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

M096728 道津 匡平

広島大学 理学研究科 物理科学専攻

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

主査 深沢泰司

副査 志垣賢太

2011年2月10日

2014年打ち上げ予定のX線天文衛星ASTRO-Hに搭載される軟ガンマ線検出器(SGD)は、ファ インコリメータを用いた狭視野多層半導体コンプトンカメラとBGOアクティブシールドにより、 40-600keVのエネルギー帯域で従来より1桁以上良い感度を目指す(図1)。これにより、従来の検 出器感度では観測が困難であった銀河団、ブラックホール、超新星残骸などからの非熱的放射を 明らかにすることができ、粒子加速などの問題の解明につながると期待されている。

SGD の主検出部である多層半導体コンプトンカメラは多数のSi、CdTe センサーから成ってお り、入射した光子がこれらのセンサーでコンプトン散乱、光電吸収される際に検出したエネルギー と位置情報からコンプトン再構成により光子の到来方向を予測し、視野外の信号をバックグラウ ンドとして除去することができる仕組となっている。

SGD に使用する Si センサーには Si-Pad 型センサーが採用されている。このセンサーは、図 2 の様に平板状 N 型 Si に Pixel 状 P 型 implant を敷き詰めた構造になっており、各 Pixel から信号を読み出すことで入射した光子の二次元的な検出位置情報を得ることができる。

本論文では、16 × 16 チャンネルの試作 Si センサー (エンジニアリングモデル、EM) について、 その基礎特性実験として暗電流測定、容量測定、X 線読み出し試験を行った。その結果から、各 Pixel から出ている信号読み出し用の引出し線が他の Pixel 上を通る際に無視できない容量が発生 すること、さらにセンサーの端の Pixel 上にある BondingPad が容量を発生させることで、これら による容量性ノイズがエネルギー分解能に影響し、一部のチャンネルで SGD からの要求性能を達 成できないことがわかった。

この結果から、我々はエンジニアリングモデルを改良した衛星搭載用モデル(フライトモデル、 FM)を開発した。このモデルはSGDからの要求性能を達成するために、引出し線-Pixel間の絶 縁層の厚さを1.5倍にし、さらにBondingPadをPixel外のGuardRing上に設置することで、容 量性ノイズを低減する改良を施したものである。本論文では、このフライトモデルの最終試験と して基礎特性実験(暗電流測定、容量測定、X線読み出し試験)を行い、ほとんどのチャンネルで SGDからの要求性能を達成することを実験的に確認した。さらにこのセンサーに、広島大学大学 院工学研究科放射線総合実験棟においてガンマ線を照射し、その後のセンサーの性能を測定した 結果、衛星軌道上での使用によるショットノイズ増加の影響は、現状のデザインで十分小さいこと を確認した。





図 2: Si-Pad センサーの概観

図 1: SGD の断面図

目 次

第1章	宇宙 X 線・ガンマ線観測と次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	7
第2章	軟ガンマ線検出器 SGD とシリコンセンサー	9
2.1	軟ガンマ線検出器 SGD	9
2.2	シリコンセンサー	11
	2.2.1 半導体センサーのノイズ源	12
	2.2.2 Si-Pad センサー	15
2.3	Si-Pad に要求される性能	16
2.4	開発の経緯・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
第3章	エンジニアリングモデル Si-Pad の基礎特性評価	19
3.1	評価項目....................................	20
	3.1.1 暗電流測定	21
	3.1.2 センサー容量測定	21
	3.1.3 X線読み出し	22
	3.1.4 ガンマ線照射による性能への影響の検証	23
3.2	暗電流測定結果	27
3.3	センサー容量測定結果	28
3.4	X 線読み出し実験結果	31
	3.4.1 エネルギー分解能の ShapingTime 依存性	32
	3.4.2 pixel 毎のエネルギー分解能の分布	33
	3.4.3 X 線カウント数と空乏層の厚み	34
3.5	ガンマ線照射後の性能への影響の検証..............................	35
	3.5.1 暗電流の照射量依存性	36
	3.5.2 暗電流の温度依存性	36
	3.5.3 ショットのイズへの影響	37
3.6	エンジニアリングモデルの基礎特性実験のまとめ	38
第4章	フライトモデル Si-Pad の基礎特性	39
4.1	評価項目	41
	4.1.1 暗電流測定	41
	4.1.2 センサー容量測定	41
	4.1.3 X 線スペクトル測定	41
	4.1.4 ガンマ線照射による性能への影響の検証	42
4.2	暗電流測定結果	43
4.3	センサー容量測定結果	44
4.4	X 線スペクトル測定結果	45
	4.4.1 エネルギー分解能の ShapingTime 依存性	46

	4.4.2	pixel 毎のエネルギー分解能の分布47
	4.4.3	X 線カウント数と空乏層の厚み 47
4.5	ガンマ	2線照射後の性能への影響の検証48
	4.5.1	暗電流の照射量依存性49
	4.5.2	暗電流の温度依存性50
	4.5.3	高印加電圧での暗電流の振舞い
	4.5.4	10krad 照射後の高電圧下での信号波形 52
	4.5.5	ショットのイズへの影響 54
4.6	フライ	、トモデルの基礎特性実験のまとめ54

第5章 まとめと今後

図目次

1	SGD の断面図	1
2	Si-Pad センサーの概観	1
1.1	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	8
2.1	SGD の断面図	10
2.2	コンプトンカメラの概念図.................................	11
2.3	Si の光電吸収とコンプトン散乱の反応断面積	12
2.4	複数チャンネルのセンサーの容量	13
2.5	引出し線により発生する容量..................................	13
2.6	半導体センサーの雑音等価回路	14
2.7	Si-Pad センサーの概観	15
2.8	SGD の1ユニットの構成	16
2.9	SGD 有効面積のエネルギー依存性 [10]	17
2.10	X 線センサーとして初めて試作された Si-Pad	17
2.11	衛星搭載品とほぼ同等の Si-Pad	17
3.1	エンジニアリングモデル Si-Pad の引出し線.........................	19
3.2	試験用ボードの設計図	20
3.3	Si-Pad から信号読み出し可能な pixel(赤色部分)	20
3.4	実際に製作された試験用ボード	20
3.5	試験用ボードに接着した Si-Pad	20
3.6	1pixel 暗電流測定のセットアップ	21
3.7	全 pixel 暗電流測定のセットアップ	21
3.8	Body 容量測定のセットアップ	22
3.9	ch 間容量測定のセットアップ	22
3.10	X 線 1ch スペクトル読み出しのセットアップ	23
3.11	放射線損傷により生じる新たなエネルギー準位.................	24
3.12	⁶⁰ Co ガンマ線照射室	24
3.13	⁶⁰ Co 照射に使用した Si-Pad の引出し線	25
3.14	ガンマ線照射試験用ボードの設計図	25
3.15	ボンディングの様子	25
3.16	ガンマ線照射時の Si-Pad のセットアップ	26
3.17	照射室内のセットアップ	26
3.18	暗電流時間変化測定のセットアップ	27
3.19	P 側全 pixel 暗電流	28
3.20	P 側 1pixel 暗電流	28
3.21	インピーダンス周波数特性...................................	29

3.22	Body 容量測定結果	29
3.23	ch 間容量測定結果	29
3.24	引出し線の容量への寄与の概念図	30
3.25	引出し線容量の近似計算	30
3.26	引出し線長さと容量の相関図	31
3.27	BondingPad の容量への寄与の概念図	31
3.28	1ch で取得した ²⁴¹ Am の X 線スペクトル	32
3.29	20 におけるエネルギー分解能の ShapingTime 依存性	32
3.30	エネルギー分解能の pixel 毎の分布	33
3.31	引出し線とエネルギー分解能の関係..............................	33
3.32	エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (朴測定)[8]	33
3.33	引出し線とエネルギー分解能の相関 [8]	33
3.34	エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (田中測定)[23]	33
3.35	引出し線とエネルギー分解能の相関 [23]	33
3.36	²⁴¹ Am の 60keV カウント数の HV 依存性 (EM)	34
3.37	カウント数測定セットアップ図	35
3.38	カウント数測定セットアップ写真	35
3.39	照射実験で選んだ測定 pixel	35
3.40	照射量毎の pixelNo46 の暗電流時間変化	36
3.41	20 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性	36
3.42	-15 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性	36
3.43	照射量毎の pixelNo46 暗電流の温度依存性	37
3.44	照射量毎の Shot noise 計算値	37
4 1		20
4.1		39
4.2		40
4.3		40
4.4	SI-Pad から読み出しり能な pixel(亦叩部分)	40
4.5	ノフィトモナル SI-Pad カノマ緑照射時のセットアップ与具	42
4.6	SI-Pad の局さを 15cm に調即した与具	42
4.7	温度 20 にのりる P 側王 pixel 喧電流 \dots	43
4.8	温度 20 にのりる Ipixel のにりの咱電流	43
4.9		43
4.10	20 C-10 にのける咱电加口V 1019注	44
4.11	1 ノビークノス向波奴付任 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
4.12	Dody 谷里,则定和未 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
4.15	CII 间谷里/別に約末 。 。 。 的 問 容 書 と 引 出 し 娘 트 さ の 問 係	40
4.14		40
4.10	ICI(NOSSD) C 取得 U に AIII の X 緑入 (ソトル · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	40
4.10	p_{LCINOOOD} Wエイルエーカ所形皿反似行社	40 46
4.11	-15、 pixelNo00の ShapingTime 依存性	40 46
4.10	-10、 pixelly000 of Shaping Time 版1+1±	40 46
4.19	-10、 pixel(020 or shaping time)() $+12$	40 47
4.40	- 1.1 M HRAN hree $-$ 4.0 M (11.23 VC) $[70]$	±1

エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (田中測定)[24]	47
引出し線のエネルギー分解能の相関 [24]	47
²⁴¹ Am の 60keV カウント数の HV 依存性 (FM)	48
照射実験で選んだ pixel	49
照射量毎の pixelNo00 の暗電流時間変化	49
20 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性	50
-15 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性	50
照射量毎の pixelNo00 暗電流の温度依存性	50
1krad 照射時の HV と暗電流値の時間変化	51
10krad 照射後 , -15 下での P 側全体の暗電流 HV 依存性	51
Training Effect が起きる電圧の時間変化	51
pixel 端で Micro-discharge が起きる様子の概念図	52
HV=330V, -15 での pixel-No28 のプリアンプ出力波形	52
HV=340V, -15 での pixel-No28 のプリアンプ出力波形	52
-15 , HV=250,340[V], pixel-No28 での ²⁴¹ Am のスペクトル	53
-15 , HV=250,340[V], pixel-No00 での ²⁴¹ Am のスペクトル	53
-15 , HV=250,340[V], pixel-No33D での ²⁴¹ Am のスペクトル	53
照射量毎の Shot noise 計算値	54
pixelNo00の照射量毎の Shaping Time 依存性	54
pixelNo33D の照射量毎の Shaping Time 依存性	54
	エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (田中測定)[24] 引出し線のエネルギー分解能の相関 [24] ²⁴¹ Am の 60keV カウント数の HV 依存性 (FM) 照射実験で選んだ pixel 照射実験で選んだ pixel 20 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性 -15 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性 -15 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性 照射量毎の pixelNo00 暗電流の照射量依存性 10krad 照射時の HV と暗電流値の時間変化 10krad 照射後, -15 下での P 側全体の暗電流 HV 依存性 Training Effect が起きる電圧の時間変化 pixel 端で Micro-discharge が起きる様子の概念図 HV=330V, -15 での pixel-No28 のプリアンプ出力波形 HV=340V, -15 での pixel-No28 のプリアンプ出力波形 -15 , HV=250,340[V], pixel-No28 での ²⁴¹ Am のスペクトル -15 , HV=250,340[V], pixel-No33D での ²⁴¹ Am のスペクトル



2.1	SGD のへ要求性能 [10]	16
2.2	Si-Pad のへ要求性能 [12]	17
3.1	衛星搭載用 Si-Pad の仕様 [12]	19
3.2	逆電圧 200V での各温度下の暗電流	28
3.3	逆電圧 200V、300V でのエンジニアリングモデル Si-Pad の空乏層厚みの計算値	35
3.4	照射量毎の暗電流温度依存性へのフィッティング結果	37
4.1	逆電圧 200V、300V でのフライトモデル Si-Pad の空乏層厚みの計算値	48
4.2	照射量毎の暗電流温度依存性へのフィッティング結果	50

第1章 宇宙X線・ガンマ線観測と次期X線天文 衛星ASTRO-H

宇宙空間には無数の星や星間物質が存在しており、それらは電波からガンマ線に到るまでさま ざまな波長の光で輝いている。その中でもブラックホール、中性子星、超新星残骸などの高エネ ルギー天体からの放射は、高エネルギーに加速された粒子のシンクロトロン放射やコンプトン散 乱などによって X線・ガンマ線帯域にわたる非熱的放射が放射されていると考えられている。現 代の技術ではこれらの現象を地上実験で実現することは不可能であることから、宇宙における粒 子加速機構を解明するには X線・ガンマ線を用いて高エネルギー天体の観測を行うことが非常に 重要である。また、これらの観測の成果は宇宙物理学に限らず、素粒子物理学の観点からも有意 義なものである。

X線・ガンマ線はエネルギーが高く星間空間での吸収・散乱を受けにくいため、高エネルギー 天体の観測には適した波長域である。しかし、X線・ガンマ線は地球の大気による吸収を受ける ため地上で観測することは困難であり、人工衛星や気球による飛翔体観測が必須である。X線天 文学の歴史は、1962年ジャッコーニらによるロケット観測で宇宙からのX線の観測が初めて行わ れたことに始まる。特に人工衛星を用いた観測は、1970年NASAにより世界初のX線天文衛星 UHURU (SAS-1)が打ち上げられて以降、日本からも「はくちょう(1979)」をはじめとして「て んま(1983)」「ぎんが(1987)」などの衛星が次々に打ち上げられるなど、宇宙X線の衛星観測技 術は現代に至るまで目覚しい発展を遂げてきた。近年ではISAS/JAXAのASCA(1993)、NASA のChandra(1999)、ESAのXMM-Newton(2000)により軟X線帯域での熱的放射の詳細な観測が 行われ、多くの貴重な成果がもたらされた。またガンマ線においても、日・米・欧共同開発によ るFermi(2008)がGeV帯域において次々に成果をあげている。硬X線・軟ガンマ線帯域において は、2005年に硬X線帯域観測機器HXDを搭載したISAS/JAXAの「すざく」が打ち上げられ、 検出器の低バックグラウンド化により硬X線帯域で世界最高感度の観測が可能となった。

