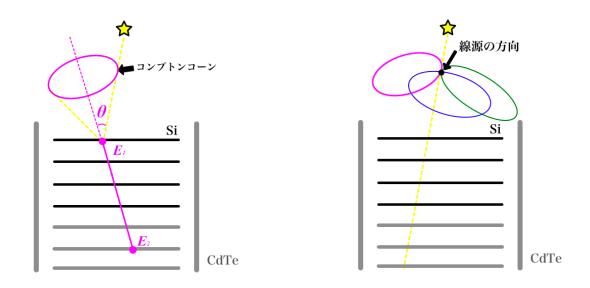


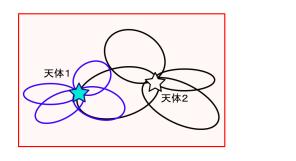
図 2.1: コンプトンカメラで得られるコンプトンコーン

2.1.2 コンプトンカメラによる観測方法

コンプトンカメラは、その視野を広くするか狭くするかで利点が変わり、広視野で観測する方法と狭視 野で観測する方法がある。

図 2.2 左は、赤線が広視野の時に観測できる視野で、天体 1 は青の、天体 2 は黒のコンプトンコーンをそれぞれ作っている図である。広視野観測では、複数の天体、ここでは天体 1 と天体 2 が作るコンプトンコーンから 2 天体の情報を一度に得ることができるという利点がある。このような広視野観測では、未知の天体の探索や個々の天体の明るさの時間変動を追うことができる。

しかし、より感度のよい観測を行おうとすると観測天体以外、ここでは天体 1 を観測したいとき天体 2 から得られるコンプトンコーンは邪魔になる。そこで、図 2.2 右のように視野を狭めることで、天体 2 のコンプトンコーンの情報は排除し、天体 1 のみの情報を得ることができる。実際にはより複数の天体から光子が来るが、狭視野にすることで複数の天体が作るコンプトンコーンの情報を少なくすることができるので不要なバックグラウンドを除去することに繋がる。ASTRO-H に搭載されている SGD は、バックグラウンド除去してより感度の良い観測行うために狭視野コンプトンカメラが用いられいるが、将来的には広視野 Sub-MeV ガンマ線観測衛星の検討もされている。



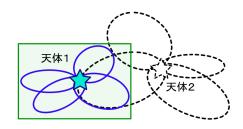


図 2.2: 左図:広視野観測でのコンプトンコーン、右図:狭視野観測でのコンプトンコーン

2.2 シリコン半導体センサー

半導体センサーは、従来の X 線ガンマ線の検出に用いられていたシンチレータと光センサーの組み合わせよりも一対のキャリアを生成するのに必要なエネルギーが小さい。そのため、十分なキャリア数を得ることができるので、信号のポアソンゆらぎを小さくすることができる、ノイズが小さくなるので感度の良い測定を行うことができる。また、コンプトン散乱は原子番号 Z が小さいほうが起こりやすく、半導体の中では Si は C の次に小さいためコンプトン散乱しやすく、観測したいエネルギー帯域でコンプトン散乱が支配的となることから散乱体として Si が選ばれることが多い。

2.2.1 原理

放射線検出用の半導体検出器は、p型半導体とn型の半導体を接合した p-n 接合型半導体が用いられている。p-n 接合した半導体は電圧を順方向に印加すると電流が流れ、逆方向に電圧を印加するとほとんど電流を流さない性質があり、検出器として使用する際は逆方向に電圧をかける。

ホールが過剰な p 型半導体と電子が過剰な n 型半導体を接合すると、接合部付近の過剰なホールは p 側 から n 側に、過剰な電子は n 側から p 側に拡散する。すると、接合付近の電荷キャリアが再結合し、空乏層と呼ばれる電荷キャリアの存在しない領域が生成される。しかしその空乏層には結晶格子に固定された負のアクセプタイオンと正のドナーイオンが残り拡散電位と呼ばれる電位差が生じる (図 2.2.1)。空乏層にはこれらの固定電荷が残るために平行板コンデンサーと同じように容量を持つことが知られている。また、逆バイアス電圧をかけることで再結合がさらに起こるために、空乏層はさらに広がる。

図 2.2.1 のように空乏層に放射線が入射すると電子正孔対が形成され、その後、電場によって電子は n 側、正孔は n 側に移動し収集され、これらの電荷量より入射した放射線のエネルギーを求めることができる。これは生成される電子正孔対の数が入射放射線のエネルギーと比例しているためである。

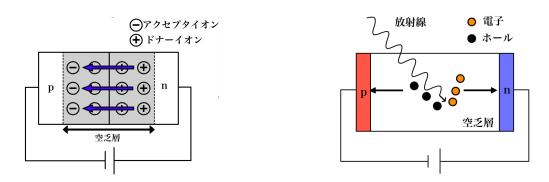
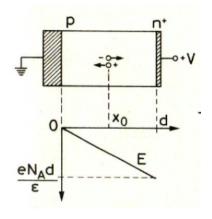


図 2.3: 左図:p-n 接合型半導体で生じる電場、右図:半導体センサーの読み出し原理

2.2.2 波形 (立ち上がり時間)による反応位置測定

電子とホールの収集時間は電極までの電荷の位置に依存しているため、半導体センサーからのパルス波形は、反応位置によって形や立ち上がり時間が変わる。また、電極における電気パルスは電荷の動きによる誘導から生じる。

p-n 接合中で一対の電子正孔対が作る波形についての例を示す。図 2.4 左は片側を n 型のドナーで重度にドープした、p-n 接合型半導体であり、その空乏領域での電場も示してある。



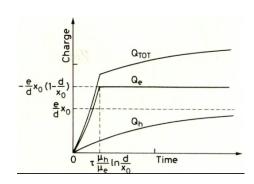


図 2.4: p-n 接合中で一対の電子正孔対が作る波形 [9]

図 2.4 左に書かれている座標系を使えば、p-n 接合間にできる空乏層内の電場は、

$$E = -\frac{eN_A}{\epsilon}x\tag{2.4}$$

と書き表せる [9]。ここで、e は電気素量であり、 N_A はアクセプタ密度である。ホールの移動度 μ_h を用いれば半導体中の電荷キャリアの伝導度は $\sigma\cong eN_A\mu_h$ と表せ、式 (2.4) に代入すると、

$$E = -\frac{x}{\mu_h \tau} \tag{2.5}$$

と書きなおすことができる。ただし、 ρ は抵抗率で $\tau=\epsilon/\sigma=\rho\epsilon$ という関係により、信号の立ち上がり時間と関係する。 Si では、おおよそ $\tau=\rho\cdot 10^{-12}~\mathrm{s}$ で、典型的な $1000\Omega\mathrm{cm}$ の物体では、 τ は ns のオーダーである。

ここで、空乏層の厚さを d とするとき、p+ 側と空乏層の境目をの原点とし、電子正孔対が生成された空 乏領域の点を x_0 とする。電子は n^+ 層に向かってドリフトを始め、ホールは p 電極に向かってドリフトを始める。移動度の定義より、電子の速度は

$$v = \frac{dx}{dt} = -\mu_e E = \frac{\mu_e x}{\mu_h \tau} \tag{2.6}$$

となり、移動度はEに依存しないと仮定すると解が導ける。

$$x(t) = x_0 \exp \frac{\mu_e t}{\mu_h \tau} \tag{2.7}$$

ただし、 x_0 は電子正孔対が生成されたよって、電子が x=d の電極に到達するまでの間に誘発される電荷は、時間 t の関数で表せる。

$$Q_e(t) = -\frac{e}{d} \int \frac{dx}{dt} dt = \frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp \frac{\mu_e t}{\mu_h \tau} \right)$$
 (2.8)

同様にして、ホールについても式 (2.9) 求めることができる。

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu_h E = \frac{x}{\tau}$$

$$x(t) = x_0 \exp \frac{t}{\tau}$$

$$Q_h(t) = -\frac{e}{d} x_0 \int \exp \frac{-t}{\tau} \frac{dt}{\tau} = -\frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right)$$

$$(2.9)$$

パルス波形は誘導された全電荷によって与えられ、 図 2.4 右に Q_e と Q_h が一緒に描かれている。収集された全電荷は $Q_{tot} = -e$ でこれは式 (2.8) の Q_e と式 (2.9) の Q_h の最大値の和より得ることができる。つまり、電子とホールによって誘導された電荷の和である。

また、式 (2.7) より、電子が x=d の電極に到達するまでの時間は、

$$t = \tau \frac{\mu_h}{\mu_e} \ln \frac{d}{x_0} \tag{2.10}$$

と表せる。電子のドリフト時間を求めることができれば放射線の反応位置である $x=x_0$ の点を求めることができる。

ここで、p-n 接合型の半導体の空乏層の厚さ d は、

$$d \simeq \left(\frac{2\epsilon V}{eN_A}\right)^{1/2} \tag{2.11}$$

であることが計算により求めることができる [9]。ここで V は半導体センサーに印加する逆バイアス電圧である。式 (2.10) よりの d は \sqrt{V} に比例しているため、ドリフト時間は逆バイアス電圧によっても変化する。

ただし、上記の計算は電場の向きが p-n 接合と垂直な場合にのみ成り立つ。また、たった 1 つの電子正 孔対についてである。入射放射線によるパルス波形を正確に計算するためには、粒子の軌跡や軌道に沿った イオンの密度、移動度の変化、電場の分布などについて知る必要があり、そのすべてを積分しなければなら ない。

2.2.3 センサー内の移動度

ここで、温度に依存するドリフト速度は電荷キャリアの移動度できまり、Si 中での電荷キャリアの移動 度は以下のように求めることができる [10]。

温度とドープ密度の関数としての電子の移動度 $\mu_n(N,T)$ とホールの移動度 $\mu_h(N,T)$ は以下のように表すことができる。

$$\mu_n(N,T) = 88T_n^{-0.57} \frac{7.4 \times 10^8 T^{-2.33}}{1 + \frac{N}{1.26 \times 10^{17} \times T_n^{2.4}}} 0. \ 88T_n^{0.146} \ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$
 (2.12)

$$\mu_h(N,T) = 54.3T_n^{-0.57} \frac{1.36 \times 10^8 T^{2.33}}{1 + \frac{N}{2.35 \times 10^{17} \times T_n^{2.4}}} 0.88T_n^{0.146} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$
(2.13)

