

次世代X線天文衛星搭載に向けた
裏面照射型SOIピクセル検出器の軟X線感度の改善

京都大学大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室
伊藤 真音

2017年1月26日

Abstract

超新星残骸における Fe、Ni を撮像分光することで超新星の爆発起源に迫ることが出来る。しかし、今まで Fe K 輝線周辺のエネルギー帯 (6.4–8.1 keV) は明るい天体しか十分に観測できなかった。そこで、我々は、以上を目的とした次世代 X 線天文衛星「FORCE」に搭載予定である X 線 SOI ピクセル検出器を開発している。これは SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いた厚いセンサー部と高速の CMOS 読み出し回路を一体化した検出器である。各ピクセルにヒットタイミングを出力させるイベントトリガー機能を備えることで、高い時間分解能 ($\sim 10 \mu\text{sec}$) を得る。これにより、従来の X 線 CCD では不可能であった反同時計数法を用いて、宇宙線起源である非 X 線バックグラウンドを大幅に抑え、0.5 - 40 keV にわたる広帯域撮像分光を実現する。軟 X 線感度を高くするには、X 線入射面の不感層をできるだけ薄くする必要がある。我々の目指す感度実現において、不感層厚の目標は $0.1 \mu\text{m}$ 、要求値は $1.0 \mu\text{m}$ である。検出器回路層側 (表面) には厚さ $8 \mu\text{m}$ 程度の回路層があるため、検出器センサー層側 (裏面) から X 線を入射させる裏面照射型 (Back-Illuminated: BI) 検出器が必要である。BI 素子の製造過程で裏面には結晶欠陥が生じ、これに起因して暗電流が発生する。よって、結晶構造を回復させ暗電流を抑えるだけではなく、薄い不感層を同時に実現する裏面プロセスを行うことが必須である。我々は、これまでに熱処理の方法が異なる 2 種類の裏面プロセスを施した BI SOI ピクセル検出器を開発した。一つは、ローレンス・バークレー国立研究所で開発されたイオンインプラント+低温アニール処理 (PZ) を施した素子、もう一つはイオンインプラント+レーザーアニール処理 (LA) を施した素子である。PZ と LA とともに、Cl (2.6 keV)、Ti (4.5 keV)、Fe (6.5 keV)、Se (11.2 keV) の特性 X 線を用いた評価を行い、検出効率を見積もった。X 線フォトンカウンティングの実質的な不感層は、裏面プロセスで決まる物理的な不感層だけではなく、空乏層厚や読み出しノイズに依存する。従って、これらのパラメータの違う素子を使って、軟 X 線性能のパラメータ依存性を調べた。以上の結果から、2 種類の裏面プロセスはともに物理的に $0.5 \mu\text{m}$ 程度の不感層が存在し、要求値 $1.0 \mu\text{m}$ を達成していることが分かった。さらに得られた不感層厚は半導体デバイスシミュレーションによって再現でき、裏面感度改善の指針を立てることができた。

目次

第1章	超新星の爆発機構と次世代 X 線撮像分光器の開発	1
1.1	超新星の爆発機構とその観測	1
1.1.1	Ia 型超新星爆発と ^{58}Ni の観測	2
1.1.2	重力崩壊型超新星爆発と ^{58}Ni の観測	4
1.2	従来の観測の問題と次世代 X 線撮像分光器の開発	6
1.2.1	従来の観測装置の問題点	6
1.2.2	次世代 X 線撮像分光機の開発	7
第2章	X 線天文用 SOI ピクセル検出器	9
2.1	SOI ピクセル検出器の構造	9
2.1.1	p 型・n 型半導体	9
2.1.2	pn 接合と空乏層	10
2.2	X 線と SOI ピクセル検出器の相互作用	11
2.3	表面照射型、裏面照射型について	13
2.3.1	表面照射型 (Front-illuminated: FI)	14
2.3.2	裏面照射型 (Back-illuminated: BI)	14
2.4	電荷収集	14
2.5	SOI ピクセル検出器の性能指標	16
2.5.1	ゲイン	16
2.5.2	エネルギー分解能と読み出しノイズ	17
2.5.3	検出効率	17
第3章	多色蛍光 X 線校正システム	18
3.1	実験セットアップ	18
3.1.1	多色 X 線発生部	19
3.1.2	SOI ピクセル検出器測定部	19
3.2	X 線絶対強度測定	21
第4章	LA 処理を適用した XRPIX の軟 X 線感度の測定	25
4.1	X 線天文用 SOI ピクセル検出器の開発	25
4.2	XRPIX2b-LA の仕様	25
4.2.1	XRPIX2b の概要	25
4.2.2	ピクセル回路について	26
4.2.3	LA 処理について	26
4.3	基本性能試験: ペDESTAL 特性	27