しかしながら、硬 X 線から軟ガンマ線の帯域は軟 X 線などに比べて未だに観測器の感度が低 く、この帯域での放射には未解明な部分が多く残されている。そこで、次世代の X 線天文衛星と して ISAS/JAXA を中心に開発が進められているのが、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H(2014 年打 ち上げ予定)である。ASTRO-Hには高分散 X 線分光検出器 SXS(Soft X-ray Spectrometer, 0.3-10keV)、軟 X 線撮像検出器 SXI(Soft X-ray Imager, 0.5-12keV)、硬 X 線撮像検出器 HXI(Hard X-ray Imager, 5-80keV)、軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, 10-600keV) の 4 つの検 出器が搭載される。SXS や SXI は軟 X 線望遠鏡 SXT(Soft X-ray Telescope) の焦点面に置かれ、 それぞれ「すざく」で実現できなかった実観測による詳細な輝線スペクトルの導出や、「すざく」 搭載 XIS(X-ray Imaging Spectrometer) に代わる検出器として、より視野の広い高精度な観測を 実現する [4]。HXI は、多層膜スーパーミラーというこれまでにない独自の技術を用いた世界初の 硬 X 線帯域での高感度な撮像観測を可能にする [4]。SGD は、狭視野多層半導体コンプトンカ メラを用いた次世代のガンマ線検出方法で、コンプトン運動学によるガンマ線エネルギーや到来 方向の算出により、軟ガンマ線帯域でこれまでにない高感度の観測を実現する。 ASTRO-H はこれら最新の技術を駆使した高精度な観測を行うことで、X 線ガンマ線帯域にお ける宇宙の高エネルギー現象による放射機構を解明することが期待される。



図 1.1: 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

第2章 軟ガンマ線検出器 SGD とシリコンセ ンサー

2.1 軟ガンマ線検出器 SGD

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には 4 種類の検出器が搭載され、軟 X 線から軟ガンマ線までの 幅広いエネルギー帯域でブラックホールや銀河団などの高エネルギー天体を観測する予定である。 その内 10keV-600keV のエネルギー帯域をターゲットとするのが、我々のチームが開発している 軟ガンマ線検出器 SGD であり、同じく ASTRO-H に搭載される硬 X 線撮像検出器 (5-80keV) と 合わせて硬 X 線から軟ガンマ線の広帯域・高感度観測の実現を目指す。しかし、衛星軌道上で行 う観測では高いバックグラウンドレベルが障害となる。これらのバックグラウンドを除去するた め、SGD には「狭視野多層半導体コンプトンカメラ」と「井戸型アクティブシールド」が採用さ れている。

井戸型 BGO アクティブシールドは、現在衛星軌道上で観測中の「すざく」衛星搭載硬 X 線検出 器 HXD で使用されているバックグラウンド除去技術である。HXD は SiPIN ダイオードと GSO 結晶シンチレータから成る主検出部を、井戸型 BGO 結晶シンチレータによるアクティブシールド で囲んだ構造をしている。アクティブシールドはそれ自体が検出器として動作しており、これと 反同時計数をとることで、荷電粒子イベントや荷電粒子由来のガンマ線イベントを除去すること が可能である。このバックグラウンド除去技術により、HXD は 20-300keV での観測において世界 最高レベルの感度を達成している。

しかし、HXD のバックグラウンド除去能力でも、10keV 以下で他の観測機器が達成している感 度には程遠いため、さらなる感度向上のためには HXD でも落としきれなかったバックグラウン ドへの対処が必要である。アクティブシールドとの反同時計数で除去できないバックグラウンド イベントとしては、大気中性子や検出器の放射化由来のものが挙げられる。[3] そこで、これらの バックグラウンドをも除去し、過去最高感度の観測を実現すると期待されるのが、「狭視野多層半 導体コンプトンカメラ」である。図 2.1 に SGD の断面図を示す。SGD はコンプトンカメラを主検 出部として、井戸型アクティブシールドの底に配置する。



図 2.1: SGD の断面図

コンプトンカメラは、検出器内でのコンプトン散乱を検出することで入射光子の情報を得るこ とができる (図 2.2)。コンプトンカメラは散乱体センサーと吸収体センサーの対で構成される。入 射光子はまず散乱体でコンプトン散乱し、反跳電子は散乱体内で止まりエネルギー *E*₁を失う。一 方、散乱光子は吸収体で光電吸収されエネルギー *E*₂を失う。コンプトン散乱角を θ とすると、コ ンプトン散乱の式

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \tag{2.1}$$

より、散乱角 θ は

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \tag{2.2}$$

となる。入射光子のエネルギー E_m は、二つのセンサーで得られたエネルギーの和 $E_m = E_1 + E_2$ として求めることができる。

散乱体におけるコンプトン散乱と吸収体における光電吸収の反応位置と式 (2.2) から求まる散 乱角を用いて、光子の到来方向を円環に制限することができる。散乱角 θ で決定される円錐は光 子のソース (ガンマ線源)が存在しうる領域であり、コンプトンコーン (compton cone) と呼ぶ。同 ーのガンマ線源から複数イベントを得ると、円環の交点からガンマ線源の位置、つまり光子の到 来方向を特定することができる。[3] こうしたコンプトン再構成は測定されたエネルギーと反応位 置を用いるため、到来方向の決定精度を向上させるためには、高いエネルギー分解能および位置 分解能のセンサーが必要とされる。



図 2.2: コンプトンカメラの概念図

2.2 シリコンセンサー

半導体センサーとは、半導体中の電子がX線などの入射光子によって励起されることにより発生したキャリア(電子・ホール)を電気信号として読み取り、入射光子の情報を得る検出器である。 半導体センサーは、従来のX線やガンマ線の検出に用いられていたシンチレータと光電子増倍管などの組合せよりも、一対のキャリアを生成するために必要なエネルギーが小さく、十分なキャリア数をかせぐことができるため、高エネルギー分解能であるという特徴がある。シリコン(Si)はそれら半導体の中でもZ(原子番号)がCに次いで小さいという特徴があり、そのためSGDがターゲットとするエネルギー帯域では、コンプトンカメラの散乱体として有利な点がある。

図 2.3 は NIST のホームページ [2] より引用した、Si の光電吸収とコンプトン散乱の反応断面積 を示した図である。Si は入射光子のエネルギーが 50keV 付近を越えるところでコンプトン散乱の 断面積が光電吸収の断面積を上回る [6]。これより Z の大きい半導体だとこの領域において光電吸 収が支配的になってしまうことがわかる。よって、Z の小さい Si はコンプトンカメラの散乱体と して適しているといえる。



図 2.3: Si の光電吸収とコンプトン散乱の反応断面積

また、コンプトンカメラの角度分解能は、Doppler Broadening(原子核に束縛されている電子が 運動量を持つことにより、電子がコンプトン散乱される際に測定の揺らぎが生じる現象)によって も左右されるが、一般に Doppler Broadning は Z が小さい程影響は少ないため、この点からも Si が有利であると言える。

以上の理由から、SGD ではコンプトンカメラの散乱体として Si センサーを採用している。

2.2.1 半導体センサーのノイズ源

コンプトンカメラの角度分解能は、使用する半導体センサーのエネルギー分解能により左右される。半導体センサーのエネルギー分解能はセンサーのノイズに大きく影響されるため、半導体センサーのノイズを抑えることは、結果的にコンプトンカメラの性能を向上させることになる。半導体センサーのノイズに影響する主なパラメータとしては、(1)暗電流、(2)センサー容量がある。

(1) 暗電流

暗電流とは、半導体内部で熱励起により電子-正孔対が生成され、それが微弱な電流として検出 される現象の事である。暗電流は回路系ノイズの主な原因となり、閾値やエネルギー分解能に大 きく影響する [5]。暗電流は温度に大きく依存するため、温度を下げることで低減することができる。以下に暗電流 (I) と温度 (T) の関係を示す。

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

$$\tag{2.3}$$

ここで、*E_a*は半導体のエネルギーギャップ、*k_B*はボルツマン定数である。

この他に、暗電流は半導体結晶内の不純物濃度や半導体界面の結晶の乱れなどにも依存する。 特に、結晶内にドナーやアクセプタ以外の不純物が含まれていた場合や、劣化や汚染が起きた場 合、バンドギャップ内に意図しない新たなエネルギー準位が形成され、電子や正孔の伝導体への遷 移を誘発し、暗電流の増加につながる。半導体センサーとして加工される結晶は非常に高純度な ものであるが、半導体の加工においてこれら意図しない不純物や欠陥を完全になくすことは非常 に難しい。このように結晶の質によって素子の表面で発生する暗電流を、表面暗電流と呼ぶ。表 面暗電流とバルク内での熱励起による暗電流のどちらが支配的になるかは、半導体製造過程に大 きく依存する。

また、一般的な p-n 接合を用いたセンサーでは、逆バイアス電圧がある値を越えると、暗電流 が急激に増加する降伏現象 (ブレークダウン) が起きる。ある大きな電位差のもとで電場がかかる と、価電子帯にいた電子の多くが伝導体に励起され、その電場のもとで加速された電子がさらに 空乏層内の他の電子と衝突することで、その原子の電子が励起される [4]。これが繰り返し起こる ことをなだれ過程 (あるいは衝突電離過程 [1]) と呼び、これにより暗電流の降伏現象が起きる。

(2) センサー容量

p-n 接合を用いた半導体センサーでは、p-n 接合間に存在する空乏層により、平行平版コンデン サの式で近似される静電容量を持つことが知られており、この p-n 接合間に生じるの容量を Body 容量 (Body Capacitance) と呼ぶ。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \tag{2.4}$$

ここで、C は Body 容量、 ϵ は半導体の誘電率、S はセンサーの面積、d は空乏層の厚さである。センサーに逆バイアスをかけることで空乏層は広がり、センサー容量は小さくなるため、容量性ノイズを低減するためには高圧で動作させることが望ましい。一方、複数のチャンネルを持つセンサーの場合 (図 2.4)、上記の Body 容量に加えて ch 間容量と呼ばれるものが存在し、図 2.4 の様なセンサーの場合、implant の幅や間隔に依存する。また、 $\S2.2.2$ で述べる Si-Pad の様なセンサーの場合、ch 間容量は各 pixel から出ている信号読み出し線 (引出し線) にも影響される。図 2.5 に引出し線による容量の簡単な図を示す。これは、引出し線が pixel 上を通るために、pixel と引出し線との間に容量が発生するためであると考えられる。







図 2.5: 引出し線により発生する容量

これらの暗電流と容量は、センサーから CSA に至るまでの初段電子回路系の性能とカップルして、センサーの性能に影響を与える。これに加え、半導体に固有に存在し、不純物のランダム運動や構造に依存する 1/f ノイズも存在する。

簡単のため、図2.6のような等価雑音回路を考える。



図 2.6: 半導体センサーの雑音等価回路

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 ($\equiv A/g$ 、 $A: 0.5 \sim 0.7$) I_n :暗電流、 $V_{1/f}$:1/f ノイズである [5] [7]。

全雑音電圧のパワースペクトルは、

$$\frac{V_{noise}^2}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_BTR_s + \frac{V_{1/f}}{d} [V^2/Hz]$$
(2.5)

となる。この式は、第一項と第三項がそれぞれ R_p 、 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 の和であることを表している。エネルギーは電荷量で測定する ため、等価雑音電荷 $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$ (Equivalent Noise Charge:ENC)で表すと、1/f ノイズは周波数に反 比例するので、その係数を $C_{1/f}$ とする。時定数 τ_s の波形整形回路において、ある波形整形を行ったときの雑音の大きさを、等価雑音電荷 (Equivalent Noise Charge) で表すと、

$$\frac{\Delta E_{RMS}^2}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_BTR_sC_{in}^2 + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f}[C^2/Hz]$$
(2.6)

となる。ここで $V_{1/f}$ は周波数に反比例するので、1/f noise の大きさを表す比例係数 $C_{1/f}$ によって置き換えている。この式を見ればわかるように、初段回路の雑音強度は周波数依存性を持つのでフィルターをかけて波形整形を行うことによって S/N 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) とすると、例えばガウシアン整形を行った場合、

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = \left(\frac{4k_BT}{R_p} + 2qI_n\right) \cdot A_1\tau + 4k_BTR_sC_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau} + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f} \cdot A_3[C^2]$$
(2.7)

となる。ここで、 $A_1A_2A_3$ は波形整形回路のフィルター特性で決まる係数であり、理想的なガウシアン (CR-RCⁿ, $n \to \infty$)に対しては、 $(A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0.5)$ である (今回ショットノイズを計算する際は CR-RC 回路を考え、 $A_1 = 0.97$ としている)。 $\overline{\Delta E_{RMS}^2}$ を最小にする τ を求めると、その最適値 τ_{opt} は、

$$\tau_{opt} = \sqrt{\frac{4k_B T R_s C_{in}^2 A_2}{(4k_B T R_p^{-1} + 2q I_n) \cdot A_1}}$$
(2.8)

となる。[5] [9]

式 (2.7) を等価雑音電荷ではなくシリコンセンサーのエネルギー分解能に換算する場合は、式 (2.7) に $(2.355\epsilon/10^3/q)^2$ をかけることで FWHM(Si-keV²) となる。ただし、q は電気素量 ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ [J/eV])、 ϵ は Si における電子正孔対生成エネルギー ($\epsilon = 3.64$ [eV]) である。

Si-Pad センサー (Si-Pad) は図 2.7 の様に、n型 Si ウエハーに pixel 状の p⁺型 implant を敷き 詰め、さらに対面には n⁺型平板を設置した構造をしており、各 Pside 側 pixel が Nside 側とダイ オードの様な機能を構成する。p-n 間にはキャリアがほとんど存在しない空乏層が形成されてお り、ここに光子が入射すると、原子中の価電子帯に束縛されていた電子が光電吸収やコンプトン散 乱、電子陽電子対生成などの過程を踏まえて伝導帯へと励起され、空乏層内に入射光子のエネル ギーに比例した数の電子・ホール対が発生する [4]。これらの電子・ホール対は空乏層内の電場に より電子は Nside 側に、ホールは Pside 側にそれぞれ引きよせられ、Pside の各 pixel に DC 結合 された Al 電極から、引出し線を通じて外部で電気信号として読み出される。これにより、Si-Pad は入射光子が素子上に落としたエネルギーと、二次元的な検出位置情報を与える。