ここで、 $T_n = T/300$ であり、T 絶対温度で N はドープ密度である。

例として、ドープ密度が $N=9.26\times 10^{11}{
m cm^2/V\cdot s}$ の Si-Pad での移動度は、絶対温度 20°C、 10° C、 0° C、 -20° C のとき表 2.2.3 となる。

	電子の移動度 $\mathrm{cm}^2/\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}$	ホールの移動度 ${ m cm}^2/{ m V\cdot s}$
20°C	1412	484
$10^{\circ}\mathrm{C}$	1519	519
$0^{\circ}\mathrm{C}$	1642	560
-10°C	1783	604
-20°C	1942	655

表 2.1: Si-Pad の電子とホールの移動度

2.2.4 半導体センサーのノイズ源

コンプトンカメラの性能の決める角度分解能は、エネルギー分解能と位置分解能によって決まっている。 エネルギー分解能は、半導体センサーや信号処理回路のノイズに依存しているため、半導体センサーのノ イズを抑えることで、結果的にコンプトンカメラの性能を向上させる。このエネルギー分解能を悪くする 主な原因として、以下のようなものが挙げられる。

- 1. 暗電流中の電子の数ゆらぎが原因の shot noise
- 2. 電子の熱雑音による johnson noise
- 3. 不純物のランダム運動や構造に由来する 1/f noise

1.shot noise

主な原因としては暗電流である。この暗電流は半導体内部で熱励起によって生成されるキャリア対によって流れる電流のことである。暗電流中の電子数のポアソンゆらぎによって、暗電流もゆらいでしまいノイズとして検出されてしまう。暗電流はキャリアが熱励起する確率に比例し、温度の関数となる。暗電流 (I) と絶対温度 (T) の関係は、

$$I(T) \propto T^{3/2} \exp(-\frac{E_g}{2k_B T}) \tag{2.14}$$

と表すことができる。ここで、 E_g はエネルギーギャップ、 k_B はボルツマン定数で、暗電流は温度を下げることで減少させることができる。

また、一般的な p-n 接合を用いた半導体に逆バイアス電圧を印加すると、ある値を超えたところで暗電流が急激に増加する降伏現象 (ブレークダウン) が起こる。逆バイアス電圧によって生じる電場により、電子が励起・加速され、さらに空乏層内の他の原子と衝突することで、その原子の電子が励起される。このような衝突が何度も繰り返されることによって暗電流が急激に増加する現象が起こりノイズも増加するため、ブレークダウン電圧以下で使用しなければならない。

2.johnson noise

この主な原因には、半導体センサー自身の容量が含まれている。2.2.1 節で述べたように p-n 接合を用いた 半導体センサーは静電容量を持ち、この容量によって半導体に蓄えられている電荷が熱振動 (ブラウン運動) することによってノイズが発生する。このノイズは有限の温度であると必ず存在するノイズである。

半導体センサーの p-n 接合間に生じる容量を Body 容量と呼び次式で表せる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \tag{2.15}$$

ここで、 ϵ :誘電率、C:Body 容量、S:センサーの面積、d:空乏層の厚さである。

空乏層の厚さは、逆バイアス電圧を大きくするにつれて増加するため、完全空乏化するまで、電圧を大きくすることで容量を小さくすることができる。また、複数のチャネルを持つセンサーの場合 Body 容量に加えて図 2.5 のように ch 間にも容量が生じる。この容量のことを ch 間容量と呼ぶとし、これは inplant の幅に依存する。

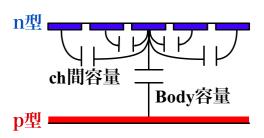


図 2.5: 複数チャネルのセンサーの容量

3.1/f noise

このノイズは半導体に固有に存在するノイズで、不純物のランダム運動や構造に依存し周波数に反比例することが知られている。

2.2.5 本研究で用いる回路でのノイズ

2.2.4 節で述べたのノイズは、センサーから CSA に至るまでの初段電子回路系の性能と合せて、センサーの性能に影響を与える。簡単のために図 2.6 のような等価雑音回路を考える [6] [5]。

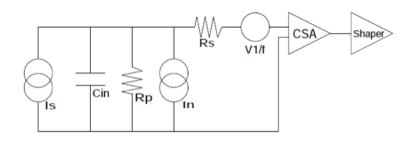


図 2.6: 半導体センサーの等価雑音回路 [5]

図 2.6 において、

- I_s:入射放射線による信号電流
- C_{in} :等価入力容量 (センサーの接合容量、ケーブル、初段 FET の入力容量)
- R_p :等価並列抵抗 (CSA の帰還抵抗、高圧電源の負荷抵抗)
- R_s :等価直列抵抗 (\equiv A/g、A:0.5-0.7 程度の定数、g:初段 FET の相互インダクタンス)
- I_n :暗電流

$C_{1/f}$:1/f ノイズの大きさを表す比例係数

まず、この回路での全雑音電圧のパワースペクトルを求めると、

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{C_{1/f}}{f} [V^2/Hz]$$
 (2.16)

となる。第一項と第三項がそれぞれ R_p と R_s による Johnson noise、第二項が I_n による shot noise、第四項が 1/f noise である。エネルギーは電荷量で測定するため、 等価雑音電荷 $\overline{\triangle E_{BMS}^2}$ に書き直すと、

$$\frac{\overline{\triangle E_{RMS}^2}}{df} = \left(\frac{4k_BT}{R_p} + 2qI_n\right) \cdot \frac{1}{\omega^2} + 4k_BTR_sC_{in}^2 + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f}[C^2/\text{Hz}]$$
 (2.17)

となる。ここで、1/f ノイズの $V_{1/f}$ は周波数に比例するので、その係数を C_{in} として置き換えている。初段回路の雑音強度は周波数依存性を持つためフィルターをかけて波形整形を行うことで信号とノイズの強度比を最適化できる。ここで簡単のために、 $\omega/2\pi\sim f\sim \Delta f\sim 1/\tau~(\tau$ は波形整形の時定数) でガウシアン整形を行ったとすると、

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = \left(\frac{4k_b T}{R_p} + 2qI_n\right) \cdot A_1 \tau + 4k_B T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \cdot A_3[C^2]$$
 (2.18)

となる。ここで、理想的なガウシアン $(CR-RC^n, n \to \infty)$ に対しては、波形整形回路フィルター特性で決まる係数は、 $(A_1,A_2,A_3)=(0.6267,0.6267,0.5)$ である。等価雑音電荷は式 (2.19) よりエネルギー分解能に換算することができる。[7]

$$E_{\text{FWHM}} = 2.355 \cdot \epsilon \cdot E_{RMS}/q[\text{eV}] \tag{2.19}$$

ここで、q は電子の電荷で 1.6×10^{-19} C, ϵ は 1 個の電荷キャリアを生成するのに必要な付与エネルギーで、シリコンは $\epsilon=3.62 {\rm keV}$ である。式 (2.18) を Si センサーのエネルギー分解能 $[{\rm keV}]$ に換算するためには式 (2.18) に $(2.355 \cdot \epsilon/10^3/q)^2$ を掛け、原因のわかりにくい第三項を用いずに近似すると、

$$\overline{\Delta E_{FWHM}^2} \simeq \left(2.70 \times 10^{-2} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.573 I_n\right) \cdot \tau + \left(1.89 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g}\right) / \tau [\text{keV}^2]$$
 (2.20)

ただし、変数の単位は $R_p(\mathrm{G}\Omega)$, $\tau(\mu\mathrm{sec})$, $I_n(\mathrm{nA})$, $C_{in}(\mathrm{pF})$, $g(\mathrm{mS})$ で、 $T=273\mathrm{K}=0^\circ\mathrm{C}$ 、A=0.7 としている。 R_p は PreAMP のフィードバック抵抗や検出器のバイアス抵抗に相当する。第一項は I_n に依存しており、第二項は PreAMP の容量勾配で $f(C_{in})$ と表すことができ、 PreAMP に容量の値が既知のコンデンサーを 付けることによって求めることができる。 $\mathrm{CP5102}$ 型の PreAMP では式 (2.21) となる。[4]

$$f(C_{in}) = 0.01267x + 0.836[\text{keV}] \tag{2.21}$$

複数チャネルのセンサーの x[pF] は、Body 容量+測定 ch 間の容量の和となり、本実験での半導体センサーのノイズは、

$$\overline{\triangle E_{FWHM}^2} \simeq \left(2.70 \times 10^{-2} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.573 I_n\right) \cdot \tau + \{f(C_{in})\}^2 / \tau$$
(2.22)

と表すことができる。この式からも分かるように、エネルギー分解能は暗電流や容量に依存しており、暗電 流や容量が小さいほどエネルギー分解能が良くなる。

2.3 シリコンドリフトセンサー

ドリフト検出器は 1984 年に E.Gatti と P.Rehark によって発明され、1985 年にはスペクトロメーターに ドリフト検出器を搭載し、実験室やビーム施設でハイ中間子を用いることで、ドリフト時間から反応位置 を決定するための実験が行われた。このテストでは入射した時の時刻を他の検出器であるシンチレータから求め、フィッティングすることでドリフト検出器のパラメータであるドリフト速度と時間のオフセットを 決定した。

ドリフト検出器には、主に円環型と直線型がある。本研究では直線型のドリフトセンサーを用い、詳しくは次節以降で解説する。図 2.7(a) は円環型のドリフト検出器であり、電場を形成する目的の円環の列の中心に電荷収集用のアノード (陽極) を置いた円柱形の検出器である [7]。このとき、中心に配置したアノードは小面積にすることで静電容量を小さくすることができる。図 2.7(b) は電子に対するポテンシャル面が示してあり、シリコン内部のどこで生成した電子も中心にある小さなアノードで収集する。

本研究では、コンプトンカメラ用に開発された直線型のシリコンドリフトセンサーの基礎特性評価を行う。そして、Si-Pad などの人工衛星に用いられているものと比較し、今後、X 線観測衛星に用いることができるのかについて基礎特性評価を行うことで検証する。

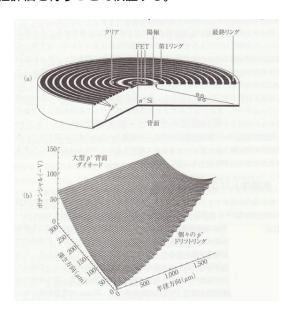


図 2.7: 上図:円柱形ドリフト型検出器、下図:電子のポテンシャル面 [7]