4.4	X線検出の解析方法	29
4.4.1	解析プロセス	29
4.4.2	イベント検出とチャージシェアリングイベントの補正	30
4.5	XRPIX2b-LAにおける軟X線裏面照射実験	31
4.5.1	取得データについて	31
4.5.2	エネルギースペクトルとゲイン	32
4.5.3	実験結果 1: 空乏層の広がり	33
4.5.4	実験結果 2: 不感層の厚み	34
4.6	XRPIX2b-LAのデバイスシミュレーション	36
4.6.1	シミュレーションで再現したデバイス構造	36
4.6.2	デバイスシミュレーションの結果	39
4.7	XRPIX3b-LAの仕様と概要	42
4.8	XRPIX3b-LAにおける軟X線裏面照射実験	44
4.8.1	取得データについて	44
4.8.2	エネルギースペクトルとゲイン	44
4.8.3	検出効率と不感層	47
第5章	PZ処理を適用したXRPIXの軟X線感度の測定	49
5.1	XRPIX2b-PZの仕様	49
5.1.1	PZ処理について	49
5.2	XRPIX2b-PZにおける軟X線裏面照射実験	49
5.2.1	取得データについて	49
5.2.2	エネルギースペクトルとゲイン	49
5.2.3	実験結果 1: 空乏層の広がり	51
5.2.4	実験結果 2: 不感層の厚み	55
第6章	まとめ	56

目次

1.1	Ia型の爆発機構イメージ図	2
1.2	Ia型の超新星残骸におけるNi輝線の観測例	3
1.3	NuSTARによるCas Aの65–70 keVのエネルギーバンドイメージ	5
1.4	CasAにおける ^{44}Ti と ^{56}Fe の空間分布比較図	5
1.5	すざく衛星搭載のX線CCDで取得したNXBのスペクトル	6
1.6	反同時計数法によるNXBの除去の概念図	8
2.1	SOIピクセル検出器の構造図	9
2.2	p型半導体とn型半導体の模式図	10
2.3	pn接合と空乏層の形成	11
2.4	SiとX線の相互作用	12
2.5	入射X線エネルギー・物質の種類に応じて支配的となる相互作用	13
3.1	多色X線較正システムの模式図	18
3.2	多色X線較正システムの写真	19
3.3	SOIピクセル検出器測定部(真空槽2)の写真	20
3.4	素子とコールドプレート	21
3.5	SOIピクセル検出器のデータ読み出しボード	22
3.6	SDDで得られた各X線スペクトル	23
3.7	SDDにおけるX線エネルギーに対する検出効率	24
4.1	XRPIX2bのチップ写真とブロック機能図	26
4.2	XRPIX2bのピクセル回路図	27
4.3	XRPIX2bの出力波高値マップ	28
4.4	あるピクセルのライトカーブとヒストグラム	28
4.5	あるピクセルのライトカーブとヒストグラム	29
4.6	イベントセレクションの関係図	31
4.7	XRPIX2b-LAで得られたX線スペクトル	33
4.8	XRPIX2b-LAのエネルギー較正の結果	34
4.9	XRPIX2b-LAにおけるSe-Kの検出効率のバックバイアス電圧依存性	35
4.10	XRPIX2b-LAにおける検出効率とエネルギーの関係	35
4.11	XRPIX2b-LAにおけるCl-K検出効率とバックバイアス電圧依存性	36
4.12	XRPIX2bのピクセルレイアウト	37
4.13	XRPIX2b-LAのデバイス構造図	38
4.14	XRPIX2b-LAの裏面におけるリン濃度プロファイル	38