図 2.7: Si-Pad センサーの概観

Pside 側 pixel 周辺の電場を一様にそろえるため、Pside 側には全 pixel を囲むようにガードリン グが設置されている。さらに Al 電極以外は SiO₂ の絶縁層で覆われており、直流電流が直に流れ ないようにしている。

素子に逆電圧を印加することで、Nbulk の空乏層は次第に広がっていく。空乏化電圧 V は、e を シリコンの誘電率 (= 1.06×10^{-12} F/cm)、N_D を不純物 (ドナー)の密度、d を空乏層の厚さ、V₀ を接触電圧 (~1V、[4][6] より) として、以下のように表せる。

$$V \simeq \frac{eN_D d^2}{2\epsilon} - V_0 \tag{2.9}$$

不純物 (ドナー) 密度と比抵抗の関係は、n型 Si のキャリアの移動度を μ_n (典型値 1500 cm^2/V_s 、た だしドナー密度が $N_D \sim 10^{15} cm^{-3}$ 以下のとき [1]) として、以下のように表される。

$$\rho = \frac{1}{eN_D\mu_n} \tag{2.10}$$

上式より比抵抗を $5k\Omega cm$ 程度 ([4] [6] より) とすると、 $N_D \simeq 8.3 \times 10^{11} cm^{-3}$ となることから、例 えば厚さ $600\mu m$ の素子を完全空乏化させるには、およそ 225Vの逆電圧が必要になる。

コンプトンカメラの散乱体には、50keV 以上の帯域でコンプトン散乱確率が光電吸収確率を上回る点、Doppler Broadening の影響が小さい点から Si センサーが適していることは、§2.2 で述べた。更に Si-Pad センサーの場合、同じく入射光子の二次元的な位置情報を与える DSSD(両面シリコンストリップ検出器)に比べて、構造がより簡単であるために機器に組み込みやすい点、通常の半導体製造プロセスで製造可能なためコストが低く、Si センサーを多く使用するコンプトンカメラに適している点から有利である。位置分解能は DSSD の方が優れているが (1 ストリップあたり

の幅 ~ 数 $10\mu m$ で製造可能)、SGD の要求する位置分解能 (§2.3 を参照) は Pad 型センサーでも十分達成できることから、SGD では Si-Pad センサーを採用している。

2.3 Si-Pad に要求される性能

ASTRO-H ミッションにおいては、SGD が関連する科学目標として以下のものが掲げられている。

- 数個の若い超新星残骸を「すざく」より100倍良い感度で硬X線分光観測し、電子のエネル ギー分布を導出する
- 2-10keV での強度がかに星雲の1/1000 であり、べき1.7の放射を持つ超巨大ブラックホール を600keV 以下の帯域で10 個以上観測する

これを達成するため、ASTRO-HからSGDへの基本要求は以下のようになっている[12][14]。

- 観測帯域: 10-600keV
- 明るい超巨大ブラックホール天体を十分観測可能な感度(かに星雲の約1/1000の強度で、べき 1.7 の放射を持つ天体を観測可能)を持つ
- 放射化バックグラウンドの輝線を同定するために十分なエネルギー分解能を持つ

このことから、SGD に要求される性能は表 2.1 のようになっている。

検出効率	10%以上 @100keV
エネルギー帯域	$10-600 \mathrm{keV}$
エネルギー分解能	$< 2 \mathrm{keV}$ @40 keV
有効面積	$20 \text{ cm}^2 @ 100 \text{keV}$
視野	\pm 0.5 deg @ $< 150 \rm keV$
	$\pm 10 \deg @ > 150 \mathrm{keV}$

表 2.1: SGD のへ要求性能 [10]

図 2.8: SGD の1ユニットの構成

BGO アクティブシールドの視野の限度や、CdTe センサーとの関係から Si センサーの面積は制限され、これによりコンプトンカメラ1台の検出器面積は $\sim 5 \times 5 \text{ cm}^2$ となる。SGD は図 2.8 のように、3台の狭視野コンプトンカメラで1組のユニットとなっており、これを衛星サイドパネルに合計 2 ユニット設置することで検出器面積は $\sim 150 \text{ cm}^2$ となる。SGD の検出効率はセンサーの合計厚さに依存し、有効面積はこの検出効率と検出器面積の積であることから、この検出器面積で SGD への要求を達成するために必要な Si-Pad センサーの合計厚さは 19mm となる。Si センサーの厚さは 0.6mm が製造実績の上限であるが、Si センサー 1 枚の厚さが厚いほどその分枚数は少なくてよいため、読み出し回路の数を抑えることができる。このため SGD で使用する Si-Pad は 1 枚の厚さを 0.6mm とし、これを 32 層並べることで Si センサー部の全体厚さを約 19.2mm としている。

SGD をコンプトンモード (2 ヒットイベントに対してコンプトン再構成を行い、光子の到来方 向の予測からバックグランドを除去し、高感度観測を行うモード)で用いる場合、§2.2.1 で述べた ようにコンプトンカメラの角度分解能はセンサーの位置分解能とエネルギー分解能に左右される。 コンプトン再構成の角度分解能は 511keV のエネルギーの光子に対して 4 deg が要求されており、 これを達成するためには Si-Pad のエネルギー分解能は 8keV 以下、位置分解能は 3mm 程度が必 要となる。さらに、放射化によるバックグラウンドの輝線を同定しこれを除去するために、エネ ルギー分解能 2keV が要求される。

有効面積> 5×5 cm²1Pixel 面積< 3.2×3.2 mm²</td>有感領域厚さの合計> 19 mm1Pixel 容量< 10 pF</td>1Pixel 暗電流<100 pA @ -10</td>動作温度-30 ~ -10

以上を総合し、Si-Pad への要求性能は表 2.3の様になっている。

表 2.2: Si-Pad のへ要求性能 [12]



図 2.9: SGD 有効面積のエネルギー依 存性 [10]

2.4 開発の経緯

Si-Pad 型センサーは元々粒子加速実験で実績のあったものであるが、SGD 搭載用 Si-Pad の開 発に先駆けて、宇宙 X 線センサーとして初めて試作されたのが図 2.10 である。これは、SGD 搭 載 Si-Pad のデザイン決定のために試作されたセンサーであり、このセンサーの暗電流、センサー 容量、X 線読み出し実験などの結果から、Si-Pad の宇宙 X 線センサーとしての有用性と、デザイ ン決定の指針を得ることができた [13]。





図 2.10: X 線センサーとして初めて試作された Si-Pad

図 2.11: 衛星搭載品とほぼ同等の Si-Pad

この結果を受け、SGD 搭載用 Si-Pad とほぼ同等のモデル (エンジニアリングモデル) として開 発されたのが、図 2.11 のセンサーである。このセンサーは SGD からの要求に応じ、1pixel 面積 を $3.2 \times 3.2 \text{mm}^2$ とし、これを 16×16 pixel とすることで、センサー全体で有効面積 $5.12 \times 5.12 \text{cm}^2$ としている。空乏化領域厚さは 0.6 mm としている。

本研究では、このタイプの Si-Pad の基礎特性を測定し、現状のモデルで SGD の要求性能を満たしているか評価を行う。さらにこのセンサーに ⁶⁰Co のガンマ線を照射し、その後のセンサー性能を測定することで、衛星軌道上での放射線損傷による性能への影響を検証する。

第3章 エンジニアリングモデルSi-Padの基礎特性評価

ここでは SGD 搭載用として初めて試作され、2009 年 6 月に浜松ホトニクス社より納品された Si-Pad(エンジニアリングモデル) について、その基礎特性を測定し、現状のデザインで SGD の要 求する性能を満すか評価する。

表3に、今回用いるSi-Pad の基本的な仕様を記す。 $\S2.4$ でも述べたが、SGD からの位置分解能 の要求から1pixel 面積は $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$ としており、pixel 数は 16×16 の計256pixel が implant さ れ、センサー全体での検出面積は $5.12 \times 5.12 \text{ cm}^2$ となっている。P側 pixel の周囲には、端の pixel の効果を緩和するための GuardRing が設置されている。また、厚さは0.6mm となっている。各 pixel からの信号読み出し線(引出し線)は4隅に集められ、BondingPad を通して外部とワイヤ ボンドするようになっている(図3.1の青い線が引出し線)。エンジニアリングモデルのその他の特 徴としては、P側 pixel 上を覆う SiO₂ 絶縁層の厚さを 1μ m とし、その上を引出し線が通っている 点、各 pixel からの引出し線と外部をワイヤボンディングする為の BondingPad がセンサー四隅の pixel 上にある点が挙げられる。



センサー面積	$5.39 \times 5.39 \text{ cm}^2$
有効面積	$5.12 \times 5.12 \text{ cm}^2$
1Pixel 面積	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$
Pixel 数	16×16
厚さ	$0.6 \mathrm{mm}$
空乏化電圧	$< -250 \ \mathrm{V}$
1Pixel 暗電流	$<\!50 \text{ pA}$ @ -10
読み出し線幅	$8~\mu{ m m}$
読み出し線厚さ	$4.5~\mu{\rm m}$

表 3.1: 衛星搭載用 Si-Pad の仕様 [12]

図 3.1: エンジニアリングモデル Si-Pad の引出し線

Si-Pad の 1pixel の暗電流や容量などの測定を行うため、Si-Pad 用の試験用ボードを用意した。 試験用ボードは、ガラスエポキシ基板の上にパターンが印刷されており、このパターンとSi-Pad 上 の BondingPad を金ワイヤを用いてボンディングするようになっている (図 3.2)。Si-Pad からは試 験用ボードを通して計 11pixel の信号を個別に取り出せるようになっており、そのほかの pixel は全 てパターンを通して 1 箇所から接続できるようになっている。使用する pixel 以外を GND に落と すことにより、全 pixel 電位を一様にすることができる。試験用ボードにはこの他に、GuardRing 用のパターン、N 側と接続して主に逆電圧をかけるために使用する Nsub 用のパターンも設置され ている。試験用ボードは本研究室で設計を行い、ケイ・ティ・システム株式会社に2枚(テスト用、 Si-Pad 貼り付け用) 製作を依頼した。Si-Pad のボードへの接着とボンディングも同社に依頼した。



図 3.2: 試験用ボードの設計図



1		2 2	52	56	0	Z	2-32		1 det	
	. 10	s s	2 3	S			s			
		4 4	4. 46	4		07			lis	1.9
1.1		3 4	4 40	4		17	ST //2/	67 /10	/s	05
11	NX.	2 3	33	37		/at	h lle	15/100		65
2 0	11	5	25 30	33		61	57 58	9/ pr	85	
			15 22			pr 1	36 36	00 90	15	٤S
	- 00	9 12	20	21		22	SE 2E	74 47		
56 1				21						
57 5	54 46	40 36	34 24	20		a	18	39		
58 5	53 49	2/9 /33	25/19	13		×	2 2	3 4	5	
59 5	2/4/	38 3/	1/ 18/	12		36	23	88	11	14
60 5	111	29/24	15 /11	9		64	2 20	2		14
61 9		11/14	4 10	8		46	24 4	4		
42 4		10	5 3	1			52 52	2 S		
		15 5	4 2	0	56	57	58	61	1	Y
		<u>+</u>								
1	2	- 3	4	5		6	7	8		
9	10	11	12	13	3	14	15	16		
17	18	19	20	21		22	23	24		
25	26	27	28	20	2	30	31	32		
33	34	35	36	37	7	38	30	40		
41	42	47	44	4		16	17	40		
41	42	40	44	4:	,	40	4/	40	-	
49	50	51	52	53	>	54	55	56		
57	58	59	60	l 61		62	63	64		

図 3.3: Si-Pad から信号読み出し可能な pixel(赤 色部分)



図 3.4: 実際に製作された試験用ボード 図 3.5: 試験用ボードに接着した Si-Pad

3.1評価項目

本研究では、Si-Pad の基礎特性実験として、 (1) 暗電流測定、(2) センサー容量測定、(3)X 線読み出し、(4)⁶⁰Co ガンマ線照射実験 を行った。なお、暗電流とセンサー容量については §2.2.1 で述べているため、その起源等につい てはここでは述べない。

式 (2.6) にあるように、暗電流は Shot noise に寄与する成分であり、センサーのエネルギー分解能に影響する。また式 (2.3) で表されるように、暗電流は温度に大きく依存するため、SGD の 運用温度で要求性能を達成できるかどうか評価する必要がある。





図 3.6: 1pixel 暗電流測定のセットアップ

図 3.7: 全 pixel 暗電流測定のセットアップ

本研究では P 側全体と N 側間の暗電流のバイアス依存性、1pixel あたりの暗電流のバイアス依存 性、暗電流の温度依存性を測定する。図 3.6 に 1pixel 暗電流測定のセットアップを記す。Si-Pad に設 けられた NsubPad より N 側に逆バイアスをかけ、Si-Pad をボンディングした治具から 1ch(1pixel から取り出したチャンネル)のみ電流計へとつないで暗電流の測定を行う。使用しない Pside の ch はすべて GND へと落としている。P 側全体と N 側間の暗電流を測定する際は、バイアスをかけ ると同時に電流値も計ることのできる測定器 KEITHLEY 237 を使い、N 側に逆バイアスをかけ、 P 側を全て GND として測定を行う (図 3.7)。

3.1.2 センサー容量測定

式 (2.6) にあるように、センサー容量は容量性のノイズとしてエネルギー分解能に影響するため、 Si-Pad の性能を評価する上で欠かせないパラメータとなる。また、容量性ノイズは初段増幅回路 の容量特性に左右されるため、Si-Pad の容量を評価する際はSGD で用いられる集積回路 (ASIC) の特性を考慮する必要がある。

Si-Pad 型のセンサーでは、p-n 接合間に生じる「Body 容量」と、P 側のチャンネル間に生じる「ch 間容量」が存在するため、本研究ではこれらを測定する。Body 容量は式 (2.4) で近似できる ため、今回使用する Si-Pad での P 側全体と N 側との間の Body 容量は完全空乏化した時点で、