2.3.1 検出原理

ドリフト検出器の断面図を図 2.8 に示す。ドリフト検出器は電荷キャリアのドリフト時間から電荷キャリアの生成位置を求めることができる。検出器内で生成した電荷キャリアは生成位置から電荷収集用電極であるアノードまでの長い距離をドリフトする。その到達時間を測定することによって位置分解能の向上が見込める。さらに非常に小さいアノードで収集されるため静電容量が小さくなることが期待され、2.2.5節で述べた容量性のノイズが減少することで、エネルギー分解能の向上が期待される。

本研究では図 2.8 のような線形ドリフトセンサーであるシリコンドリフトセンサーを用い、放射線が入射することにより電離生成した電子を垂直方向ではなく水平方向にドリフトさせることによって信号として検出する。このセンサー、平行に配置されているドリフトインプラント (カソード) の両端に両面から電圧を印加し、そのカソード間に抵抗を付けることによって電場を形成し、生成された電子正孔対を駆動するのに必要な電位の勾配を作り出す。その電場によって、放射線によって生成された電子はまずセンサーの垂直方向の中心付近の最低電位のところへ引き寄せられ、電位勾配によって水平方向にドリフトされる。そして、電子は最終的には左端の電荷収集用電極であるアノードで収集され、信号として検出される。ここで、ドリフトさせるために印加する電圧のことをドリフト電圧とよび、この電圧はドリフト速度を調整するために使用する。

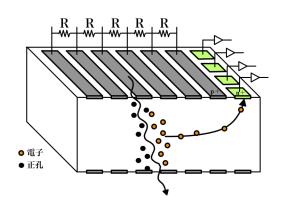


図 2.8: シリコンドリフトセンサーの模式図

また、線形ドリフトセンサーは、電荷収集用電極であるアノードも細かく分割しているので、ドリフトインプラントに水平な方向に対応する第2の座標も決定することができる[7]。

図 2.9 は放射線が反応した位置の座標をどのようにして求めることができるのかを示している。まず、生成された電子 (黄色の丸) はアノードに向かってドリフトをするので、そのドリフト時間を利用して横方向の位置を求めることができる。また、細かく分割されたアノードのチャネルのうちどこで信号が検出したのかを調べることで、縦方向の位置を求めることができる。これらのドリフト時間と反応チャネルの情報から放射線の反応位置を 2 次元の情報で得ることができる。

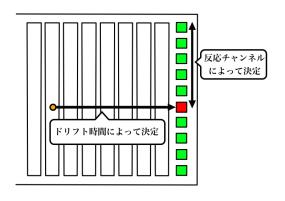


図 2.9: ドリフトセンサーの位置決定

2.4 ドリフト型シリコンドリフト検出器の原理

2.4.1 空乏層の広がり方

図 2.10 はドリフトセンサーの空乏層の広がり方を示している。この図は、p-n 接合型半導体内部の構造を示しており、赤色が p+、青色が n+、水色は空乏化した領域で、斜線部分は空乏化してない領域である。また、各図の左側にある V のグラフは、右図のある高さでのポテンシャルを描いている。

ドリフトセンサーの空乏層の広がり方を理解するにあたって、まず図 2.10(a) のような一般的な p-n 接合型半導体について考える。この p-n 接合型半導体に逆バイアス電圧をかけることで、空乏層が広がることでこの空乏層内に図のような電場が生じる。これによって、空乏層内には電位差が生まれるが、空乏化してない領域では電位差が生じないので、ポテンシャルは一定となっている。

図 2.10(b) は、(a) の下側についていた n+の電極を、まだ空乏化していない上側に配置することで、ウエハーの下側の空間に何も配置していない状態である。

次に、(b) のように下側にあいた空間に p+の電極を配置すると、図 2.10 のようにウエハーの両面に p+を配置することができる。これがシリコンドリフトセンサーのアノード付近での構造となる。このときできる空乏層の内部には電場が生じるため、図のように空乏化してない領域から p+の電極に向かって電場が生じる。まだ空乏化してない両面の p+の間の領域では電位差が生じないため、ポテンシャルは一定となっている。

また、図 2.10(c) の p-n 接合間に十分な逆バイアス電圧をかけることで両面の p+n0 空乏領域が広がっていき、最終的には図 2.10(d) のように完全に空乏化する。このときのポテンシャルは、左図のように両面にある p+n0 間が一番大きくなり、空乏層の内部に電子にとってのポテンシャルの谷が形成される。この、両面の p+n0 間にある電子にとってのポテンシャルの谷に沿って、電子が電荷収集用の n+n0 電極までドリフトすることで、信号として検出することができる。

ここで、ドリフトセンサー内の空乏層を広げるために印加している電圧のことを逆バイアス電圧とよぶ。

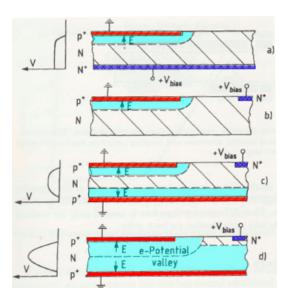


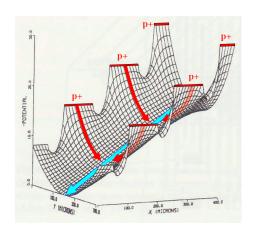
図 2.10: ドリフトセンサーの空乏層の広がり方 [8]

2.4.2 センサー内部の電位差による電子の収集

図 2.11 はドリフトセンサー内のポテンシャルを示した図である。左図はアノードから離れている p+のドリフトインプラントの部分のポテンシャルを示している。X はドリフト方向の距離で、Y は表面から裏面までの上下方向の距離である。

ここで、p+間の電位差は、p+間にある抵抗によって生成しており、図のような電位差を形成している。まず、空乏層内で生成された電子は、バイアス電圧によって形成された勾配の急なポテンシャルを赤矢 印の方向に向かってドリフトする。その後、電子にとってのポテンシャルの谷に向い、ポテンシャルの谷に 到達した電子はドリフト電圧によって形成された勾配の緩やかなポテンシャルを水色の矢印の方向に向かってよりポテンシャルの低い方向に向かってドリフトをする。

電子は、ドリフトを続けて n+のアノードに近づくと、図 2.11 右のようなポテンシャルとなる。電子を収集するためのアノードはポテンシャルが一番低い 0V となっているので、電子はより電位の低いアノードへとドリフトし収集される。このようにして電子がアノードに収集されることによって信号として検出される。



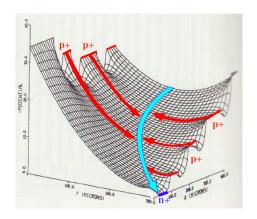


図 2.11: 左図:直線の領域でのポテンシャル、右図:アノード付近でのポテンシャル [8]

また、2.2.2 節で求まる立ち上がり時間は、反応位置からの距離とドリフト時間の関係が線形にならないため、実用的なドリフト型の位置検出器にはならない。このような立ち上がりは p+からポテンシャルの谷に向かうまでの時間に相当し、このポテンシャルの傾きは大きいので、電子の立ち上がりは速い。

一方で、ポテンシャルの谷に到達した電子は図 2.11 のように傾き (電場) が一定のポテンシャル面をドリフトする。このとき、ドリフトインプラントに等間隔に配置されている抵抗によって電場を一定に保ち電子の速度を一定に保つことで、反応位置とドリフト時間の関係を線形にすることができる。線形にすることで、ドリフト時間から反応位置を求めることが可能となる。また、電子のドリフト速度は印加する電圧によって適度に調節することができるので、一定の電圧下であれば反応位置によって信号発生時間が変化し、その時間から反応位置を求めることができる。そのドリフト時間の違いを利用して反応位置を求める位置検出器として利用されている。

2.5 Si-pad とシリコンドリフトセンサーの比較

図 2.12 左は ASTRO-H の SGD 用の Si-Pad センサーで、図 2.12 右は本研究で用いるシリコンドリフトセンサーである。表 2.5 には、各センサーの面積や厚さなどを示し、比較した。

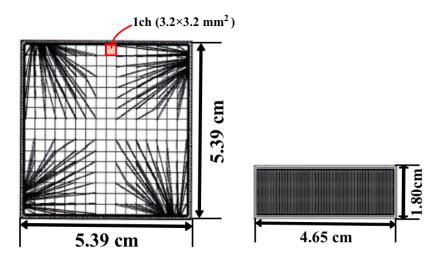


図 2.12: 左図:SGD の Si-Pad [12] 右図:本研究で用いるシリコンドリフトセンサー



図 2.13: シリコンドリフトセンサーの読み出し部分の拡大図

	Si-Pad センサー	シリコンドリフトセンサー
全体面積	$5.39 \times 5.39 \text{ cm}^2$	$4.65 \times 1.80 \text{ cm}^2$
読み出し ch の面積	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$	$0.1{\times}0.07~\mathrm{mm}^2$
読み出し ch 数	$256 \ (16 \times 16)$	64
厚さ	$0.60~\mathrm{mm}$	$0.50~\mathrm{mm}$

表 2.2: Si-Pad とシリコンドリフトセンサーの仕様 [4]

(1)SGD 用の Si-Pad

図 2.14 で示すような Si-Pad センサーは、n+型の平板とピクセル 上のインプラントから構成されている p-n 型半導体である。p-n 間に存在する bulk には空乏層が存在しており、ここには電荷キャリアはほとん

ど存在していない。また、この空乏層は印加する逆バイアス電圧によって変化し、完全に空乏化させることで検出器として用いることができる。

また、各ピクセルには検出された信号を読み出すために、DC 結合された Al 電極が読み出し線として取り付けられている。この読み出し線は、図 2.12 左の 4 隅から中心に向かっている線のことで、このセンサーは各ピクセルから出た信号を 4 隅から読み出せるようになっている。しかし、この読み出し線は容量性のノイズ源となってしまい、エネルギー分解能を悪くする原因となる。

ここで、Si-Pad の構造を図 2.14 で示すことができる。生成された電子正孔対を垂直方向にドリフトさせ、反応したチャネルで電荷を収集し、反応チャネルから位置の特定を行うので、比較的構造が簡単であり、コストが低いという利点がある。一方、シリコンドリフトセンサーは、長い距離にわたって垂直方向よりむしろ水平方向に電荷をドリフトさせ、センサーの端にある電荷収集用電極で電化を収集し、ドリフト時間から反応位置を求める。そのため、構造が少し複雑になるが、そのかわりエネルギー分解能や位置分解能が良い。

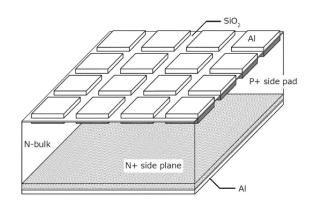


図 2.14: Si-Pad センサーの構造 [4]