4.15	XRPIX2b-LA におけるデバイスシミュレーションの結果	40
4.16	XRPIX2b-LA における不感層厚のバックバイアス依存性	41
4.17	XRPIX3b のチップ写真とブロック機能図	42
4.18	センスノード後段における回路図	43
4.19	XRPIX シリーズ性能比較	43
4.20	XRPIX3b-CSA-LA で得られた各 X 線スペクトル	45
4.21	XRPIX3b-SF-LA で得られた各 X 線スペクトル	46
4.22	XRPIX3b-LA のエネルギー較正の結果	46
4.23	XRPIX3b-LA における検出効率とエネルギーの関係	47
4.24	XRPIX3b-LA におけるデバイスシミュレーション結果	48
5.1	XRPIX2b-PZ におけるリン濃度プロファイル	50
5.2	PZ 処理を行った SOI ピクセル検出器における SRA 測定結果	50
5.3	XRPIX2b-PZ で得られた各 X 線スペクトル	52
5.4	XRPIX2b-PZ における Se-K の検出効率のバックバイアス電圧依存性	53
5.5	XRPIX2b-PZ における Se-K の検出効率とバックバイアス電圧依存性	53
5.6	XRPIX2b-PZ における検出効率とエネルギーの関係	54
5.7	XRPIX2b-PZ における Cl-K の検出効率とバックバイアス電圧依存性	55

表 目 次

3.1	XR-100SDD の仕様	22
3.2	SDD で測定したデータ一覧	22
3.3	SDD における測定した各 X 線エネルギーに対する検出効率	24
3.4	X 線絶対強度	24
4.1	XRPIX2b-LA で取得した X 線データ一覧	32
4.2	XRPIX3b-SF-LA で取得した X 線データ一覧	44
4.3	XRPIX3b-CSA-LA で取得した X 線データ一覧	44
5.1	XRPIX2b-PZ で取得した X 線データ一覧	51

第1章 超新星の爆発機構と次世代X線撮像分光器の開発

X線天文学は、宇宙に存在している様々な天体からのX線を観測することで、この広大な宇宙の姿を解明してきた学問である。その歴史は、1962年のBruno RossiとRiccardo GiacconiによるX線観測用ロケットにより、初めて太陽以外のX線天体を発見したことに始まる。これ以降、X線天文学は可視、赤外、電波に並ぶ観測天文学として急激な発展を遂げてきた。1970年に世界初のX線天文衛星Uhuruが打ち上げられて以来、数々のX線天文衛星が打ち上げられた。現在では、長期間のX線観測を可能とするX線天文衛星はX線天文学にとって必要不可欠のものである。今日に至るまでに、ブラックホールといったコンパクト天体や、超新星残骸、銀河間プラズマなど多種多様な天体からX線が放射されていることがわかってきた。

高エネルギー宇宙物理が抱える最大の課題の1つは超新星の爆発機構の解明である。多数のモデルが提唱されている爆発機構を観測的に制限するには、星内部の元素の分布を観測する必要がある。超新星残骸のX線観測はその有効な手法の一つである。これは、超新星爆発後に残る超新星残骸をX線で観測することにより迫ることができる。次節で超新星爆発とその機構解明について述べる。

1.1 超新星の爆発機構とその観測

超新星爆発とは巨大な星が一生を終えるとき起こす大爆発である。その典型的なエネルギーは $\sim 10^{51}$ ergにも達する宇宙最大の高エネルギー現象である。これらの星は核融合を進めながら内部で元素を作る。超新星爆発時にこれらの元素は宇宙空間に飛散し、宇宙の化学進化に大きな影響を及ぼす。

超新星爆発の種類は、爆発の物理機構の観点から、炭素と酸素をコアにもつ白色矮星の核暴走によるIa型と大質量星の重力崩壊で生じる重力崩壊型の二つに分けられる。これらの爆発起源はどちらも未だ解明には至っていない[1, 2]。超新星爆発は星の中心部の状態が鍵となるため、できるだけ星の中心部で何が生じているかを知ることが爆発機構解明につながる。

星内部で生じる元素合成は ${}^4\text{He}$ を基準に進むため、合成される元素は基本的に陽子数と中性子数は同じである。一方で、高温高密度な星の最深部では電子捕獲反応が進むため中性子が生成され、陽子数よりも中性子数の多い中性子過剰な元素が生成される。したがって、中性子過剰な元素は星の最深部の情報をもつ鍵となる元素である[3, 4]。爆発時に生成される元素のうち、陽子中性子同数の安定な元素代表は ${}^{56}\text{Ni}$ (後に ${}^{56}\text{Fe}$ に崩壊)、中性子過剰の代表は ${}^{58}\text{Ni}$ である。そして、それぞれ超新星残骸の熱的プラズマからのFe K輝線