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \sim 443[pF] \tag{3.1}$$

となる。

図 3.8 と図 3.9 はそれぞれ Body 容量測定と ch 間容量測定のセットアップ図である。Body 容 量測定は N 側に逆バイアスをかけ、P 側全体と N 側間をそれぞれ容量計 (HEWLETTPACKARD 4284A)の入力に接続し、容量を測定する。ch 間容量測定は N 側に逆バイアスをかけ、容量計へ の入力は P 側 1ch とそれ以外の全ての ch とし、この間の容量を ch 間容量として測定する。



図 3.8: Body 容量測定のセットアップ

図 3.9: ch 間容量測定のセットアップ

本研究で容量計として用いる HEWLETTPACKARD 4284A は、試料に正弦波を出力しその応 答から試料のインピーダンス Z と位相のずれ θ を測定する仕組となっている。一方、半導体セン サーは理想的なコンデンサとは違い、容量成分と併せて抵抗成分を持つため、インピーダンス Z と位相のずれ θ から容量を求めるには、自分でモデルを決めなくてはならない [6]。このモデルを 決定するため、本研究では容量測定と同じセットアップで入力周波数を変えながらインピーダン ス測定を行い、測定モデルと容量成分が支配的な入力周波数を調べる。測定モデルは、一般的な 抵抗 R とコンデンサ C によるインピーダンスの式に従うものとする

$$|Z| = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1/R^2 + \omega^2 C^2}} & (i \pm \eta \in \vec{\tau} \mathcal{V}) \\ \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} & (i \pm \eta \in \vec{\tau} \mathcal{V}) \end{cases}$$
(3.2)

3.1.3 X線読み出し

Si-Pad の X 線検出器としての性能を評価するために、本研究では密封線源の X 線を照射して Si-Pad からの信号を読み出し、X 線のスペクトル取得を行う。具体的には、P 側 1ch から信号を 取り出す「1ch 読み出し」を行い、エネルギー分解能の「ShapingTime 依存性」、「温度依存性」、 「ch 依存性」の結果から、参考文献 [8] で行われた放射線測定用 ASIC(集積回路) である VA64TA2 を用いた「多チャンネル読み出し」の結果と併せて、Si-Pad の性能評価を行う。さらに、X 線源 のラインのカウント数と検出効率の計算から、完全空乏化電圧と空乏領域の厚さ求める。検出効 率を求める方法は、以下の通りである。

入射光子に対する光電吸収の検出効率 (入射光子数 N_0 、検出数 N として N/N_0) は光子の光電 吸収確率から求めることができ、吸収物質の密度 $\rho(g/cm^3)$ と厚さ d(cm) を用いて式 (3.3) のよう になる。なお、反応断面積 $\kappa(cm^3g)$ は NIST ホームページ [2] よりデータを引用して用いる。

$$\frac{N}{N_0} = 1 - e^{-\kappa\rho d} \tag{3.3}$$

この式を用いて、1ch で取得したスペクトルのラインのカウント数から空乏層の厚さを計算することが可能である。まず実験としては、入射光子の立体角が十分小さくなる距離にX線源を設置し、

同じ時間スペクトル取得を行う。スペクトルに現れた ²⁴¹Am の 60keV のラインは、そのラインの 各ビンの値を足し合わせることでカウント数とする。線源強度と線源から pixel までの距離から、 pixel に入射する光子数 N₀ は、線源からセンサーまでの距離を D(mm)、pixel 面積を S(mm²)、線 源強度 L(Bq)、ラインの放出率 P(²⁴¹Am の 60keV で 0.36) として、

$$N = \frac{S}{4\pi D^2} LP[\texttt{I}/sec] \tag{3.4}$$

と近似できるので、スペクトルから求めたカウント数をこの入射光子数で割った値が検出効率と なる。検出効率は物質の厚さdに依存するため、上式を用いてSi-Padの空乏領域の厚さを計算す ることができる。

以下に X線 1ch 読み出し実験のセットアップ図を記す。



図 3.10: X線 1ch スペクトル読み出しのセットアップ

Si-Pad の1ch(1pixel)から読み取られた信号は、前置増幅器 (PreAMP, CLEAR PULSE 社 5102) を通して電圧信号へと変換・増幅される。PreAMP には同時にパルサー (Pulser, CLEAR PULSE 社 9028)から一定のテストパルスを入力する。PreAMP で変換・増幅された信号は整形増幅器 (ShapingAMP, ORTEC 社 571)によってガウシアンに近い形に整形され、MCA(AMPTEC 社 MCA 8000A)を通してスペクトル情報として PC へと取り込まれる。

3.1.4 ガンマ線照射による性能への影響の検証

ASTRO-H を運用する衛星軌道上では、Si-Pad は宇宙線により放射線損傷を起こす。放射線に よる Si センサーの損傷については、以下の二つがある。いずれも半導体のエネルギーギャップ (禁 則帯) 中に新たなエネルギー準位を形成することで、それが暗電流の generation center となるた め暗電流が増加すると考えられる (図 3.11)。

(1) 表面損傷

表面損傷は、主にガンマ線による損傷である。Si センサー表面をおおう酸化膜 (SiO₂) 中の電子 が、ガンマ線により伝導帯まで励起され、酸化膜とSi 表面との境界面で結合することにより、新

たなエネルギー準位が形成され、このエネルギー順位に電子がトラップされることで暗電流が増加する。

(2) バルク損傷

バルクの結晶格子の原子が陽子などとの相互作用により移動し、格子欠陥や格子間原子の状態 を形成することで結晶の乱れが生じる。その結果トラップレベルや再結合中心ができ、暗電流の 増加や信号荷電トラップによるパルス波高の低下が起きる [21]。





図 3.11: 放射線損傷により生じる新たなエネル ギー準位

図 3.12: ⁶⁰Co ガンマ線照射室

この中でも、表面損傷はセンサーのデザインに依存するため、現状のデザインで表面損傷が起きたときの性能への影響を検証する必要がある。そのため本研究では、広島大学大学院工学研究科放射線総合実験棟で⁶⁰Coのガンマ線を照射し、その後の暗電流ならびに暗電流による Shot noise の評価を行う (図 3.12)。

・照射量

軌道上での放射線量は、SAA(South Atlantic Anomaly, 南大西洋異常帯) における荷電粒子 (主に 陽子) による照射量が支配的となるため、本研究では1年あたりの SAA での照射量を 0.5krad とし [21]、安全ファクター 2 をかけて1年あたり 1krad として、積算照射量 1,2(+1),5(+3),10(+5)krad となるように計4回に分けて 10年分の照射を行う。

照射量の計算は以下のようにして行う。まず、⁶⁰Coの半減期は 5.3[year] であるから、1997年4月での強度 370TBq[20] より、実験を行った 2009年3月時点の強度は L~67.6[TBq] である。 Si-Pad への入射光子数 N は式 (3.4) より求まるため、光子がセンサーに落とすエネルギー (E_d)は、 $\kappa \sim 5.9 \times 10^{-2}$ [21] として、検出効率の式 (3.3) より、線源からの距離を D=30cm として、

$$E_d = N(1 - e^{-\kappa\rho d}) \times E = 7.36 \times 10^{14} [eV/sec]$$
(3.5)

となる。E はコンプトン散乱により ⁶⁰Co の 1173keV ガンマ線が落とすエネルギーであり、ここで はクライン・仁科の式より求まるコンプトン散乱の散乱角ごとの確率分布より、散乱角 20° を平均と して、E = 572[keV] で計算を行った。E_d を素子の質量 m で割ると照射量となり、 $E_d/m = 2.01 \times 10^{17} (eV/kg/sec)$ となり、単位を rad に換算すると、 $E_d/m = 2.01 \times 10^{17} \times q \times 100 = 3.216$ [rad/sec] であるから、1krad 照射するためには、30cm の距離で約 5 分間照射すると良いことになる。

・照射用 Si-Pad



図 3.13: ⁶⁰Co 照射に使用した Si-Pad の引出し線

今回使用するの Si-Pad は、上述の暗電流、容量、X 線読み出しに使用する Si-Pad と同じエン ジニアリングモデルの、引き出し線が鏡像になっている別の素子を用いた (図 3.13)。基本的な仕 様は両者とも同じである。今回の試験用ボードは感光基板をエッチングして自作たものを用いた (図 3.14)。設計はフリーソフトウェアのプリント基板エディタ「PCBE」を用いて行った。

Si-Pad の接着はモメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ社のシリコン混合物接着剤 YE5822 を用いて行う。この接着剤は (A) と (B) の 2 種類でセットになっており、 (A):(B)=10:1 の割合で 混合したものをボードに均一に塗り、その上に Si-Pad を接着し約 1 日間室温で乾燥させる。



図 3.14: ガンマ線照射試験用ボードの設計図



図 3.15: ボンディングの様子

ワイヤボンディングは宇宙科学研究所 (ISAS) 高橋研究室のボンディングマシンを使用し、今回 は 1/4 区画である 64pixel と、GuardRing(GR) ならびに Nsub のみボンディングを行う (図 3.15)。 個別に取り出すことができる pixel は計 6pixel であり、ボンディングしていない pixel と隣り合う ものは電場が安定しないことを考慮して選択しない。



図 3.16: ガンマ線照射時の Si-Pad のセットアップ

図 3.16 にガンマ線照射時の Si-Pad のセットアップ図を記す。Si-Pad はふたを開けたアルミボックスに固定し、Nsub に HV を印加し、P 側のボンディングした ch を全て GND に落とすようにする。その上から暗幕をかけテープで固定したものを、さらに高さ調節が可能なステージにのせ、幅の広いテープを用いて固定した。



図 3.17: 照射室内のセットアップ

図 3.17 に照射室内におけるセットアップを記す。線源との距離は 30cm とし、高さは線量が計 算と最も近くなる 15cm の高さに Si-Pad の中央がくるよう調整する。照射中は別室から備え付け のケーブルを使い、KEITHLEY 237 で逆電圧を 200V かけ、空乏化させた状態で照射を行う。ま た照射中はガンマ線のシグナルカレントをモニタリングし、照射中に素子に異常が見られないか 監視を行う。

・照射後の実験

照射後の性能評価の実験として、照射後暗電流の時間変化、暗電流の pixel 依存性、暗電流の温度依存性の測定、暗電流増加による Shot noise の評価を行う。

暗電流時間変化は、ガンマ線照射後に"Annealing"[22]と呼ばれる、暗電流が徐々に降下する現象 を見るために行う。ガンマ線照射後、理学研究科C棟の実験室で、-15 に保ったエスペック社の小 型環境試験機 Su-641内で行う。KEITHLEY 237はHV電源兼読み出し可能な64pixel+GR全体の 暗電流を測定する電流計として使用し、KEITHLEY 487は1pixelの暗電流測定に電流計として使 用した。KEITHLEY237,487は専用のケーブルを用いてPCへと接続され、NationalInstruments 社のLabViewで製作された一定時間ごとに電流値を記録するプログラムを用いて暗電流記録を 行った (図 3.18)。



図 3.18: 暗電流時間変化測定のセットアップ

暗電流の pixel 依存性、暗電流の温度依存性の測定は、Annealing が終了した後に、§3.1.1 で述 べたセットアップで電流計として KEITHLEY 487 を用いて測定した。

3.2 暗電流測定結果

エンジニアリングモデル Si-Pad の P 側全 pixel-N 側間暗電流の、各温度でのバイアス依存性を 図 3.19 に記す。この測定は高圧電源兼電流計として KEITHLEY 237 を使用し、さらに温度を一 定に保つため、Si-Pad をエスペック社製の小型環境試験器 Su-641 の中に入れて測定を行った (図 3.7)。

同素子の P 側 1pixel-N 側間暗電流の、各温度でのバイアス依存性を図 3.20 に記す。この測定 では、Si-pad の全 256pixel のうち、64pixel ずつにわけられた 4 区画の中央付近に位置する No37 の pixel を取り出し、電流計として用いる KEITHLEY 617 に入力している (図 3.6)。さらに、温 度調節にはエスペック社製 Su-641 を用いた。



図 3.19: P 側全 pixel 暗電流



図 3.20: P 側 1pixel 暗電流

温度	256pixel	1pixel
20	$287.3~\mathrm{nA}$	$1145~\mathrm{pA}$
0	34.1 nA	$136.9~\mathrm{pA}$
-20	2.64 nA	11.4 pA

表 3.2: 逆電圧 200V での各温度下の暗電流

表 3.2 を見ると、各温度での 1pixel の暗電流値に全 pixel 数である 256 をかけると、ほぼ 256pixel での測定値に一致することがわかる。

暗電流のバイアス依存性を見ると、どの温度でも 200V から 250V 付近で暗電流はほぼ一定に なっているように見え、素子が完全に空乏化したことが示唆される。温度と暗電流の関係を見る と、全 pixel・1pixel 共に 20 温度が下がるとおよそ 1 桁暗電流が下がる傾向が見られる。式 (2.3) より、各温度での暗電流測定値から-10 での暗電流を計算すると、 $I \sim 41.3[pA]$ (@-10)とな り、SGD からの要求性能 (<50[pA] @-10)を満たす。

暗電流の温度依存性に関するさらなる考察は、ガンマ線照射 (§3.5.2) で述べる。

3.3 センサー容量測定結果

センサー容量は高圧電源として CP-E6665 を、容量計として HP 4284A を用いて測定した。§3.1 で述べたように、まずは測定モデルの決定のため、HP 4284A のインピーダンス測定モードを用 いて Body 容量測定におけるインピーダンスの周波数特性を測定した (図 3.21)。なお ch 間容量に 関しては、参考文献 [6] の DSSD におけるストリップ間容量測定のモデルを参考にした。

図 3.21 の結果では、周波数に反比例する成分が容量成分が見えており、また低電圧・高周波数 側では周波数に依存せず一定な抵抗成分が見えている。この測定結果から、この Si-Pad センサー の Body 容量測定においては、直列モデルが適当であり、完全空乏化すると思われる 200V 以上の 容量を精度よく測定するには、測定周波数 1MHz 以下が適当と見ることができる。よって今回は、 直列モデル、周波数 100kHz で Body 容量測定を行った。



図 3.21: インピーダンス周波数特性

図 3.22: Body 容量測定結果

図 3.22 に Body 容量の測定結果を記す。逆バイアス電圧が 200V 以降は容量値がほぼ一定であることから、逆電圧 200V においてほぼ空乏化したことが示唆される。この時の容量値は 461pF であり、式 (3.1)の理論計算とも ±5% でほぼ一致する値となった。