(2) シリコンドリフトセンサー

今研究で用いるシリコンドリフトセンサーは以下のような点で Si-Pad よりも位置分解能やエネルギー分解能が向上すると期待することができる。

1. 読み出しチャネルの面積が小さい

これは、読み出すチャネルの面積が小さくなることで、式 (2.15) の面積が小さくなり、さらに、水平方向に長距離ドリフトさせるためにドリフト距離が長くなる。これによって Si-Pad よりも容量が小さくなり、容量性のノイズが減るためエネルギー分解能が向上すると考えられる。

2. 読み出しチャネルの数が少ない

位置分解能を良くするために Si-Pad で読み出しチャネルを小さくすると、有効面積が小さくなるので、読み出しチャネルの数を多くしなければならない。そのため、読み出し回路が多くなり、発熱したり消費電力が増加してしまう。一方、シリコンドリフトセンサーは、読み出し ch 数を増やすことなく位置分解能の向上が見込めるので、読み出し回路を少なくでき、発熱や消費電力の増加を抑えることが可能となる。

3. ドリフト時間によって反応位置を求める

電子やホールのドリフト時間から反応位置を求めることで、Si-Pad よりも位置分解能が向上すると期待される。位置分解能は読み出しの面積が大きいほど悪くなるが、シリコンドリフトセンサーはチャネルの数を増やさず小さな面積の読み出しチャネルにドリフトさせて収集する。そして、ドリフト時間とどのチャネルで反応したのかを調べることで2次元の反応位置の情報が得られる点でも優れているといえる。

このように、シリコンドリフトセンサーは、このような点で位置分解能やエネルギー分解能が向上する と期待されるが、シリコンドリフトセンサーの使用の際は以下のことを注意する必要がある。

1. ドリフト速度が温度による

温度によって電子やホールの移動度が変化するため、それに伴ってドリフト時間が変化するので反応 位置を求める際には注意しなければならない。

2. ドリフト開始時間が必要

電子やホールのドリフト時間を求めるためにはドリフト開始時間が必要となるが、これは他の検出器とコインシデンスをとることで求めなければならない。

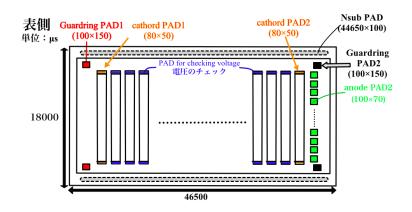
3. 高電圧が必要

シリコンドリフトセンサーはセンサーの端から端まで電子やホールをドリフトしなければならず、そのためには 800V 以上の高電圧が必要となるので、暗電流が急激に増加するブレークダウンには十分注意する必要がある。

第3章 シリコンドリフトセンサーの基礎特性評価

3.1 本研究で用いるシリコンドリフトセンサーの構造

図 3.1 は本研究で用いるシリコンドリフトセンサーの構造を示している。上図が信号を読み出すための電荷収集用の anode PAD がついた表面で、下図が裏側である。裏の構造は、表の構造と anode PAD がないだけでよく似ている。片面に anode PAD がないのは、アノードのポテンシャルを電子にとって最小にすることで、電子を表面のみにあるアノードに集め、信号として検出できるようにするためである。



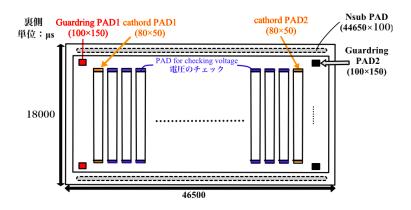


図 3.1: 上図:Pside 側の構造 、 下図:Nside 側の構造

半導体センサーは逆バイアス電圧を印加することで n 型と p 型の半導体の接触面付近から空乏層が広がっていき、その中で放射線が電子正孔対を生成させることで、その信号を検出することができる。まず、シリコンドリフトセンサーの空乏層を広げるために図 3.2 の Guardring Pad1 と Cathord Pad1、Guardring

Pad2 と cathord Pad2 の p+であるカソード側に負の逆バイアス電圧を印加する。そうすることで、空乏層が広がり、その内部に放射線による電子正孔対を生成することができる。

次に、生成した電子をドリフトさせるために cathord PAD1 に負の電圧をかけ、黄緑色のである anode-PAD2 を GND にすることでドリフト電圧を印加する。そうすることで、空乏層内に生成された電子を信号を読み出すためのアノードまでドリフトさせることができる。

また、暗電流の影響を最小化するために赤色で示すようなガードリング (GR) が、ドリフトインプラントや anode の周りに取り付けられている。ガードリングは周辺のドリフトインプラントや anode の間で電場が急激に変化しないようにそれらと同じ電位になるように電圧を印加している。

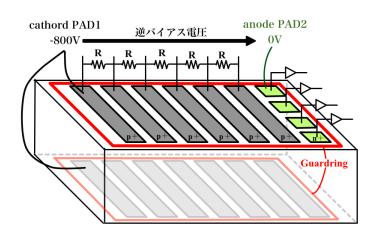


図 3.2: 本実験で用いるシリコンドリフトセンサーの断面図

さらに、図 3.2 のドリフトインプラント上とガードリング上にはポリシリコン抵抗がつけられている。このドリフトインプラント上の抵抗によって、空乏層内で生成した電荷キャリアをドリフトさせるための電位差が生じさせることができる。また、ガードリングにも同様の抵抗をつけることで、ガードリングにもドリフトインプラント間の電位差を一定にすることができるので、センサー内に同じ電位勾配を形成することができる。

ここで、図 3.3 にガードリングの構造を示している。ガードリングは、読み出し付近の電場構造を保つために付けられている。もしガードリングがなかったら、端にあるアノード付近の電気力線の数が減り、本来の電場の値よりも小さな値となってしまう。また、今回は同じアノードと同じ電圧にすることで、アノードにすべての電場が集中し電圧破壊することを防いでいる。

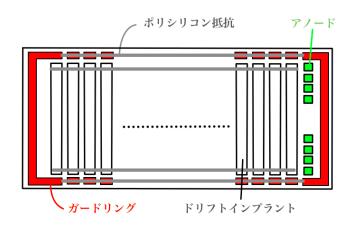


図 3.3: ガードリングやインプラントに取り付けられたポリシリコン抵抗

表 3.1 にこのドリフトインプラントの仕様を示した。 $100\mu m$ ピッチで 440 個あるので、このドリフトインプラントの長さは 44mm にもおよび、ピッチ間のドリフト電圧が 20V 必要だと考えると、電子がセンサーの端から端までドリフトするためには 800V 以上の電圧が必要となる。

	$100 \mu m$
ドリフトインプラント数	440
ドリフトインプラント間抵抗	$400 \mathrm{k}\Omega$
ドリフト電圧	$20\text{-}70 ext{V/mm}($ ドリフト速度 $8\text{-}30 ext{mm}/\mu ext{s})$

表 3.1: シリコンドリフトセンサーのドリフトインプラントの仕様

本研究で用いるシリコンドリフトセンサーは電荷収集用のアノードを細かく 64 分割することで、信号読み出し容量が減少しエネルギー分解能がよくなると期待される。さらに、アノードの配置方向の位置情報も細かく分割することでアノード方向の位置情報を得ることができる。また、ドリフト時間によってドリフトインプラントに平行な方向に対応する座標も決定することができのでドリフトセンサーによって 2 次元の情報を得ることができる。このように細かく分割された電荷収集用のアノードに空乏層内で生成された電子がドリフトして収集されることで、電子のエネルギーや 2 次元の反応位置情報を電気信号として読みだすことができる。

3.2 測定項目とセットアップ

3.2.1 測定項目

シリコンドリフトセンサーは、読み出し容量の低減やドリフト時間から反応位置を精度良く求めることにより SDG の Si-Pad よりもエネルギー分解能や位置分解能の向上が期待されている。そこで、以下のような測定を行い、観測衛星で搭載されるコンプトンカメラを構成するセンサーとして有望であるのかを検証する。

1. 容量測定による容量性ノイズの測定

- 2. 暗電流測定による電流性ノイズの測定
- 3. スペクトル測定によるエネルギー分解能の測定
- 4. 波形測定による反応位置の測定

3.2.2 暗電流

半導体センサーの暗電流は、電流性ノイズとしてエネルギー分解能に影響を与えるため、半導体センサーの基礎特性評価を行う上で重要な測定項目となる。暗電流測定のセットアップは図 3.4 のようになる。

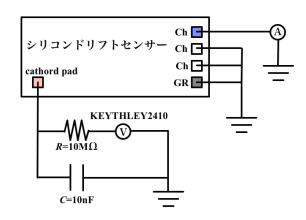


図 3.4: 読み出しチャネルの暗電流測定のセットアップ

本研究では接合パターンの都合上、すべての読み出しチャネルにはボンディングを行なっていない。読み出しチャネルに流れる暗電流を測定するために読み出しチャネルに電流計を接続し、GR と読み出すチャネル以外のチャネルは GND に接続する。その後、cathord pad である p+に負の電圧をかけることで読み出しチャネルに流れる暗電流のみを測定することができる。

また、読み出すチャネルの位置によって流れる暗電流が変化するかについても調べる。

3.2.3 容量

半導体センサーの容量は、容量性ノイズとしてエネルギー分解能に影響を与える。そのため暗電流と同様に重要な測定項目となる。半導体センサーの容量には、Body 容量と ch 間容量が存在しており、容量の測定には HEWLETT PACKARD の HP4284 を用いて計測を行う。

まず、図 3.5 は Body 容量を求めるためのセットアップである。

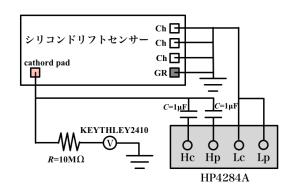


図 3.5: Body 容量測定のセットアップ

図 3.5 は読み出しチャネルとガードリングをすべて GND におとし、その電極と電圧をかけるカソード間に生じる容量を測定するセットアップである。ただし、この容量にはガードリングとカソード間の容量も含まれるため、Body 容量を求めるには、図 3.5 で求めた容量からガードリングとカソード間の容量を差し引く必要がある。しかし、今回の基板の設計では読み出し予定のチャネル以外のアノードはガードリングと共に GND におとしてしまっているため、個別に容量を求めることができない。そこで、今回の実験ではカソードとアノード・ガードリング間の空乏層の距離は等しいとして考え、後は図 3.5 で求めた容量から各チャネルとガードリングの面積の比を用いることで、Body 容量を求めることにした。