と Ni K 輝線として観測される。この超新星残骸における ^{58}Ni の観測をすることで、超新星爆発の爆発機構に迫る。

1.1.1 Ia 型超新星爆発と ^{58}Ni の観測

Ia 型超新星爆発は炭素と酸素コアの白色矮星の核融合反応によって生じる爆発と考えられている。8 M_{\odot} より質量の小さい星は炭素と酸素コアの質量が炭素燃焼が生じる臨界質量 1.07 M_{\odot} よりも小さい。そのため、炭素燃焼が生じるまで中心温度は上昇せず、やがて自己重力と電子の縮退圧が釣り合った白色矮星となる。伴星からの質量降着などによりチャンドラセカル質量 ($\sim 1.4 M_{\odot}$) に至ると、自己重力が電子の縮退圧を上回る。その結果、白色矮星は収縮し、中心の温度が上昇することで炭素燃焼が爆発的に生じることで、超新星爆発に至る。

爆発機構としては現在、主に 2 種類提唱されている。1 つは、白色矮星に伴星からの質量降着により質量がチャンドラセカル質量 ($\sim 1.4 M_{\odot}$) を超え、超新星爆発に至る Single Degenerate (SD) 説 [5, 6]。もう 1 つは、2 つの白色矮星が合体することにより、爆発に至る Double Degenerate (DD) 説 [7] が提唱されている。しかし、依然として 2 つの爆発機構の論争は続き、いまだに決着は付いていない [1]。



図 1.1: Ia 型の爆発機構イメージ図。(左図) Single Degenerate 説、(右図) Double Degenerate 説。

SD 説と DD 説の決定的な違いは、爆発する白色矮星の中心密度である。Ia 型超新星の標準的な理論によると、伴星からの質量降着によって爆発に至る SD 説の場合、爆発する白色矮星の質量はチャンドラセカル限界に近づくので、爆発直前に極めて高密度のコアが形成される。これにより爆発時に効率的な電子捕獲が起こり、星の中心近くではより中性子過剰な ^{58}Ni が生成される。Ia 型超新星爆発では SD 説、DD 説に限らず ^{56}Ni はおよそ 0.6 M_{\odot} 程度生成されることがわかっており、観測される Fe を基準に考えれば、Ni と Fe の質量比 $M_{\text{Ni}}/M_{\text{Fe}}$ は非常に高い (0.2–0.4) もとなる。一方、白色矮星同士の合体の DD 説によって生じる超新星爆発は、爆発する白色矮星の質量がチャンドラセカル限界よりも十分に低い質量 ($\sim 1 M_{\odot}$) のみ、典型的な可視光観測の特徴 (スペクトルやライ

トカーブ)を再現する [8]。この質量下では白色矮星の中心でも電子捕獲が起こる密度には届かず、超新星の全域においては M_{Ni}/M_{Fe} は 0.1 未満となると考えられている。したがって、SD 説と DD 説はともに、超新星残骸の X 線観測で Ni と Fe の元素組成比を正確に測定することができれば見極めることが可能である。

図 1.2 は現在までに Ni 輝線が観測された Ia 型の超新星残骸の X 線スペクトルを示す [3, 9, 4]。これらはいずれも X 線天文衛星 Suzaku で観測されたものである。それぞれの超新星残骸 Kepler (G4.5+6.8)、Tycho (G120.1+1.4)、3C397 (G41.1-0.3) の X 線スペクトルから求めた M_{Ni}/M_{Fe} 比はそれぞれ ~ 0.025 、 ~ 0.035 、 ~ 0.15 である。Kepler、Tycho に比べ 3C397 は極めて M_{Ni}/M_{Fe} 比が大きく、値としてもこれは爆発する白色矮星がチャンドラセカール質量付近で爆発することを示唆している。しかし、図 1.2 から見ても分かる通り、Ni K 輝線は Fe K 輝線にくらべて 1 桁程度小さい強度であることあるため、誤差が大きいのも事実である。現在までに Ni 輝線が観測された Ia 型の超新星残骸の例はこれら 3 例と非常に少ない。これら Kepler、Tycho、3C397 のいずれも銀河系内で、距離は 10 kpc 以内と近く、明るい超新星残骸なので Ni K 輝線は観測できている。 M_{Ni}/M_{Fe} 比によって SD 説と DD 説を見極めるためには、過去の観測で Ia 型超新星残骸とわかっている天体から新たに Ni K 輝線の観測を試みて、観測事実を増やすことが今後重要になる。