図 3.23 に ch 間容量の測定結果を記す。この測定は、並列モード、周波数 1MHz で行った。



図 3.23: ch 間容量測定結果

今回は Si-Pad を試験用ボードに貼り付けて測定を行っているため、特に ch 間容量測定時はこのボードの浮遊容量を考慮しなければならない。そこで今回は、ケイ・ティ・システム株式会社にもう一つ Si-Pad を貼り付けないボードを製作してもらい、ある pixel 読み出し用パターンとそれ以外のパターン間の容量を測定し、それらを足し合わせたものを 1ch における浮遊容量として、測定結果から引いた。その結果、ch 間容量は~4.0 pF から 33.3 pF と、ch によりばらついた値になり、Body 容量とあわせると SGD からの要求 (<10pF)を上回るものも数多くあった。







図 3.25: 引出し線容量の近似計算

このばらつきは、ターゲットとする pixel 上を他の pixel からの引出し線が通る際に発生した容量が、ch 間容量に足しあわせられたためであると考えられる (図 3.24)。引き出し線による容量を予想するために、図 3.25 のように、(pixel と引き出し線間の容量)=(平行平板コンデンサ)+(直線導体と平板導体間の容量) とし、さらに引出し線と pixel 間を 1 μ m と近似して計算すると、容量の予想値 C_e は、ターゲットとする pixel から出る引き出し線の長さ L_t[cm] と、ターゲットとする pixel 上を通る引き出し線の合計長さ L_c[cm] の関数として表される。ただし、直線の太さを 0 とすると計算が成り立たないので、ここではごく小さく直線の太さを 10⁻¹⁵ μ m としている。

$$C_e = 3.57(L_t + L_c)[pF/cm]$$
(3.6)



図 3.26: 引出し線長さと容量の相関図

図 3.26 は測定容量と引出し線の長さから予想される直線を重ね合わせたものである。この図か ら、引き出し線の長さと容量が相関していることがわかる。ch 間容量にはこの他に、pixel 同士の 間に生じる pixel 間容量があるが、エンジニアリングモデル Si-Pad においては、pixel と pixel 上 の引出し線の間隔 (SiO₂ 層厚さ) が 1 μ m と、pixel 間隔である 60 μ m より十分小さいため、ch 間容 量全体としては引出し線の寄与が支配的になると考えられる。

さらに図 3.26 を見ると、容量の予想直線を大きく上回る容量をもつ ch がある。これらは、BondingPad が pixel 上にあるものであり、容量が上乗せされてしまったためと考えられる。BondingPad が GuardRing 上にあるテスト用素子を用いて、プローバーを使い BondingPad と GuardRing 間 の容量を測定したところ、BondingPad1 つあたり ~0.5pF の容量が pixel との間にあることがわ かった (図 3.27)。



図 3.27: BondingPad の容量への寄与の概念図

3.4 X線読み出し実験結果

図 3.28 に、No37(図 3.9) の pixel で、温度 20 で取得した ²⁴¹Am のスペクトル例を記す。 PreAMP は CLEAR PULSE 社のモデル 5102、ShapingAMP は ORTEC 社のモデル 571、パル サーは CLEAR PULSE 社の 9028 を使い、ShapingAMP の ShapingTime は 1µsec に設定して測 定を行った。温度調節はエスペック社 Su-641 を使用し、スペクトル測定時は運転を止めて測定を 行った。



図 3.28: 1ch で取得した²⁴¹AmのX線スペクトル

3.4.1 エネルギー分解能の Shaping Time 依存性

図 3.29 に 20 で測定した pixelNo1(図 3.9 参照)のエネルギー分解能の ShapingTime 依存性 を記す。緑線は Shot noise と Johnson noise の二乗和平方根である Parallel noise であり、青線は PreAMP である CP 5102 のスペックシートの容量勾配から求めた容量性ノイズである。紫線の 1/f ノイズは見積もることが難しいため、ここでは Parallel noise と容量性ノイズを足しあわせた ものを測定値にフィットして求めた。水色の線はこれらのノイズを足し合わせたものである。測定 値と整合性がとれていない部分が見られ、これらは回路系のノイズが寄与していると考えられる が、原因は明らかではない。この図を見ると、Shaping Time が長くなるとノイズが増える傾向が 見られることから、20 では暗電流が大きくなるため Shot noise の寄与が大きくなっていること が示唆される。-20 では暗電流は2桁程下がるのでかなりの Shot noise を減らすことができると 考えられるが、今回は都合により低温での実験を行うことができなかった。



図 3.29: 20 におけるエネルギー分解能の Shaping Time 依存性



図 3.30: エネルギー分解能の pixel 毎の分布

図 3.31: 引出し線とエネルギー分解能の関係

図 3.30 は、温度 20 (常温) で測定した pixel 毎のエネルギー分解能の分布である。このときの 線源は ^{241}Am を使用し、60keV のラインからエネルギー分解能を求めた。これらのエネルギー分 解能を §3.3 で求めた $L_t + L_c$ との関係に表すと、図 3.31 のようになる。図中の黒い点線は、後述 する図 3.33 のエネルギー分解能と引出し線の相関の線をそのまま用いている。この図から、容量 と同様に引出し線とエネルギー分解能の間にも相関があるように見える。このことについて考察 するため、以下の二つの測定データを用いた。



図 3.32: エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (朴 測定)[8]



図 3.33: 引出し線とエネルギー分解能の相関 [8]



図 3.34: エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (田 中測定)[23]



図 3.35: 引出し線とエネルギー分解能の相関 [23]

図 3.32 と図 3.33 は広島大学の朴 [8] が行った、本研究と同型の Si-Pad を集積回路 VA64TA2 を 用いて多チャンネル読み出しを行った結果である。このとき読み出しを行ったのは全体の 1/4 区 画である計 64pixel であり、線源は ²⁴¹Am を用いた。また、この実験は温度は-20 で行った。図 3.32 はエネルギー分解能の pixel 毎の分布であり、図 3.33 は引出し線の長さとエネルギー分解能の 関係を表した図である。青矢印は BondingPad による容量性ノイズが影響しているため、エネル ギー分解能が低下したと思われる pixel を示している。同様の傾向は、Stanford 大学の田中氏によ る SGD 用の読み出し回路 (FEC) を用いた実験 [23] でも確認された (図 3.34 図 3.35、温度-20)。

これらの結果から、引出し線による容量とBondingPadによる容量が容量性ノイズを無視できない程増大させることで、エネルギー分解能を低下させることがわかった。SGD用読み出し回路を用いた実験から、多くのpixelでSGDからの要求であるエネルギー分解能2keVを上回るエネルギー分解能値が得られたことからも、これらの容量を低減する工夫をする必要があることがわかった。

3.4.3 X線カウント数と空乏層の厚み

図 3.36 にエンジニアリングモデル Si-Pad における ²⁴¹Am の 60keV のカウント数の HV 依存 性を記す。これらは線源と pixel の距離は 2cm とし、強度 367.1kBq の ²⁴¹Am 線源に対し、スペ クトル取得を 10 分間行ったものである。このグラフから、HV を上げていくと空乏領域が広がっ ていく様子が見え、300V 付近で完全空乏化したことが示唆される。しかし、Body 容量測定結果 (§3.3) では 200V での容量値が 461pF となっており、これから理論式 (3.1) を用いて厚さを逆算す ると ~ 0.58mm となり、容量の測定結果からはほぼ空乏化しているように見られる。



図 3.36: ²⁴¹Am の 60keV カウント数の HV 依存性 (EM)

Body 容量測定とX 線読み出しでの空乏化電圧の違いについてをさらに調べるため、Body 容量 測定ではほぼ空乏化していると見ることのできた HV= 200[V] での ²⁴¹Am の X 線カウント数か ら、空乏層の厚さを求めた。線源を置く位置による不定性を小さくするため、線源と pixel の距離 は 11cm とし、強度 367.1kBq と 475.9kBq の ²⁴¹Am 線源を重ねて置いたものに対し、スペクトル 取得を 60 分間行ったものである (図 3.37)。静電遮蔽のために、アルミボックスのふたを金属製ス ペーサーで高くし、その周りをアルミホイルで巻いて遮蔽を行った (図 3.38)。



図 3.37: カウント数測定セットアップ図



図 3.38: カウント数測定セットアップ写真

$\operatorname{Bias}(V)$	X 線カウント数からの計算値 (mm)	Body 容量からの計算値 (mm)
200	$0.40 {\pm} 0.02$	0.58
300	$0.57{\pm}0.01$	0.59

表 3.3: 逆電圧 200V、300V でのエンジニアリングモデル Si-Pad の空乏層厚みの計算値

3.4.3 を見ると、200V において容量測定結果とX 線カウント数測定結果が合わない。このよう な結果になったのは、Nbulk に空乏領域と非空乏領域の間にどちらでもない「遷移領域」が存在 し、容量測定で用いる電気信号とX 線では遷移領域での応答が違うためと考えられるが、明確な 原因は分かっておらず、今後さらなる検証が必要である。

3.5 ガンマ線照射後の性能への影響の検証

今回の実験では、⁶⁰Coのガンマ線を2010年8月4日に1krad、8月19日に1krad(積算2krad)、 8月27日に3krad(積算5krad)、9月14日に5krad(積算10krad)それぞれ照射した後に、各種 測定を行った。測定に用いるSi-Padのpixelは図3.39の色付けされたpixelであり、それぞれ No28,No46,No62とした。また、ガンマ線照射前に暗電流測定、センサー容量測定を行い、以前の 測定に用いた素子とほぼ同じ性能であることを確認した。



図 3.39: 照射実験で選んだ測定 pixel

3.5.1 暗電流の照射量依存性

図 3.40 は、各線量照射後の-15 における暗電流の時間変化である。照射量毎に暗電流が増加 する傾向が見えると共に、10krad では照射後2日ほど暗電流が徐々に下がる Annealing と思われ る現象が見られた。なお、5krad のデータが途切れている部分は、研究棟が停電のため一時的に測 定装置の電源を落とした時間帯である。また0日付近の電流値の急激な降下は、Si-Pad を常温か ら-15 まで冷却する過程での暗電流が下がる様子であり、この間の Annealing の測定は不可能で あった。



図 3.40: 照射量毎の pixelNo46 の暗電流時間変化

図 3.41 と 3.42 はそれぞれ、20 と-15 での 1pixel 暗電流の照射量毎の変化である。照射量毎の暗電流の増加は、過去の実験 [19] によると単純な比例関係ではなく、照射量が多くなるにつれ 徐々に増加の割合は減少する傾向がある。今回は照射量が少ないためにその傾向は顕著には見られなかったが、20 の各 pixel 暗電流から若干その傾向が見られた。



図 3.41: 20 下での 1pixel 暗電流の照射量依存性



図 3.42: -15 下での 1pixel 暗電流の照射量依 存性

3.5.2 暗電流の温度依存性

図 3.43 は No46 の pixel の暗電流温度依存性を示したグラフであり、積算照射量毎に色分けしている。



Total Dose(krad)	$E_t - E_i(eV)$
1	$0.0825{\pm}0.0003$
2	$0.0948 {\pm} 0.00022$
5	$0.0702 {\pm} 0.00254$
10	$0.0819 {\pm} 0.00216$

表 3.4: 照射量毎の暗電流温度依存性 へのフィッティング結果

図 3.43: 照射量毎の pixelNo46 暗電流 の温度依存性

暗電流の温度依存性のグラフに以下の式をフィッティングすることで、本来のフェルミ準位と 損傷による新たなエネルギー順位との差 $E_t - E_i$ を求めることができる [19]。 ここでは E_g は一 般的な Si のエネルギーギャップである 1.12eV とする。式 (3.8)を本実験結果に適用すると、表 3.4 のようになった。照射量が多くなると $E_t - E_i$ が小さくなる傾向があると予想されたが、この結 果からは照射量との有意な相関は見られなかった。さらに厳密にこのフィッティングを行うには、 パラメータの調整や暗電流の誤差などを正確に定義する必要があると思われる。

$$J_{gen} = J_0 T^2 \frac{e^{-E_g/(2kT)}}{e^{E_t - E_i}/kT + re^{-(E_t - E_i)/kT}}$$
(3.7)

3.5.3 ショットのイズへの影響

図 3.44 は各照射量毎の 1pixel 暗電流値から Shot noise を計算し、温度毎にプロットしたもの である。Shaping Time は SGD 用 ASIC で用いる予定の $4(\mu sec)$ とした。SGD を運用する予定の 温度である-15 においては、Si-Pad のエネルギー分解能は $1\sim 2$ keV 程度となることから、Shot noise の増加の影響は 10krad 照射後でも十分小さいと考えることができる。これは、SGD 運用温 度の上限である-10 でも同様である。これらのことから、SGD を軌道上で 10 年間運用したとし ても、放射線による表面損傷の影響は十分小さいと考えられる。



図 3.44: 照射量毎の Shot noise 計算値

3.6 エンジニアリングモデルの基礎特性実験のまとめ

本章ではエンジニアリングモデル Si-Pad の基礎特性実験として、暗電流測定、センサー容量測 定、X 線読み出し、ガンマ線照射実験を行い、以下のような結果が得られた。

- ・暗電流は-20 において、1pixel あたり逆電圧 200V で ~ 1.1nA であり、-10 での暗電流値 は計算から ~ 41.3pA となるため、SGD からの要求を満たす性能であった。また、通常の半 導体素子に見られるような温度依存性も確認した。
- Body 容量は、インピーダンスの周波数依存性からモデルと周波数を定めて測定を行うと、
 逆電圧 200V で 461pF となり、センサーのデザインから計算される理論値とほぼ一致する値が得られた。
- ch間容量は pixel によりばらつきがあり、大きいものでは Body 容量と ch 間容量を併せて ~ 35pF と、測定した多くの pixel で SGD からの要求である 10pF を達成できていないこと がわかった。これは、各 pixel から出ている引き出し線が他の pixel 上を通る際に容量が発生 すること、さらにセンサーの端の pixel 上にある BondingPad が容量を発生することが原因 であるためと考えられる。
- X線読み出し実験の結果、pixel毎のエネルギー分解能の分布から、引出し線が集中するpixelや、pixel上にBondingPadがあるものはエネルギー分解能が悪くなる傾向が見られた。SGD用読み出し回路を用いた実験では、多くのpixelでSGDからの要求であるエネルギー分解能2keVを上回る結果となっていることから、衛星搭載用フライトモデルの開発の指針として、引出し線由来の容量を低減すること、さらにpixel上にあるBondingPadをpixel外に移す必要がある事がわかった。
- X 線カウント数とSiのX線透過率から空乏層の厚みを計算した結果、逆電圧 300Vでは 0.57±0.01mmとなり、検出器のデザインならびにBody容量測定結果とほぼ一致する値 となった。一方、逆電圧200Vでは0.40±0.02mmとなり、Body容量からの計算値である 0.58mmと一致しない結果となった。この問題については、Nbulkの遷移領域についてさら なる検証が必要である。
- Si-Pad にガンマ線を照射して表面損傷を起こし、その後のセンサー性能を測定した結果、暗電流の時間変化から 10krad において過去の実験で見られたような Annealing が約2日間にわたって見られた。また各照射後の暗電流値から Shot noise の計算を行った結果、軌道上で10年間かけて浴びる量である 10krad 照射後においても、SGDの運用温度では暗電流の増加による Shot noise は十分小さいことが検証された。