また、多チャンネルある半導体センサーには Body 容量の他に ch 間にも容量が存在する。そのため、 ch 間容量を図 3.6 のようなセットアップで求める。 ch 間容量は読みたいチャネル (青色) を L_c と L_p につなぎ、それ以外のと GR を H_c と H_p につないだ図 3.6 のようなセットアップで計測する。

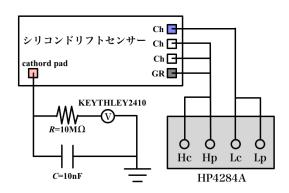


図 3.6: ch 間容量測定のセットアップ

図 3.5 で求めた Body 容量を ch の数で割り、図 3.6 で求めた ch 間容量を足すことで、その読み出しチャネルの容量を求めることができる。

3.2.4 スペクトル

半導体センサーのエネルギー分解能を測定するために、放射線から得られるスペクトルを測定する。図 3.7 はスペクトルを取得する際のセットアップである。

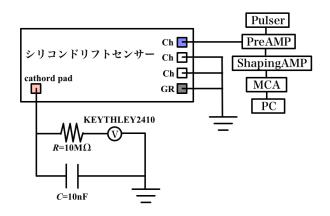


図 3.7: スペクトル測定ののセットアップ

このスペクトルは、読み出したい ch 以外を GND におとすことで、読み出したい ch で得られるスペクトルを取得する。その ch で検出された信号を前置増幅器である $\operatorname{PreAMP}(\operatorname{CP5102})$ でガンマ線のエネルギーに比例した電圧信号に変換・増幅する。その信号を整形増幅器である $\operatorname{ShapingAMP}(\operatorname{ORTEC571})$ でノイズを除去し、理想的な波形にするためにガウシアン整形を行いエネルギー分解能の最適化をする。その後、 $\operatorname{MCA8000A}$ でアナログ情報をデジタル信号に変換し、 PC 上で計測することができる。

また、PreAMP には Pulser を同時に接続することで、一定の間隔でテストパルスを入力し、読み出し系のノイズによるエネルギー分解能の寄与を調べる。ただし、生成された電子正孔対から得られる信号のエネルギー分解能は、読み出し系のノイズに加えて 2.2.4 節で述べたような容量性のノイズや電流性のノイズによって悪くなる。そのため、生成された電子正孔対から得られる信号のエネルギー分解能は、テストパルスから得られるエネルギー分解能より良くなることはない。

3.2.5 波形測定(立ち上がり時間)

半導体センサーのどの位置で反応したのかを求めるために、電荷キャリアのドリフト時間を求めることが必要である。そこでそのための基礎実験として信号波形をデータとして取得し、ドリフト時間を PC で求める。図 3.8 は、波形測定のセットアップである。

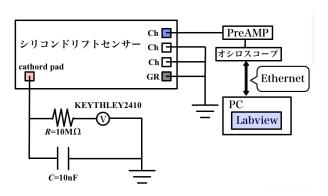


図 3.8: 波形測定のセットアップ

波形測定は、スペクトル測定のときと PreAMP までは同様の回路で行い、PreAMP で整形された波形をTEKTRONIX 社のオシロスコープ (TDS 3032B) で測定する。このオシロスコープにはもともとイーサネットポートが付いておりインターネット通信することができるので、イーサネットを利用して PC 上で計測することができる。Labview(version 12.0.1)を用いて PC 上で波形を取得するが、まずその波形のデータを PC 上に送るために Labview にイーサネット機器の登録をする。そうするとオシロスコープと通信できるようになり波形のデータを得ることができる。また、Labview のサンプルコードが NATIONAL INSTRUMENTS の公式サイトで配布されており、。今回用いるオシロスコープのサンプルコードは tektroix_tds_3000_series というファイル名で配布されている。

上記のようにして求めた波形のデータをフィッティングすることで、その立ち上がり時間を求めることができる。

3.3 実験準備

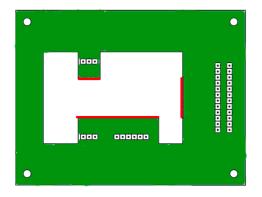
シリコンドリフトセンサーの実験を行うために、まずはそのセンサーから、信号を読み出すための基板 やそのために必要となる実験を行った。以下のようなスケジュールで実験の準備を行っていた。

- 10/22-25 ボンディングの体験 (名古屋大学)
- 10/27- 基板の設計開始
- 11/12 業者に基板の案を送る
- 11/21- 業者と本格的な打ち合わせを開始
- 12/15- 基板の発注・製作
- 1/16 完成予定
- 1/17 センサーが破損の連絡
- 1/22 新たなセンサーの提供 (名古屋大学の田島教授)
- 1/27-2 度目の基板の製作・ボンディング開始
- 2/2 基板とセンサーのダイボンド完了
- 2/3 ワイヤーボンディング完了
- 2/5 センサーの配線完了
- 2/6 シリコンドリフトセンサーの納品

3.3.1 シリコンドリフトセンサーの基板設計

シリコンドリフトセンサーから得た信号を読み出したり、逆バイアス電圧をかけたりするためにセンサー 上の電極と接続するための基板の設計を行った。本実験で用いるシリコンドリフトセンサーは、両面に電極 があるため、裏表の両面から信号の読み出しや電圧をかけれるような基板を作成しなければならない。

そこで、図 3.9 左と図 3.9 右のような表基板と裏基板の 2 枚の基板でシリコンドリフトセンサーを挟むような構造の基板を業者に作成してもらう。表基盤の赤線と裏基板の橙色の部分がセンサーとの接触面となり、この部分でセンサーを支えることになる。また、この接触面の幅は $800\mu\mathrm{m}$ 程度であり、非常に少ない面積でセンサーを支えることになる。



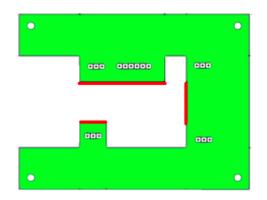
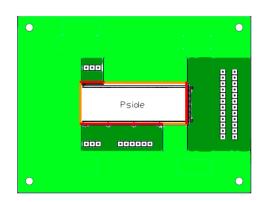


図 3.9: 左図:表基板 右図:裏基板

図 3.10 左は、下から表基板、シリコンドリフトセンサー、裏基板を重ねた図で、こちら側からセンサーの表側の読み出しを行う。一方、図 3.10 右は下から裏基板、シリコンセンサー、表基板を重ねた図で、こちら側からセンサーの裏側の読み出しを行う。これらの図の赤線がセンサーと表基盤の接触面で、橙線がセンサーと裏基板の接触面となる。



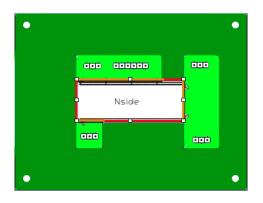


図 3.10: 左図:センサーを乗せた時の表面 右図:センサーを乗せた時の裏面

これらの図 3.9 と図 3.10 にある小さな四角は、センサー内で反応した電子正孔対による電気信号を得るために、取り付けられた 2.5 ピッチの PIN ヘッダである。さらに、電圧をかけたり、GND につないだりする際、センサーの両面に導通をとる必要があるので、表裏の基板にはスルーホールで導通がとってある。また、4 隅の穴は基板を外部のケースなどと固定するための穴で、サイズとしては 3M のネジが固定できるようになっている。この穴を利用しスペーサーなどを用いて固定することで、空中で固定することができ、表裏にある PIN ヘッダから信号を取り出せるようになっている。

この基板の設計は本研究室で行い、それを元に業者と話し合いを行い設計を固め、シリコンセンサー上の電極からボンディングして接続するための電極や表面実装による回路の実装や信号を読み出せるように 2.5 ピッチの PIN ヘッダをつける作業を業者に依頼した。また、ボンディングについても同社に依頼した。この基板の設計・作成を行うにあたり、業者との話し合いで以下のような点が問題となった。

1. シリコンドリフトセンサーを支える面積が非常に小さい

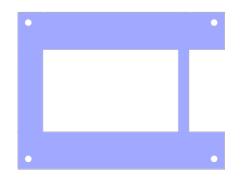
基板の切削精度があまり良くないために、予定よりも削りすぎてしまったらシリコンドリフトセンサーが基板から落ちてしまう可能性が出てくる。また、センサーと基板を支える面積が小さいので、ボンディングを行うときの振動で基板から落ちてしまったり、センサーが割れてしまわないか懸念された。接触面だけに力が加わるとセンサーが外れる可能性が高くなるので、ボンディングの際に力を接触面だけに与え、センサーに余計な負荷がかからないようにするなどの対策をとる必要があった。

2. 固定するときに使用する接着剤がセンサーの PAD 部分にしみ出す可能性がある

接着剤がセンサーの PAD 部分にしみ出てしまうと、ボンディングが行えなかたり、センサーの性能が悪くなったりする。そのために、接着剤の量を調整したり、性能にあまり影響を与えない接着剤を用いらなければならない。

この問題点を解決するために、以下のような対策をとり基板の製作を行った。シリコンドリフトセンサーと基板の接触面が少ないため、その接触面からセンサーにかかる力を分散させるために、P 基板と N 基板の間には図 3.11 右のようなセンサーの厚さと同じ厚さである $500\mu m$ のアクリル板を挟むことにした。これによって、基板とセンサーの接触面にのみかかる力を分散することができると考えられる。図 3.11 右はシリコンドリフトセンサーを挟んだ状態の基板の断面図となり、このような設計で基板が製作されることになった。

また、シリコンドリフトセンサーと基板の間には、もし仮にセンサー部分にしみ出してしまっても検出 器の性能を悪くしないとされているエポキシ樹脂の接着剤である絶縁性ダイボンディングペーストが用い られることになった。



P基板 アクリル シリコンドリフトセンサー <mark>アクリル</mark> N基板

図 3.11: 左図:P 基板と N 基板の間に挟むアクリル板、右図:基板の断面図

	P・N 基板	アクリル基板
基板サイズ	$10.0{\times}7.6~\mathrm{cm}^2$	$10.0{\times}7.6~\mathrm{cm}^2$
厚さ	$1.2 \mathrm{mm}$	$0.5 \mathrm{mm}$
材質	ガラスエポキシ	アクリル樹脂