第4章 フライトモデルSi-Padの基礎特性

エンジニアリングモデルの基礎特性評価から、pixel上を通る引き出し線とpixel上のBondingPad が無視できない容量を生むことが明らかとなり、これらの点を改善する必要があることがわかった。 このことから、Si-Pad センサーの衛星搭載用モデルとして、フライトモデルが開発された。こ のモデルにおける改良点は、引出し線-Pixel 間の絶縁層の厚さを 1.5 倍にし、さらに BondingPad を Pixel 外の GuardRing 上に設置する (図 4.1) ことで、エンジニアリングモデルで最大 35pF 程 度あった 1pixel あたりの容量を最大 20pF 程度にまで低減でき、エネルギー分解能を向上できる ことが期待される。有効面積や厚さなどのその他のジオメトリは変更していない。



図 4.1: フライトモデルへの改良点

フライトモデル開発のスケジュールとしては、2010年10月にテスト用として10枚のフライト モデルSi-Padが浜松ホトニクス社より納品され、そのテスト結果により衛星搭載に問題ないとさ れれば、2011年2月にフライトモデル全500枚が発注される予定である。本研究ではこのフライ トモデルの最終試験として、2010年10月に納品された試作品の基礎特性実験(暗電流、センサー 容量、X線読み出し実験、ガンマ線照射実験)を行う。

これらの実験を行うための試験用ボードは感光基板とフリーソフトウェアのプリント基板エディ タ「PCBE」を用いて製作した。Si-Padのボードへの接着とボンディングは宇宙科学研究所(ISAS) 高橋研究室のボンディングマシンを使用して行った。

39





図 4.3: 試験用ボードに貼り付けられた Si-Pad

図 4.2: フライトモデル Si-Pad 試験用ボード



図 4.4: Si-Pad から読み出し可能な pixel(赤印部分)

図 4.2 にフライトモデルの試験用ボードの図を記す。このボードは 2mm 厚のガラスエポキシ 板上に Si-Pad を乗せ、Si-Pad を囲むようにパターン付基板を配置したものである。図 4.2 の赤 い部分が銅パターンが残る部分で、この部分に Si-Pad の BondingPad からワイヤボンディングを 行う。個別に取り出す pixel は図 4.4 に示す。Si-Pad の 1/4 区画ずつをそれぞれ A,B,C,D と分け、 読み出し可能な pixel の中でも異なる区画で番号が同じ pixel は、例えば C 区画の no33 の pixel は"no33C"として区別する。この他に、Nsub 用と残った 1/4 区画の pixel を取り出すための銅付 きガラスエポキシ板を設置する (図 4.2、図 4.3 の Nsub 銅板、GND 銅板部分)。接着剤はモメン ティブ・パフォーマンス・マテリアルズ社の YE5822 を使用し、§3.1.4 の時と同様の方法で接着し た。また試験用ボードの製作にあたり、Si-Pad を接着前に各 ch の浮遊容量を測定した。また、N 側接着面に銅板を絶縁テープで固定し、銅板に電圧 500V を印加して、銅板と各 ch のパッドとの 間のリーク電流を測定することで、この試験用ボードでは印加電圧 500V までは大きなリーク電流 が生じないことも確認した。

4.1 評価項目

フライトモデル Si-Pad の基礎特性実験としては、エンジニアリングモデルと同様に、 (1) 暗電流測定、(2) センサー容量測定、(3)X 線読み出し、(4)⁶⁰Co ガンマ線照射実験 を行う。

4.1.1 暗電流測定

セットアップはエンジニアリングモデル測定時と同様にして実験を行う。今回は電圧印加と P 側全 pixel の暗電流測定用に KEITHLEY 237 を用い、1pixel 暗電流測定用に KEITHLEY 487 を 使用する。また恒温槽として小型環境試験器エスペック社 Su-641 を使用する。

今回は P 側全 pixel の暗電流と 1pixel(測定可能な全 pixel)の暗電流のバイアス依存性、暗電流の温度依存性を測定する。動作電圧の上限を探るため、電圧を 500V 近くまで印加する高電圧試験 も行う。試験の際は P 側全 pixel の暗電流を測定し、電流値が急激に上昇する電圧をブレークダウン電圧とする。

4.1.2 センサー容量測定

エンジニアリングモデル測定と同様に、Body 容量と ch 間容量を測定する。容量計として HEWLETT PACKARD 社の 4284A を、電圧印加のために CLEAR PULSE 社の E6665 を使用する。

Body 容量の測定モデルと周波数を決定するため、Body 容量のセットアップで HP 4284A のインピーダンス測定モードを用いて、Body 容量測定におけるインピーダンスの周波数測定を行う。 ch 間容量に関してはエンジニアリングモデルと同様に、参考文献 [6] の DSSD におけるストリップ間容量測定のモデルを参考にする。

4.1.3 X線スペクトル測定

P 側 1ch から密封線源の X 線スペクトル取得を行い、エネルギー分解能の「ShapingTime 依存性」、「温度依存性」、「ch 依存性」を測定する。ShapingTime 依存性については Si-Pad の 1/4 区画の中央付近にある pixelNo33D(容量 ~ 13.37[pF])、Si-Pad の端にあり自身の上を引出し線が 通っていないため容量が比較的小さい pixelNo00(容量 ~ 8.71[pF])、引出し線が自身の上に集中す るため容量が比較的大きい pixelNo28(容量 ~ 21.38[pF])の計 3 箇所について測定を行う。また、 pixelNo33D の ShapingTime 依存性を温度 20,-10,-15,-20 で測定し、各温度のエネルギー分解能 を比較する。さらに、参考文献 [25],[24] で行われた放射線測定用 ASIC(集積回路)を用いた多チャ ンネル読み出し実験と併せて、Si-Pad の性能評価を行う。

入射光子に対する光電吸収確率と、取得したスペクトルのX線源のラインカウント数から、空 乏層厚みを求める。方法はエンジニアリングモデルと同様の方法を用いる (§3.1.3)。

今回の測定では PreAMP として CLEAR PULSE 5102 を、Pulser は CLEAR PULSE 9002 を、 ShapingAMP は ORTEC 571 を使用し、温度調節のため恒温槽として小型環境試験器エスペック 社 Su-641 を使用した。なお、恒温槽運転による振動を考慮し、スペクトル取得中は恒温槽は運転 を行わない。

4.1.4 ガンマ線照射による性能への影響の検証

エンジニアリングモデルへのガンマ線照射実験の結果 (§3.5) から、Si-Pad を衛星軌道上で 10 年間運用したとしても、表面損傷による Shot noise の増加は十分小さいことが確認された。その ためジオメトリをほとんど変更していないフライトモデルにおいても同様の結果が予想されるが、 今回のセンサーは表面の SiO₂ 膜を 1.5 倍の厚さにするなど若干のデザイン変更があったため、こ れらの変更による Shot noise への影響が無視できる程小さいかを、同様の実験を行い検証する必 要がある。

ガンマ線の照射は広島大学大学院工学研究科放射線総合実験棟で⁶⁰Co線源を用いて行う。照 射量はエンジニアリングモデルへの照射時と同様に、1年分の照射量を0.5kradとし、安全ファ クター2をかけて計算する。今回は積算照射量1,2(+1),5(+3),10(+5)kradとなるように3回に分 けて、ASTRO-H衛星の寿命の2倍程度である10年分のガンマ線照射を行う。照射時のセット アップも同様に、Si-Padの中心が照射量が最も計算値と近くなる15cmの高さになるように台を 用いて調整し(図4.6)、線源からの距離は30cmとする。逆電圧はSi-Padが完全空乏化するに十分 な電圧である250V(Body容量、X線カウント数から)を、別室から備え付けのケーブルを用いて KEITHLEY 237から印加する。また、照射中は別室でシグナルカレントをモニタリングし、セン サーに異常がないかを監視する(図4.5)。





図 4.5: フライトモデル Si-Pad ガンマ線照射時の セットアップ写真

図 4.6: Si-Pad の高さを 15cm に調節した写真

照射後の測定は、照射後暗電流の時間変化、暗電流の pixel 依存性、暗電流の温度依存性の測定 ならびに暗電流増加による Shot noise の評価を行う。

照射後暗電流の時間変化はエンジニアリングモデルの時と同様に、ガンマ線照射後、理学研究 科 C 棟の実験室で、-15 に保ったエスペック社の小型環境試験機 Su-641 内で行う。KEITHLEY 237 は HV 電源兼 P 側全体の暗電流を測定する電流計として使用し、KEITHLEY 487 は 1pixel の 暗電流測定に電流計として使用する。KEITHLEY237,487 は専用のケーブルを用いて PC へと接 続され、NI 社の LabView で製作されたプログラムを用いて暗電流を記録し、Annealing の測定を 行う。

暗電流の pixel 依存性、暗電流の温度依存性の測定は、Annealing が終了した後に、§3.1.1 で述 べたセットアップで、電流計として KEITHLEY 487 を用いて測定する。また今回は Shot noise の評価として、pixelNo33D,No00 を用いて照射後の ShapingTime 依存性を調べる。 図 4.7 に温度 20 における P 側全 pixel の暗電流を、図 4.8 に 1pixel あたりの暗電流を記す。 全 pixel 暗電流を pixel 数でわると、1pixel 暗電流は 213.3[nA]/256 = 0.83[nA/pixel] と予想され るが、測定値は各 pixel でばらつきが見られた $(0.46 \sim 0.91[nA])$ 。この原因としては、素子内の比 抵抗のばらつきなどが考えられるが、現時点で詳細は明らかではない。



図 4.7: 温度 20 における P 側全 pixel 暗電流

図 4.8: 温度 20 における 1 pixel あたりの暗電流

図 4.9 に P 側全 pixel と、20 での暗電流が比較的大きかった pixelNo00 の HV=250(V) での暗電流の温度依存性を記す。これを見ると、-10 での暗電流は全 pixel で ~ 6.13[nA]/256 = 23.9[pA/pixel]となり、比較的暗電流の大きかった pixelNo00 でも ~ 25.6[pA]となることから、SGD からの要求 (<50[pA]@-10)を十分満たすことがわかった。



図 4.9: P 側全 pixel と pixelNo00 の暗電流温度依存性

図 4.10 に、温度 20 と-15 での P 側全 pixel 暗電流の HV 依存性を記す。20 においては、 HV=470[V] 付近で暗電流の急激な上昇が見られ、印加電圧をそのままにしておくと電流値は上が り続ける様子をみせたため、この電圧値でブレークダウンが起きたと考えられる。一方、-15 度で は HV=480[V] 付近で暗電流の上昇が見られたものの、こちらは電圧を上げた瞬間から徐々に電流 値が下がる現象が見られた。通常は HV を上げてから 1 分経過した時点の暗電流をプロットして いるが、480V 以上の点は HV を上げてから 5 分経過した時点の暗電流である。この現象について は、§4.5.3 でさらに述べる。 ここでは、Si-Padを動作させる際の印加逆電圧は最大でも 300V 程度であることから、通常の 運用においては問題ないとする。



図 4.10: 20 と-15 における暗電流 HV 依存性

4.3 センサー容量測定結果

図 4.11 に Body 容量測定におけるインピーダンスの周波数測定結果を記す。この測定結果を見 ると、400kHz 付近から、センサーが空乏化すると思われる 200V 以上の電圧でも周波数に依存し ない抵抗成分が見え始めていることがわかる。§3.3 で行った測定よりも抵抗成分が大きく見える のは、Nbulk の比抵抗が前回の素子よりも大きくなったことが考えられ、これは Si-Pad を製造し た浜松ホトニクス社からのコメントと合致する。素子の比抵抗が大きいということは Si の純度が 高いことを意味するため、暗電流が低下するなどの理由から、光検出センサーとしては好都合であ る。以上の測定結果から、今回は直列モデル、周波数 100kHz で Body 容量を測定することとした。

図 4.12 は Body 容量の測定結果である。この測定結果を見ると、エンジニアリングモデルの body 容量測定では 200V 付近で空乏化していたのに対して、今回の素子では 100V 付近ですでに ほとんど空乏化しているように見える。このことは、エンジニアリングモデルに比べてこのセン サーの Nbulk の比抵抗が大きいことから説明できる。逆電圧 250V での Body 容量値は ~ 447[*pF*] であり、センサーのジオメトリから予想される値とほぼ一致した。



図 4.11: インピーダンス周波数特性



図 4.12: Body 容量測定結果

図 4.13 に ch 間容量の測定結果と、図 4.14 に逆電圧 250V における ch 間容量と引出し線長 さ $(L_t + L_c)$ の関係を記す。図 4.14 の容量値は、試験用ボードの浮遊容量を引いた値としている。 図 4.14 の直線は、ch 間容量測定値に直線をフィットしたものであり、その関数は $C(L_t + L_c) = 2.41(L_t + L_c) + 3.88[\text{pF/cm}]$ となっている。エンジニアリングモデルではこの直線の傾きが $3.57(L_t + L_c)[\text{pF/cm}]$ であったことから、フライトモデルでの引出し線の寄与は $\sim 2/3$ 倍となり、ほぼ予想通りの測定結果となった。Body 容量を足すと 1pixel の容量は $8.71 \sim 21.38[pF]$ となり、SGD の要求である 1pixel あたり < 10pFを上回る容量をもつ pixel が多くなるが、引出し線が集中する pixel を除けばノイズへの寄与は大きくないため、現状でほぼ SGD からの要求である エネルギー分解能を達成できるとした。



図 4.13: ch 間容量測定結果



図 4.14: ch 間容量と引出し線長さの関係

4.4 X線スペクトル測定結果

取得したスペクトルの例として、図 4.15 に温度-15 の環境下で、pixelNo33D で取得した ^{241}Am のスペクトルを記す。グラフの縦軸は対数表示にしてある。なお、このときの Shaping Time は 1 μsec に設定して行った。以下に X 線スペクトル測定結果の詳細を述べる。



図 4.15: 1ch(No33D) で取得した ²⁴¹Am の X 線スペクトル

エネルギー分解能の Shaping Time 依存性 4.4.1

図 4.16 は、pixelNo33D の 60keV のエネルギー分解能の温度依存性を、ShapingTime 毎にグラ フにしたものである。この測定では、-10 から-20 においてはほとんどエネルギー分解能に違 いがないという結果となった。

この結果から、温度は-15 に固定して、pixelNo33D,No00,No28の各 pixel でエネルギー分解 **能の** Shaping Time 依存性を調べた結果が図 4.17、図 4.18、図 4.19 である。各グラフの緑線は Shot noise と Johnson noise の二乗和平方根である Parallel noise を計算したもの、青線は PreAMP で ある CP 5102 のスペックシートの容量勾配から容量性ノイズを求めたもの、紫線は 1/f noise を Parallel noise と容量性ノイズを足し合わせて測定値にフィットすることで求めたもの、水色の線 はそれらのノイズを足し合わせたものである。測定値とはあまり整合性がとれておらず、回路系 のノイズ寄与が予想されるが、原因は明らかではない。理論計算の線を見ると、SGDの運用温度 では容量性ノイズが効いてくるため、引出し線の容量を減らす方向性が有効であるこ である-15 とが示唆される。

軌道上の放射線による表面損傷で、ここで求めた Shot noise がいかに増加するかについては、 §4.5 で述べる。



図 4.16: pixelNo33D のエネルギー分解能温度依 存性

Si-Pad_FM_ShapingTimeDependence_-15C

з

ShapingTime[usec]

4 5 6

2.5

0.5

0 1 2

Noise[keV] 1.5



、pixelNo33D の ShapingTime 依 ⊠ 4.17: -15 存性



、pixelNo00 の ShapingTime 依 図 4.19: -15 ☑ 4.18: -15 存性 存性

no00_measureu Parallel noise

noise Total

pacitance 1/f

、pixelNo28 の ShapingTime 依

46

4.4.2 pixel 毎のエネルギー分解能の分布

図 4.20 は、広島大学の朴が SGD 用 ASIC とほぼ同じものである VA450 を用いて測定した、 ²⁴¹Am の 60keV ラインのエネルギー分解能の pixel 毎の分布図である [25]。このとき使用した Si-Pad は本研究と同型のものであり、引出し線の位置が鏡面のようになっているものである。また、 このときの温度は-20 であった。図 4.20 の白い部分はデータから除外した部分であるが、これ は 1/4 区画である 64pixel しかボンディングを行っていなかったため、電場の不安定性を考慮し、 端の pixel ならびにボンディングの外れた pixel の周囲の pixel を除外した結果である。この結果 を見ると、ほとんどの pixel でエネルギー分解能が 2.2keV 以下となっていることがわかる。



図 4.20: エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (朴測定)[25]





図 4.21: エネルギー分解能の pixel 毎の分布 (田 中測定)[24]

図 4.22: 引出し線のエネルギー分解能の相関 [24]

図 4.21 と図 4.22 は、Stanford 大学の田中氏によって行われた SGD 用 ASIC である VATA450 の実験の結果と、引出し線との相関である [24]。図 4.22 の赤い点 (PFM) はフライトモデルの測定 結果であり、黒い点 (EM) はエンジニアリングモデルの測定結果である。これら 2 つの実験結果 から、今回のモデルでは、引出し線の集中する 6pixel 程を除くほとんどの pixel で SGD からの要 求であるエネルギー分解能 < 2[keV] を達成することがわかった。

4.4.3 X 線カウント数と空乏層の厚み

図 4.23 にフライトモデル Si-Pad における ²⁴¹Am の 60keV のカウント数の HV 依存性を記す。 これらは線源と pixel の距離は 2cm とし、強度 367.1kBq の ²⁴¹Am 線源に対し、スペクトル取得 を 10 分間行ったものである。この結果から、HV=100[V] の時点で空乏層の広がりはかなり緩や かになっていることがわかる。この実験からは、HV=200[V] 以上では誤差の範囲内でカウント数 が一定となるため、逆電圧 200V で完全空乏化したと言える。



図 4.23:²⁴¹Am の 60keV カウント数の HV 依存性 (FM)

Body 容量測定との整合性を見るため、HV=200[V] と 300[V] におけるでの ²⁴¹Am の X 線カウ ント数から、空乏層の厚さを求めた。線源を置く位置による不定性を小さくするため、線源と pixel の距離は 11cm とし、強度 367.1kBq と 475.9kBq の ²⁴¹Am 線源を重ねて置いたものに対し、スペ クトル取得を 60 分間行ったものである。これらのセットアップはエンジニアリングモデルと同様 にして実験を行った。表 4.4.3 にその計算結果を記す。今回は逆電圧 200V、300V 共に Body 容量 からの計算値とほぼ同じ値となり、Body 容量測定を裏付けるものとなった。

$\operatorname{Bias}(V)$	X 線カウント数からの計算値 (mm)	Body 容量からの計算値 (mm)
200	$0.56 {\pm} 0.02$	0.59
300	$0.59 {\pm} 0.02$	0.60

表 4.1: 逆電圧 200V、300V でのフライトモデル Si-Pad の空乏層厚みの計算値

4.5 ガンマ線照射後の性能への影響の検証

今回は⁶⁰Coのガンマ線を2011年1月17日に1krad、1月24日に1krad(積算2krad)、2月2日 に3krad(積算5krad)、2月18日に5krad(積算10krad)照射した後に各種測定を行った。照射に使 用したSi-Pad は暗電流、センサー容量測定、X線読み出し実験に使用したものであり、測定に用 いる pixel は図 4.24 にあるように、pixelNo00(赤印),No28(青印),No33D(緑印)の3つである。照 射後の ShapingTime 依存性の測定には、No00とNo33Dの2pixelを用いた。



図 4.24: 照射実験で選んだ pixel

4.5.1 暗電流の照射量依存性

図 4.25 は、各線量照射後の温度-15 における、pixelNo00 の暗電流の時間変化である。エンジ ニアリングモデルと同様に照射量とともに暗電流が増加する傾向が見られ、その増加の割合もほ ぼ一致した。一方、暗電流が照射直後から徐々に降下する Annealing は、5krad 照射後と 10krad 照射後に見られた。また 2krad 照射後にもわずかにそれらしい振舞いが見られたが、変化量が非 常に小さいため恒温槽の温度の揺らぎが原因の可能性もあり、断定には至らなかった。



図 4.25: 照射量毎の pixelNo00 の暗電流時間変化

図 4.26 と図 4.27 はそれぞれ、温度 20 と-15 における 1pixel 暗電流の照射量毎の変化である。 各 pixel で照射量毎に暗電流が増加している様子がわかる。これら暗電流増加による Shot noise 増加の影響については、§4.5.4 で述べる。



図 4.26: 20 下での 1 pixel 暗電流の照射量依存性



図 4.27: -15 下での 1pixel 暗電流の照射量依 存性

4.5.2 暗電流の温度依存性

図 4.28 は pixelNo00 の暗電流の温度依存性を示したグラフであり、積算照射量毎に色分けして いる。式 (3.7) を実験結果にフィッティングし、本来のフェルミ準位と損傷による新たなエネルギー 準位との差である $E_t - E_i$ を求めたのが表 4.2 である。今回の結果からは、照射量 0~2krad にか けて照射量毎に $E_t - E_i$ が小さくなる傾向が見られ、参考文献 [19] の結果と似た傾向を示してい たが、それ以外の測定点では有意な相関は見られなかったため、エンジニアリングモデルと同様、 さらに厳密なフィッティングを行うには、フィッティング式のパラメータや暗電流の誤差を正確に 定義する必要があると思われる。



図 4.28: 照射量毎の pixelNo00 暗電流 の温度依存性

Total Dose(krad)	$E_t - E_i(eV)$
0	$0.192{\pm}0.00094$
1	$0.1543 {\pm} 0.00063$
2	$0.1406 {\pm} 0.00094$
5	0.1445 ± 0.00314
10	$0.0976 {\pm} 0.00207$

表 4.2: 照射量毎の暗電流温度依存性 へのフィッティング結果

4.5.3 高印加電圧での暗電流の振舞い

図 4.29 は 1krad 照射時に温度-15 で測定した、HV と暗電流の時間変化のグラフである。HV 値と暗電流値は LabView を用いて 1 秒毎に記録した。HV は実験者が操作しており、1V 変化させ るのに 1 秒間以上時間をかけている。今回の実験では、センサーに高電圧をかけると HV を上げた 瞬間に暗電流が跳ね上がり、その後数分間かけて徐々に降下する現象が、照射前の-15 での測定 (§4.2)、ならびに照射後の-15 、20 の測定で見られた。この測定では、暗電流の降下現象を観 察するため、HV 電圧を上げた後 5 分間一定にし、その後 380V まで電圧を下げるという動作を繰 り返しつつ、1V ずつ到達する電圧を上げている。この現象は参考文献 [22] にある照射後の特性回 復現象と特徴が似ているため、本論文ではその名前を引用し"Traning Effect"と呼ぶこととする。



図 4.29: 1krad 照射時の HV と暗電流値の時間変化

 $1 \sim 2 \text{krad}$ 照射後の測定では、はじめ-15 で $360 \sim 370[V]$ において" Training Effect" が見られ たが、その数時間後に同じ温度で測定を行うと、"Training Effect"が見られる電圧は $470 \sim 480[V]$ に上がっており、照射前のブレークダウン電圧とほぼ同じであった。また 5 krad 照射後は-15 で 310V 付近にまで Training Effect が起きる電圧は下がっており、10 krad 照射後は照射直後に 250Vで Training Effect が見られた。これらのことから、Training Effect は照射量に依存して発生電圧 が下がること、また時間に依存して発生電圧が回復する傾向があると思われる。図 4.31 にその様子 を記す。ここでは HV を 10V 上げた後、1 分経過時の暗電流値が 10%以上変化した電圧を Training Effect 電圧としている (図 4.30)。また、照射量は色によって区別し、塗りつぶしのない点は-15 での測定を、塗りつぶした点は 20 での測定を示している。



図 4.30: 10krad 照射後, -15 下での P 側全体の 暗電流 HV 依存性

図 4.31: Training Effect が起きる電圧の時間変化

この効果が起きる原因としては、以下のような過程が考えられる。まず、センサー表面のSiO₂内に照射により生じた正電荷が高電圧がかかることによりゆっくりと動きはじめ、電位の低いPsidepixel付近に集まる。これらの正電荷はpixel端の強電場をさらに強め、Micro-discharge[27]がより低電圧で起きる原因となる。暗電流がある電圧から急激に増加するのはこのMicro-dischargeが

起きているためと考えられ、このとき Pside-pixelから N-bulk 内に放出された電子が SiO₂ 内の正 電荷を中和することで pixel 端の電場が弱まり、Micro-dischargeの発生割合を徐々に減少させ、そ れが暗電流の緩やかな降下として表れると考えられる (図 4.32)。





この現象について今後詳しい調査を行う際は、複数の素子を用意し、一定の電圧を印加し続け て時間変化を追う、HV値を上下させてこの現象がおきる電圧がいかに変化するか調べるなどの実 験が必要と思われる。

4.5.4 10krad 照射後の高電圧下での信号波形

フライトモデル Si-Pad へ 10krad 照射を行った後、300V 以上の高電圧をかけて²⁴¹Am の 1pixel スペクトル読み出し実験を行った。この実験は、Training Effect 電圧が 10krad 照射直後に Si-Pad で通常使用する電圧である 250V まで降下していたため、Training Effect が起きている際のノイ ズレベルを確認するために行ったものである。





図 4.33: HV=330V, -15 での pixel-No28 のプ リアンプ出力波形

図 4.34: HV=340V, -15 での pixel-No28 のプ リアンプ出力波形

図 4.33 と図 4.34 は-15 で No28 の Pixel から読み出したプリアンプ出力の信号である。今回 用いたプリアンプは CP 5102 であり、これは入力信号の極性を反転させる仕様になっている。図 中央付近の大きなパルスは、パルサーから入力したテストパルスである。図 4.34 を見ると、正方 向(実際は負)に信号(図中の緑矢印)が出ていることがわかる。これは 330V 以下の電圧下では見 られなかったことから(図 4.33)、HV に依存して発生する信号であると思われる。



図 4.35: -15 , HV=250,340[V], pixel-No28 で の ²⁴¹Am のスペクトル



図 4.36: -15 , HV=250,340[V], pixel-No00 で の ²⁴¹Am のスペクトル



図 4.37: -15 , HV=250,340[V], pixel-No33D で の ²⁴¹Am のスペクトル

図 4.35、図 4.36、図 4.37 は、それぞれ 10krad 照射後に温度-15 で No28, No00, No33D を用 いて取得した ²⁴¹Am のスペクトルである。HV は 250V と、Training Effect の起きていた 340V も しくは 350V でスペクトルを取得している。各スペクトルとも、テストパルスの低エネルギー側に 尾を引くような構造 (図中の緑矢印) がみられるが、これは上記の負の信号とテストパルスの信号 が重ね合わされるために生じると思われ、特に引出し線の集中する No28 で負の信号が多く発生 していたことが示唆される。また、No28 と No00 のスペクトル中のテストパルスには、高エネル ギー側にもわずかに膨らみがあるように見える。

この現象は、放射線により生成された SiO₂ 内の電荷が Nbulk 内の電子をトラップする際に負 の信号を生じ、その信号が SiO₂ 上を走る引出し線により pickup されたためと推測される。一方 HV に依存して発生することから、この現象は前述の Micro-discharge と関連する現象ではないか とも考えられるが、参考文献 [27] から、Micro-discharge が起きた場合、ホワイトノイズのような ランダムノイズが検出されると予想されるため、この負の信号は Micro-discharge を直接検出した ものではないと思われる。以上から、現段階ではこの現象と Micro-discharge を関連付けることは できないが、今回の実験ではこの現象の詳細を調べることができなかったため、今後さらなる調 査が必要と考える。