表 3.2: 基板の仕様

3.3.2 ボンディングの体験

読み出す ch の電極と作成した基板の電極を接続するためにボンディングを行わなければならない。

本実験では、シリコンドリフトセンサーのボンディングは自分自身では行わないが、ボンディングとは どのようなものなのかを学び、基板を設計の際にどのような配置にしたらいいのかを学ぶために、練習用 の Si センサーでボンディングの練習を行った。

ボンディングは金やアルミニウム、銅などのワイヤを用いることによって、Si センサーのような集積回路上の電極と基板の電極等を電気的に接続する作業のことである。

今実験では名古屋大学宇宙線研究室の田島教授の協力のもと、名古屋大学のボンディングマシンを使用させていただき、ボンディングの実験を行った。図 3.12 は名古屋大学にある K&S 社のボンディングマシン (Model 4522 Analog) で、左右に付いているダイヤルを調整することによって、ボンディングワイヤが出る図 3.13 の上部に見える針のような部分を電極に押し付ける時間や強さや、電極から電極までのワイヤの長さ、また、その際引き上げるワイヤの高さなどのパラメータを調整することができる。パラメータを上手く調整することで図 3.13 のように電極から電極にワイヤを接続することができる。



図 3.12: ボンディングマシン

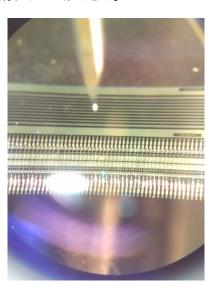


図 3.13: 練習用基板

3.3.3 シリコンドリフトセンサーのボンディング

シリコンドリフトセンサーで信号を読み出すためには、読み出しチャネルと、電圧をかける Pad、ガードリングなどの Pad にボンディングを行う必要がある。

図 3.14 はシリコンドリフトセンサーの読み出しチャネルである anode PAD に上から順に番号をつけた図で、青色である ch が読み出し予定の ch である。読み出す位置によって測定項目である暗電流や容量、スペクトル、分解能などにどのような違いが得られるのかを調べる。本来ならば、全チャンネルを読み出したいが、今回は基板製作などの都合上 1-5, 10, 20, 30, 35, 45, 55, 60-64 の全 64ch 中の 16ch の読み出しを行えるようにしている。また、中心部分に比べて端の ch が多いのは、端より外側は電場が存在しないため、端付近で電場構造が急激に変化し中心付近とは違う結果が得られるのではないかと考え、それを検証するためにも端の方の ch を多く読み出すことにした。

図 3.14: 読み出し予定の ch

読み出しチャネル以外の anode PAD は、電気的に浮かせないようにするために、すべて GND におとす必要がある。そのために、図 3.15 のように、上下に長い電極を設置し、センサーの電極とボンディングすることで読み出したい ch 以外を GND と同電位にする。

読み出しチャネルや anode PAD などの電極は、個別に読みだしたり電圧をかけたりするために、GND につなぐ PAD につながずに個別の電極にボンディングを行う。

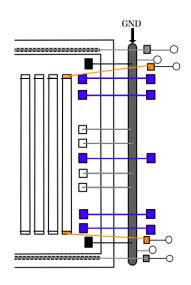


図 3.15: 読み出し以外の ch

3.4 Si-Padによる波形測定の試行

3.4.1 Si-Pad による波形測定のセットアップ

放射線がセンサーのどこで反応したのかを求めるために、今回の実験では波形の立ち上がり時間を求める。シリコンドリフトセンサーでは、空乏層内で生成された電子正孔対のうち、ドリフト速度の速い電子による信号を測定するため、より精密な測定が必要となる。まずは、波形測定によって得られる波形の取得の練習として、Si-Pad から得られる波形を用いて実験を行った。

図 3.16 は Si-Pad で波形を取得する際のセットアップである。

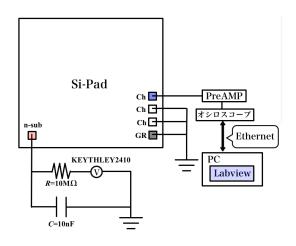


図 3.16: Si-Pad の波形測定のセットアップ

今回用いる Si-Pad は、読み出しチャネル以外の p+0 ch とガードリングを GND におとし、n+0 n-sub に逆バイアス電圧をかけることで、Si-Pad 内に空乏層を広げることができる。その空乏層に放射線が入る ことによって電子正孔対ができ、電子は n-sub 側に、ホールは読み出し ch 側にドリフトをはじめる。ホールは、読み出しチャネルは PreAMP で放射線のエネルギーに比例した電気信号として検出される。オシロスコープで波形を表示し、そのデータを PC に送り、Labview を用いて PC 上で波形を測定した。

3.4.2 波形の測定結果

ドリフト速度は逆バイアス電圧によって変化し、立ち上がり時間も変化すると考えられるので、逆バイアス電圧を変化させながら波形の測定を行った。本実験では、温度を -20° C に保ち、逆バイアス電圧を0V、50V、100V、150V、200V、250V と変化させた。図 3.17 は逆バイアス電圧を変化させたとき、その電圧ごとに波形を 5 回ずつ取得した波形の結果である。また、線源としては 241 Am の密封線源を用いている。縦軸が信号電圧で、横軸が時間のスケールである。

立ち上がりは 0V の赤線や 50V の青線のような逆バイアス電圧が低いとき (0V、50V) は、ノイズも多く、立ち上がりが緩やかなものがあることが分かった。

これは、今回用いたセンサーは逆バイアス電圧が約 230V で完全に空乏化すると考えられている [14] ため、逆バイアス電圧が低い時はまだ完全に空乏化していないと考えられる。(2.10) 式と (2.11) 式から分かるように、電圧が低いほど立ち上がり時間が遅くなることと一致している。

ただし、本実験ではドリフト開始時間を任意の時間にしており、手動でドリフト開始時間を重ね比較しているので、今後はこのドリフト開始時間を原点として、それから立ち上がるのに必要な時間を定量的に 測定していきたいと考えている。

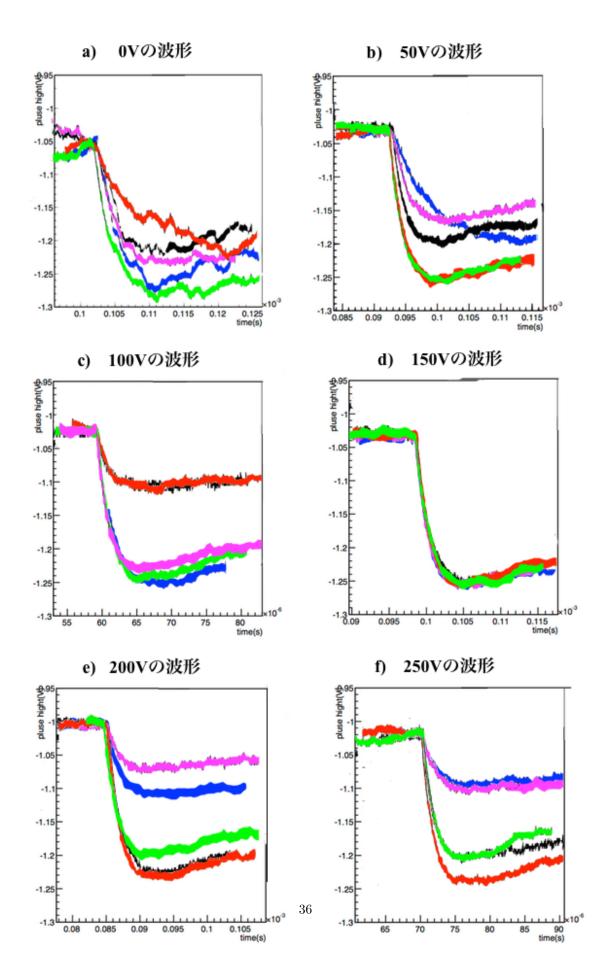


図 3.17: -20°C での逆バイアス電圧による波形の変化

また、得られた波形の立ち上がり時間は、数十 μs オーダーであったので、電子の立ち上がりにしては、立ち上がり時間のスケールが大きすぎる。2.2.2 節の座標系と式 2.10 を用いることで、 $\mathrm{Si\text{-}pad}$ で生成したした電子の反応位置と立ち上がり時間の関係を図 3.18 のように求めることができる。ただし、 $\tau=5\times10^{-9}\mathrm{s}$ 、 $\mu_h=480\mathrm{cm}^2/(\mathrm{V}\cdot\mathrm{s})$)、 $mu_e=1350\mathrm{cm}^2/(\mathrm{V}\cdot\mathrm{s})$ である。また、これは位置 x_0 で反応した電子がどのくらいの時間をかけて収集されるのかを示しており、これによると長くても電子は数十 ns オーダーで収集されると考えられる。

そのため、本実験で得た波形は電子による立ち上がり時間でない可能性が高い。それを確認するために、Si-Pad 以外の回路や機器で、立ち上がりを遅くしているものがあるのではないかと考えた。そこで、テストパルスを PreAMP に入れることで、PreAMP がどの程度の立ち上がり時間まで処理できるのかを立ち上がり時間を $200\mathrm{ns}$ 、 $100\mathrm{ns}$ 、 $50\mathrm{ns}$ と変化させることで調べた。その結果、PreAMP 後に得られた波形の立ち上がり時間はテストパルスの立ち上がり時間に依らず、どれも数十 μs オーダーであることが分かった。このことから、本実験で用いる予定だった PreAMP(CP5102) は波形の処理に時間がかかるため、 μs オーダー以上の速い速度で立ち上がる信号を測定することはできないことが分かった。そのため今後シリコンドリフトセンサーの立ち上がり時間を測定するときは、より反応の速い PreAMP を用いるなどの対策を取って行かなければならない。

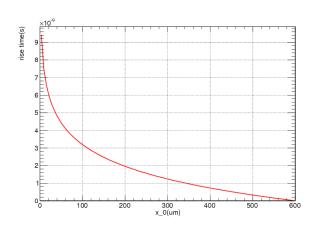


図 3.18: Si-pad の反応位置と立ち上がり時間の関係

3.5 製作されたシリコンドリフトセンサーの基板

3.5.1 第1回目の製作

ボンディングを行う際、基板とセンサーの接触面が非常に少ないことから、センサーが基板から外れる可能性があったため実際にボンディングを行なってみないと成功するか失敗するか分からないという状態で行われていた。

結果、その基板の製作やボンディングは無事に成功したが、残念なことに輸送中にシリコンドリフトセンサー自体が図 3.19 のように破損していた。破損部は、読み出し付近に縦方向と横方向に割れている。こ