4.5.5 ショットのイズへの影響

図 4.38 は各照射量毎の 1pixel 暗電流 (全 pixel 暗電流 /256) から、SGD 用 ASIC で用いる予定の Shaping Time = $4[\mu sec]$ を用いて、Shot noise を計算したものである。これを見ると、ASTRO-H 衛星の寿命のほぼ 2 倍である 10 年分の照射量 (10krad) においても、SGD の運用温度である-10 以下では Shot noise の増加の影響は十分小さいと言える。



図 4.38: 照射量毎の Shot noise 計算値

図 4.39 と図 4.40 は実際に照射後に測定した 241 Am の 60keV ラインのエネルギー分解能 Shaping Time 依存性と、-15 の暗電流から測定した Shot noise の比較である。SGD 用 ASIC とは使用す る回路の容量特性が違うため、この結果を SGD で用いる性能に直接フィードバックすることはで きないが、この実験から、Shot noise の増加は低温ではほとんど影響がないことがわかった。



図 4.39: pixelNo00 の照射量毎の Shaping Time 依存性



図 4.40: pixelNo33D の照射量毎の Shaping Time 依存性

4.6 フライトモデルの基礎特性実験のまとめ

本章では SGD 用 Si-Pad センサーの最終試験として、フライトモデル Si-Pad の暗電流測定、センサー容量測定、X 線読み出し、ガンマ線照射実験を行い、以下のような結果が得られた。

 ・暗電流は-10 において、1pixel あたり逆電圧 250V で~23.9[pA] であり、SGD からの要求 を十分に満たす性能であった。また、通常の半導体素子に見られるような温度依存性も確認 した。高印加電圧下では、20 では逆電圧 470V でブレークダウンと見られる現象が起き た。-15 で起きた現象については、以下に記述する。いずれも通常の動作電圧では起こら なかったため、通常の動作で問題はないとした。

- Body 容量は、インピーダンスの周波数依存性からモデルと周波数を定めて測定を行うと、
 逆電圧 250V で ~ 447[pF] となり、センサーのデザインから計算される理論値とほぼ一致する値が得られた。
- ch間容量測定結果より、フライトもデルへの変更で引出し線の容量への寄与を約 2/3 倍にすることができたことがわかり、この点ではほぼ予想通りの結果となった。一方、ch間容量とBody容量を足すと1pixelの容量は 8.71 ~ 21.38[pF] となり、SGD からの要求である
 < 10[pF]を上回る pixel が多くなるが、ノイズへの寄与は大きくないため、現状でほぼ SGD からの要求であるエネルギー分解能を達成できるとした。
- X 線読み出し実験の結果、pixel 毎のエネルギー分解能の分布から、引出し線が集中する場所の 6pixel 程を除き、ほとんどの pixel で SGD からの要求であるエネルギー分解能 2keV を 達成する結果となった。また、SGD を運用する-10 以下において、エネルギー分解能はほ とんど温度により変動しないことがわかった。
- X 線カウント数と Si の X 線透過率から空乏層の厚みを計算した結果、逆電圧 200V では 0.56±0.02mm、逆電圧 300V では 0.59±0.02mm となり、検出器のデザインならびに Body 容量測定結果とほぼ一致する値となった。
- Si-Pad にガンマ線を照射して表面損傷を起こし、その後のセンサー性能を測定した。ガン マ線照射量はASTRO-H 衛星の寿命の2倍である10年分(10krad)までを行い、照射後の暗 電流値から Shot noise の計算を行った結果、SGDの運用温度では暗電流の増加による Shot noise の影響は十分小さいことが検証された。
- ガンマ線照射前の温度-15 下とガンマ線照射後に、暗電流が HV を変えた瞬間増大し、その後徐々に下がる現象が見られた。これは、pixel 端の Micro-discharge とその回復現象である Training Effect であると推測される。また、10krad 照射後に 340V 以上の電圧で負の信号が確認されたが、今回の測定ではその詳細は明らかにできなかったため、今後さらに調査を行う必要がある。

これらの結果から、今回実験したフライトモデルは SGD 用 Si センサーとして過不足ない性能で あるため、衛星搭載品としての使用に問題はないという結論に至った。

第5章 まとめと今後

本研究では、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される軟ガンマ線検出器 SGD に使用される Si-Pad センサーの基礎特性評価を行った。

・エンジニアリングモデルの基礎特性評価(第3章)

SGD 搭載用 Si-Pad とほぼ同等のモデルとして開発されたエンジニアリングモデル Si-Pad の基礎特性評価として、暗電流測定、センサー容量測定、X 線読み出し実験、ガンマ線照射実験を行った。その結果は以下の通りである。

- 暗電流測定の結果、現状で SGD からの要求を達成することがわかった。
- 容量測定の結果、pixel 上を通る引出し線とpixel 上にある BondingPad が容量に寄与し、多くの pixel で SGD からの要求を達成できないことが明らかとなった。
- X 線読み出し実験の結果、引出し線や BondingPad の寄与によりエネルギー分解能が悪くなる傾向が見られ、多くの pixel で SGD からの要求を達成できていないことが明らかになった。
- 検出した X 線のカウント数から空乏層の厚みを計算した結果、十分空乏化された電圧では Body 容量測定と一致する値となったが、空乏化電圧が Body 容量測定結果と一致しなかった。
- Si-Pad へのガンマ線照射実験の結果、暗電流値の増加による Shot noise の影響は、軌道上で 10 年間運用したとしても、SGD の運用温度では十分小さいことが検証された。

これらの結果から、衛星搭載用フライトモデルへの改良の指針として、引出し線の容量を低減す ること、さらに pixel 上の BondingPad を pixel 外に移すことで、エネルギー分解能を全体的に向 上させることが挙げられた。

・フライトモデルの基礎特性評価(第4章)

SGD 搭載用として開発されたフライトモデル Si-Pad の最終試験として、テスト用に納品され たセンサーの基礎特性評価 (暗電流、センサー容量、X 線読み出し、ガンマ線照射実験)を行った。 その結果は以下の通りである。

- 暗電流は SGD からの要求を十分満たす性能であった。また高印加電圧下では暗電流が増大 する現象が見られたが、通常の動作電圧 (300V 以下)では問題なく動作した。
- 容量測定の結果、引出し線の容量への寄与をほぼ計算通りに減らすことができた事も確認し、ほとんどの pixel で SGD から要求をほぼ達成できた。
- X 線読み出し実験の結果、ほとんどの pixel で SGD から要求されるエネルギー分解能を達成した。また、SGD を運用する温度範囲では、エネルギー分解能はほとんど温度により変動しないことがわかった。

- X 線カウント数と Si の X 線透過率から空乏層の厚みを計算した結果、検出器のデザインな らびに Body 容量測定結果とほぼ一致する値となった。
- Si-Pad へのガンマ線照射実験の結果、ASTRO-Hの寿命の2倍である10年分(10krad)を照 射した後でも、暗電流の増加によるShot noiseの影響は十分小さいことが検証された。

これらの結果から、今回実験したフライトモデルは SGD 用 Si センサーとして過不足ない性能であるため、衛星搭載品としての使用に問題はないという結論に至った。

今後の課題としては、以下の通りである。

- X 線検出カウント数から空乏層厚さを求める実験において、エンジニアリングモデルで空乏 化電圧が Body 容量測定結果と一致しなかった。この問題については、Nbulkの遷移領域に 関するさらなる検証が必要である。
- フライトモデルの高電圧印加試験で、pixel 端の Micro-discharge とその回復現象である Training Effect であると思われる現象が見られたが、今回の実験ではその詳細を調べることができなかったため、今後詳しい調査が必要である。
- 今後は SGD を実際に組み上げ、実機を用いた性能評価実験を行い、さらに ASTRO-H 衛星 上で正常に機能することを確認する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたって、日頃より御指導を賜わり、本論文の主査もしていただきました深沢 先生に心より感謝を申し上げます。研究室に来たばかりの頃は右も左もわからなかった私を、そ の時から熱心に指導してくださりました。また、食事などもよくご一緒していただき、普段から とても親しく接していただきました。本当にありがとうございました。

また、シリコンセンサーのことでいろいろと相談に乗ってくださり、セミナーなどでも御世話 になりました大杉先生。日頃の研究活動から御世話になり、ガンマ線照射実験の際は付き添いも していただいた水野先生、片桐先生。実験関係などの研究面だけでなく、休日は食事や遊びに誘っ て下さったひろたかさん。可視光セミナーや飲み会などでも御世話になりました川端先生、植村 先生。本論文の題目を考えるにあたりアドバイスをいただきました吉田先生。以上の本研究室の 先生方にも、心より感謝を申し上げたいと思います。ありがとうございました。

研究室の先輩方にも大変御世話になりました。まず、林さんには実験関係や研究生活などで数 え切れない程のアドバイスを頂き、よく食事や飲み会にも一緒に来ていただくなど、本当に御世 話になりました。また、特に実験関係で御世話になりました西野さん、花畑さん、平木さん、松 岡さん。今年度同じ学生部屋で、色々と御世話になりました笹田さん、先本さん。その他の皆様 にも、食事や飲み会などでも気軽に話しかけていただき、また研究だけでなく様々な面で相談に 乗っていただき、本当にありがとうございました。

この2年間共に研究に励んだM2のみなさん。みなさんと研究室のイベントをこなしたり、飲み会で騒いだりして仲良くなれたことは、この大学に来て得た大きな財産のひとつだと思います。 今後は就職や進学でばらばらになってしまいますが、卒業後にまた会えたときは是非一緒に遊ん でください。

宇宙研でボンディングを行ってくれた朴君をはじめとする M1 のみなさん。1 月の食事会の料理 はとてもおいしかったです。ありがとうございました。これから M2 となり、特に就活もする人は 大変だと思いますが、体にだけは気を付けてがんばってください。また、4 年生のみなさん、卒論 お疲れさまでした。就職する人も進学する人も、これからますますのご活躍を期待しています。

HXI/SGD の会議などで Si-Pad に関して様々なアドバイスをいただきました田島先生、田中さん、そして HXI/SGD チームの皆様。ガンマ線照射実験で御世話になりました工学研究科の遠藤 先生、放射線総合実験棟の由良野さん。副査をしていただいた志垣先生。物理科学科事務の皆様。 皆様のおかげで、この論文を無事完成させることができました。本当にありがとうございました。

拙文で大変失礼致しますが、本文をもって謝辞とさせていただきます。最後に、X線天文衛星 ASTRO-Hの完成と、高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室のますますのご清栄とご発展 をお祈りしております。

> 2011年2月10日 道津匡平

58

関連図書

- [1] S.M.Sze 著、南日康夫 川辺光央 長谷川文夫 訳 「半導体デバイス 基礎理論とプロセス技術 第2版」、産業図書
- [2] XCOM:Photon Cross Sections Database, http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.htmlk
- [3] 平木一至 「モンテカルロシミュレーションによる衛星搭載軟 線検出器の軌道上放射化バッ クグラウンドの評価」、修士論文、広島大学、2010
- [4] 林克洋 「次期 X 線天文衛星 ASTORO-H 搭載硬 X 線撮像用シリコン検出器の性能評価」、修 士論文、広島大学、2010
- [5] 花畑義隆 「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」、修士論文、広島大学、2010
- [6] 武田伸一郎 「Si/CdTe コンプトンカメラのための高分解能両面シリコンストリップ検出器 の性能評価」、修士論文、東京大学、2006
- [7] 杉保昌彦 「ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器の低エネルギー応答の打ち上げ前最終測定」、修士 論文、東京大学、2000
- [8] 朴寅春 「次期 X 線観測衛星 ASTRO-H 搭載軟 線検出器用 Si 検出器のスペクトルの性能 評価」、卒業論文、広島大学、2010
- [9] 中本達也 「多層シリコンストリップと BGO・アクティブシールドを用いた宇宙軟ガンマ線 コンプトンカメラの開発」、修士論文、広島大学、2004
- [10] H.Takahashi, ASTRO-H Quick Reference
- [11] Y.Fukazawa, ASTRO-H SGD Si Sensor, HXI/SGD Joint Engineering Peer Review, 2009/12/16
- [12] ASTRO-H SGD team, ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector Preliminary Design Review
- [13] 松岡正之 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器に向けた Si-Pad 検出器の開発」、 2009 年日本天文学会春季年会、広島大学
- [14] 高橋忠幸「第26号科学衛星 (ASTRO-H) プロジェクトについて」、2009/10/22、宇宙開発委 員会推進部会・事前評価資料
- [15] 宇野進吾 「宇宙硬 X 線撮像用低ノイズ両面シリコンストリップ検出器の開発」、修士論文、 広島大学、2003
- [16] MOMENTIVE performance materials 社、YE5822(A)YE5822(B) 製品安全データシート

- [17] R.B.Firestone, V.S.Shirley(Editor), C.M.Baglin, S.Y.Franc Chu, J.Zipkin(Assistant Editors), Table of Isotopes
- [18] 日本放射性同位元素協会 編 「新版 アイソトープ便覧」
- [19] Kaneko et al., Improvement of Radiation Hardness of Double-Sided Silicon Strip Detector for Belle SVD Upgrade, 2002, IEEE
- [20] Murataka et al., Dose Rate Estimation Around a ⁶⁰Co -ray Irradiation Source by Means of ¹¹⁵In Photoactivation, 2009
- [21] 浅野哲也 「BGO と APD を用いた宇宙 線検出器アクティブシールドの研究」、卒業論文、 広島大学、2005
- [22] 半田隆信 「シリコンマイクロストリップセンサーの放射線損傷と放射線照射後の特性回復現 象の研究」、広島大学、1994
- [23] T.Tanaka, SGD FEC + Si-Pad Test, HXI/SGDteam report, KIPAC/Stanford
- [24] T.Tanaka, PFM Si-Pad, HXI/SGDteam report, KIPAC/Stanford
- [25] 朴寅春, Peformance Evaluation of Si-Pad for SGD onboard ASTRO-H, 広島大学、高エネ ルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室コロキウム、2011/01/20
- [26] クリアパルス株式会社「5102型前置増幅器取扱説明書」、2001/10
- [27] T.Ohsugi et al., Micro-discharge at strip edge of silicon microstrip sensors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Resarch, 1996