のような壊れたセンサーで高圧電源を印加してしまうと、暗電流が急激に増加しブレークダウンを起こしてしまうため、このセンサーで実験は行えないという結論に至った。

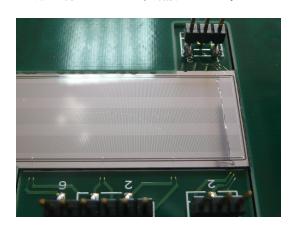


図 3.19: 破損したシリコンドリフトセンサー

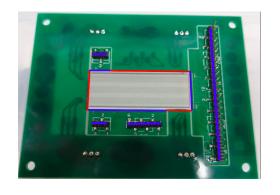
3.5.2 破損の原因推測

梱包状態としては、底面にスポンジを貼りつけたプラスチック樹脂ケース内に基板を入れて、そのプラスチックケースごと緩衝材を入れたダンボールに入れていた。また、基板には 2.54 ピッチの PIN ヘッダが数点実装されており、その PIN ヘッダをプラスチックケース底面のスポンジに指して挿入していた。

スポンジは何も力を加えない状態で 1cm で力を加えると 3mm 程度まで潰れることが確認できた。また、上下に伸びている PIN ヘッダとケースの高さは、5mm 程度しか余裕がなく、ケースが 5mm 以上歪んでしまうと、PIN ヘッダを通じて基板に直接力が加わるのではないかと推測できる。プラスチックケースは力を加えてやることで 1cm 以上の歪みが確認できた。そのため、ケースに力が加わり 5mm 以上歪んでしまい、その結果シリコンドリフトセンサーの片側に上向きの力が加わり、もう片側に下向きの力が加わったため、センサーが破損してしまったのではないかと考えられる。

図 3.20 左は PIN ヘッダ力を加えることによってセンサーのどの部分に力が加わるのかを考察した図である。この図にある青色の線が引かれた PIN ヘッダが上から押されることにより、この PIN ヘッダが固定されている下の基板に力が加わり、結果的にセンサーと下の基板の接着部分である青線の部分に下向きの力が加わる。同様に上の基板に固定されている裏側の PIN ヘッダに力が加わることにより、センサーと基板の接着部分である赤色の部分に上向きの力が加わる。図 3.20 右は PIN ヘッダからセンサーにかかる力の断面図である。図のようにプラスチックケースに力が加わり、センサーに上の力と下の力が同時に加わり、センサー自体が破損したのではないかと考えられる。

また、今回の梱包の箱には「精密機器」「取り扱い注意」「上積み禁止」のステッカーが貼ってあったが、 運送会社によると輸送中に絶対上積みしてないとは言い切れないとのことで、発送直後の開封での破損は 運送会社の責任であるとの報告を運送会社より直接受けている。そのため、運送の際に外装のダンボール に何らかの力がかかり、プラスチックケースに力がかかることでセンサーが破損したと考えられる。



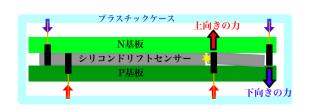


図 3.20: 左図:PIN ヘッダからセンサーにかかる力、右図:PIN ヘッダからセンサーにかかる力の断面図

3.5.3 今後の基板製作に向けての対策

今回のセンサーの破損の原因として考えられるものの中で、一番有力なのが輸送中であると考えられるで、この失敗を生かして、次回の製作・運搬の際に活かせるように今後できる対策について考え、今後センサーなどの精密機器を輸送する際には気をつけていきたい。

また、業者から 2 つ目のシリコンドリフトセンサーを輸送する際には以下のような対策を行い運搬すると提案された。

- 1. 今回のような精密かつ基板の発送の際は運送業者を利用せずに、人の手を使って運搬する。 ちゃんと固定し、曲がらない容器に入れて運送する際は別だが、運送業者は1つの荷物だけを取り扱っ ているわけではないので、今回のように不慮の事故も起こりかねない。そのためにも、手の届く範囲 に置いておけるようにした方が良いと考えられる。
- 2. PIN ヘッダから基板に直接力がかからないように、事前にスペーサーなどで固定をしておく。 このようにしてアルミ板で固定することで、センサーを入れているプラスッチクケースに力が加わり 歪んでしまったとしても、PIN ヘッダを通じてセンサー自体に力が加わることはなくなると考えられる。そのため、図 3.21 のように基板にスペーサーを留め、その上にアルミニウム板で上下をネジ止めをして固定して輸送する。



図 3.21: シリコンドリフトセンサーの固定方法

今回の破損は、プラスチックケースに力が加わり、その力が PIN ヘッダを通じてセンサーにかかってしまったためだと考えられる。また、プラスチックケースが潰れたときの厚さよりも基板についた PIN ヘッダの高さが高くなってしまうために、このような事故が起こったと考えられる。

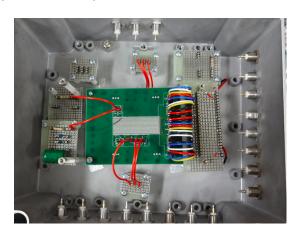
そのため、もう少し大きめのケースにすることで、例えケース自体に力が加わり歪んだでも PIN ヘッダ に直接力が加わらず固定のためのスポンジで力を吸収するようにすれば良いと考えられる。また、変形してしまうようなプラスチックケースには入れずに、固いケースに入れて運搬する方が良いと考えられる。

3.6 第2回目の製作

1回目のセンサーが破損してしまったので再び実験を行うために、名古屋大学の田島教授よりシリコンドリフトセンサーが提供された。基板については 1回目の時に制作していた基板の残りがあったため、再びシリコンドリフトセンサーにダイボンドとボンディングが行われることとなった。そして、無事に 2/5 に完成し、2/6 に本研究室に届けられた。

また、前回は輸送時に破損してしまったと考えられるので、今回は事前に業者にシリコンドリフトセンサーを入れるケースに固定することになった。また、センサーの基板に配線を行う際にセンサーに余計な負荷がかかる可能性があったので、配線についても業者に行なってもらった。図 3.22 左が到着後のシリコンドリフトセンサーである。

電圧を印加したり、読みだしの信号は導線ケーブルを用いてアルミケースにとりつけた BNC コネクタ (22BNC-50-0-16) を使用して外部の回路と接続する。



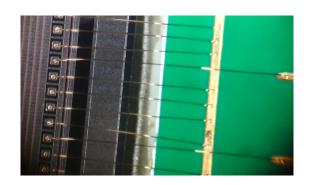


図 3.22: 左図:到着後のシリコンドリフトセンサー、右図:読み出し付近ののボンディング

図 3.22 右はアノード付近のボンディングが行われた電極の写真である。信号を読み出す予定のチャネルは、左端にあるアノードの電極から個々に読み出せるようにしている。また、その他の読み出さないチャネルは GND におとすために縦方向に伸びている電極にボンディングを行っている。

全 64ch 中 16ch の読み出しを行う予定であるため、それらを個別に読み出せるようにして、それ以外を GND におとしている。

第4章 まとめと今後

4.1 まとめ

本研究では、シリコンドリフトセンサーの基礎特性評価を行うための基板の設計やセットアップの立ち上げ等をおこなった。また、基板を設計する際には実際にボンディングの練習を行い、ボンディングの難しさを体感することで、基板の設計に役立てることができた。その結果、セットアップの立ち上げが完了し、基礎特性評価の実験を行える環境を整えることができた。

4.2 基板の改良点

今回、基板の設計をしていた当初はシリコンドリフトセンサーの構造や、基板の設計などの知識が不足していた。そのため、センサーの構造について学んで行くにつれ、何点か改良したほうがいいと思われる点が出できたので、以下にそれをまとめる。

- 1. 読み出し側のガードリングを個別に読み出すことができない 今回の基板の設計の際にはアノード付近のガードリングは読み出さないシャネルと一緒に GND おと す予定だったため、個別に読み出せるようにしておらず GND の PAD に読み出さないチャネルと一 緒にボンディングを行なっていた。その結果、ガードリングに流れる暗電流やカソードとガードリン グ間の容量を個別に読み出せなくなってしまった。
- 2. 電圧チェック用の読み出しの表裏には導通を取っていなかった シリコンドリフトセンサーを完全に空乏層化するためには、端から端のガードリング PAD1 から PAD2 に 800V ほどのドリフト電圧をかける必要があるが、いきなり高電圧をかけるのはセンサーが壊れて しまう可能性があるので危険である。そのため、電圧チェック用の電極からドリフト電圧をかけることができれば、もしかしたらセンサーの読み出し付近だけを空乏層化して、測定できる可能性もある かもしれない。上下に並んでいるドリフトインプラントは同じ電位にする必要があるので、できれば 導通をとる方が良い。
- 3. 裏側に読み出し用の PIN ヘッダを減らせる可能性がある。もし、スルーホールによって裏側と導通が取れるのなら、全部表側から読み出せるような設計をすることができたかもしれない。また、これによって、基盤の構造がより簡単にすることができ、今回基板の作成の際に問題となった接着面が少ない問題も解決することができるかもしれない。しかし、これについては基板の設計の際に業者にスルーホールは難しいと言われていたので、これは両方のメリット・デメリットを考慮する必要がある。

このような点を、今後シリコンドリフトセンサーの基板の設計を行う機会に考慮する。

4.3 今後の実験

本研究では、不慮の事故によってシリコンドリフトセンサーが破損したため、詳しい実験を行うことができなかった。今後、シリコンドリフトセンサーについて、以下のような実験を行なっていこうと考えている。

4.3.1 暗電流測定による電流性ノイズの測定

シリコンドリフトセンサーは電子をドリフトさせるために高圧の電圧をかけなければいけないため、ブレークダウンが起こりやすい。しかし、高電圧を一気に印加してしまうと、センサーが壊れてしまう可能性があるので、まずは、読み出し ch であるアノード付近を空乏化することでシリコンドリフトセンサーが正常に動作するのかを確認する。正常に動作することが確認できたら、逆バイアス電圧の値を少しずつ上げながら、ブレークダウンが起こり壊れないようにドリフトセンサーに流れる暗電流を測定する。

この暗電流は電荷キャリアが熱励起する確率に比例し、その確率は温度を低くするにつれ小さくなる。この暗電流の温度依存性を調べるために、 -20° C、 -10° C、 0° C、 10° C、 0° C、 0° C の温度で暗電流を測定する。温度が低くなるほど暗電流は小さくなると考えられるので、実際に小さくなるのかを確認し、エネルギー分解能への寄与を考察する。

また、シリコンドリフトセンサーを全空乏層化させ、生成される電子正孔対をセンサーの端から端までドリフトさせるには、逆バイアス電圧を 800V 程度印加する必要があると考えられるが、ブレークダウンの傾向がみられたら電圧の扱いに注意する。

4.3.2 容量測定による容量性ノイズの測定

逆バイアス電圧の大きさを変化させながら、容量がどのように変化するのかを測定し、完全に空乏層化するためには逆バイアス電圧を何 V かければ完全空乏化するのかを調べる。

電圧を大きくするにつれ空乏層が広がり始め、容量が小さくなるが、徐々に容量が減少しにくくなると 考えられる。これは、空乏層がセンサーの厚さに近づき広がりにくくなっているためであり、その極限が完 全空乏化した時の容量となる。

ただし、暗電流の測定でブレークダウンの傾向がみられた電圧以上の電圧は印加しないように注意する。 容量については、Body 容量と ch 間容量が考えられるので、この 2 つの容量について測定を行う。

次に、容量の原因となる空乏層の広がりには温度は関係ないと考えられるので、温度依存性があまりないと考えられるが、実際に温度変化をしないのかどうかを、温度を -20° C, 0° C, 20° C で測定することで確かめる。

また、シリコンドリフトセンサーは読み出し \ch の面積を小さくすることで、センサーの容量が小さくなると期待されているので、 SGD で用いられている $\operatorname{Si-Pad}$ と比較し、実際に容量が小さくなっているのかの検証も行う。

4.3.3 スペクトル測定によるエネルギー分解能の測定

線源として 241 Am の密封線源を用いてスペクトルを測定することで、エネルギー分解能を求め、暗電流によるノイズと容量によるノイズがどのようにエネルギー分解能に影響を与えているのかを考察する。暗電流によるノイズは、温度を低くすると少なくなると考えられるので、 $^{20^{\circ}}$ C、 $^{10^{\circ}}$ C、 $^{0^{\circ}}$ C、 $^{10^{\circ}}$ C、 $^{0^{\circ}}$ C、 $^{10^{\circ}}$ C、 $^{0^{\circ}}$ C、 $^{10^{\circ}}$ C、

このようにして求めたエネルギー分解能の値を、2.2.4 節で述べたエネルギー分解能の理論式に、その温度と逆バイアス電圧での暗電流と容量の値を代入することで理論式と比較する。

また、エネルギー分解能を左右するものに Shaping Time によるものも考えられるので、Shaping Time を変化させることによって、エネルギー分解能が一番良くなる値についても同様に測定する。

4.3.4 波形測定による反応位置の測定

シリコンドリフトセンサーは、宇宙線によって生成された電子正孔対が生成された場所からドリフトして電極で収集されるまでのドリフト時間を求めることで反応位置を求めることができるセンサーである。このドリフト時間を求める方法の1つに波形測定を行い、その立ち上がり時間を調べる方法がある。

そのため今後の実験では、波形の立ち上がりから電子正孔対の反応位置を求める方法を用いる予定である。電気信号として検出される電子や正孔のドリフト速度は温度によって変化するので、温度を-20°C、0°C、20°C と変化させることによって、波形の立ち上がりに違いがみられるのかを検証する。また、逆バイアス電圧によってもドリフト速度は変化すると考えられるので、逆バイアス電圧を変えて波形がどのように変化するのかについても検証を行い、最終的に得られた波形をフィッティングすることでドリフト時間を求める。

しかし、ドリフト時間は電位差に依存するため、逆バイアス電圧によって変化し、逆バイアス電圧が大きくなるほど、波形の立ち上がりにかかる時間は短くなると考えられる。また、電子が収集されるまでのタイムスケールは数 ns のオーダーであるため精密な測定する必要がある。そのためには、測定に使う PreAMPやオシロスコープなどの整形時間などが数 ns でも精度よく測定できるものを用いたり、ノイズの対策を行ったりしなければならない。そのため、非常に精度の良い測定をしなければ、ドリフト時間の違いを波形の立ち上がりから求めるのは困難になると考えられる。そこで、プラスチックシンチレータ等で宇宙線をトリガーすることでドリフト開始時間を求め、その時間差からドリフト時間を測定する方法を用いる方法があり、今後はその実験に関しても検討していきたいと考えている。

シリコンドリフトセンサーは、ドリフト時間から宇宙線の反応位置を求めるため、そのドリフト時間を どれだけ精度よく求め、反応位置を求めることができるかが重要となってくる。そこでどのような方法でド リフト時間を求めるのが一番精度が良いかなどを考えることが今後の重要な課題となってくる。

4.4 シリコンドリフトセンサー内の電場の数値計算

本研究で用いたシリコンドリフトセンサーのサイズで数値計算を行うことで、図 2.11 のようなポテンシャルの勾配を求める予定である。これによって、センサー内のポテンシャルの構造や電場構造を求めることができ、センサー内で生成された電子やホールがどのような方向に移動するのかを求めることができる

ようになる。また、このポテンシャルの傾きより電場を求めることができるので、、(2.6) 式の E 代入することで、電子の立ち上がり時間を求めることができる。このようにして求めた結果と、実験により求めた波形から立ち上がり時間を求めることで、放射線の反応した位置を求める。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、指導教官である深沢先生は、日々の研究の指導に加え、論文の添削などをしてくださいました。また、センサーが壊れた際は、すぐに田島先生や宇宙研の方にセンサーを貸していただけないかどうか交渉していただきました。さらに、ボンディングや基板設計など、様々なことに挑戦させてくださいました。シリコンドリフトセンサーで実験できることを大変誇りに思っております。本当にありがとうございました。

大杉先生にはシリコンドリフトセンサーをはじめ、検出器について多くのことを教えていただきました。センサーの基板を作る際には、先生が以前作られていた両面ストッリップセンサーの基板を実際に見せていただき、大変参考になりました。また、シリコンドリフトセンサーの実験のセットアップを考えているときは、非常に親身になって一緒に考えていただきました。大杉先生には色々と迷惑をかけてしまいましたが、先生のおかげでたくさんの知識を得ることができ、成長することができました。本当にありがとうございます。しかし、まだまだ知識不足であるためこれからもご指導のほどよろしくお願い致します。

田島先生には、ボンディングの練習のためにボンディングマシンを使わせて頂いたり、シリコンドリフトセンサーについてもたくさん教えていただいたりしました。さらに、おすすめの参考書まで紹介していただき、ドリフトセンサーについて多くのことを学ぶことができました。また、お忙しい中、本論文の添削もしていただき、本当にありがとうございました。これからも、多くのことを質問させていただくかもしれませんが、その時はどうぞよろしくお願いいたします。

業者の皆様は、基板の製作・ボンディングを依頼した際、とても難しい案件であったのにも関わらず、快く引き受けてくださいました。また、打ち合わせの際には、より成功しやすくなるようにと親身になって考えてくださいました。大変感謝しております。そして、非常に難しいとされていたボンディングも見事成功させてくださいました。一度は輸送中に残念な結果となってしまいましたが、すぐに次の対策を練っていただいたき、無事に納品してくださいました。皆様のおかげでこれからドリフトセンサーを用いて実験を行うことができます。本当にありがとうございます。

白川さんには、Si-Pad の実験で培われた技術や知識を分かりやすく解説していただきました。また、実験で分からないことがあった時には、方法を教えてくださったり、一緒に考えてくださいました。白川さんのおかげで実験方法や検出器についての知識を得ることができました。本当に感謝しています。

また、先輩方には分からないこと大変分かりやすく教えていただきました。特に河野さんには、フィッティングのやり方や、ポスターを作る際にアドバイスもいただきました。また、ポスターの印刷をするとき、夜遅くに手伝っていただきました。おかげで、無事にポスター発表をすることができました。本当にありがとうございました。

同期の皆さんには、一年間大変お世話になりました。夜遅くまで一緒に卒論を頑張ったり、実験の手伝いをしてくれて嬉しかったです。皆さんがいたからこそ、この一年を無事に終えることができました。本当にありがとうございます。瀧本さんは、いつも顔芸やものまねで私を笑わせてくれました。おかげで、辛い時も笑いながら乗り切ることができました。今後辛いことがあったら、その顔芸を思い出して笑いたいと思います。就職してもぜひ広島に遊びに来てください。大橋さんは、いつも癒しのオーラで私を癒してくれていました。いつも真面目に頑張っている大橋さんのようになりたいと目標にして頑張ることができました。また、一緒に昼食を食べながら話すことが、論文執筆中の良い気分転換になっていました。2人がいたから

こそ途中で投げ出さずに最後まで頑張ることができました。本当に感謝の気持ちでいっぱいです。

多くの人に支えられながら、卒論を無事に書き終わることができました。今後ドリフトセンサーの実験をして、自分で納得のできるような結果を出していきたいと思っております。本当にありがとうございました。

関連図書

- [1] ASTRO-H 次期国際天文衛星, http://astro-h.isas.jaxa.jp
- [2] JAXA の X 線天文観測, http://www.jaxa.jp/article/special/xray
- [3] 「すざく」衛星, http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep
- [4] 上野一誠、 卒業論文「ASTRO-H 搭載宇宙軟ガンマ線観測用 Si センサーの軌道上放射線損傷による 影響」, 広島大学, 2012
- [5] 白川裕章, 卒業論文「将来コンプトンカメラ用新型 Si-Pad センサーの基礎特性評価」, 広島大学, 2014
- [6] 道津匡平, 修士論文「X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線観測装置用 Si-Pad センサーの基礎特性評価」, 広島大学, 2010
- 「7」神野郁男ほか、「放射線計測ハンドブック第4版」
- [8] Gerhard Lutz, 「Semiconductor Radiation Detector」
- [9] W.R.Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments J
- [10] NARAN D. ARORA, 「Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of Concentration and Temperature」
- [11] Hein Valk, Development of Advanced Silicon Drift Detectors J
- [12] 古井俊也, 卒業論文「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの搭載同等品の性能評価」, 広島 大学, 2013
- [13] Hiroyasu Tajima, ものづくり講義「放射線検出器 2 半導体検出器の実用例」, 名古屋大学, 2011
- [14] 中村竜, 修士論文「ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの基礎特性評価と Multi Hit イベント解析」, 広島大学,2014
- [15] 岡田祐,修士論文「テルル化カドミウム半導体を用いた高速ガンマ線検出器とそのイメージングへの応用」,東京大学,2001
- [16] 花畑義隆, 修士論文「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載アクティブシールドの基礎特性評価とデジタル信号処理の検討」, 広島大学, 2010