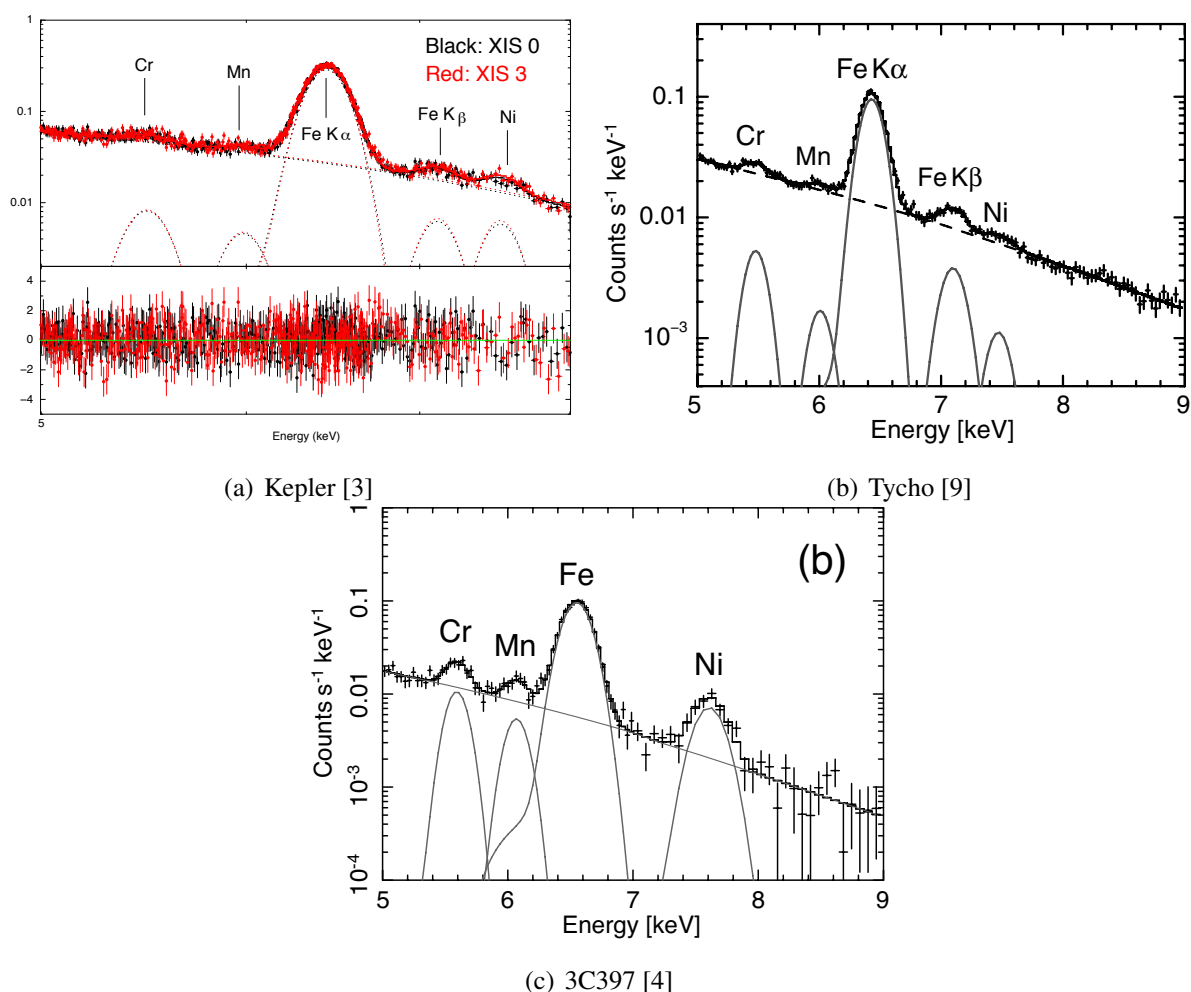


図 1.2: Ia 型の超新星残骸における Ni 輝線の観測例。

1.1.2 重力崩壊型超新星爆発と ^{58}Ni の観測

重力崩壊型超新星爆発は、質量が $8 M_{\odot}$ 以上の大質量星の爆発である。これら的大質量星は進化に伴い核融合反応が進み、星の内部に鉄の中心核を持ち、その周りを順に鉄より軽い元素が占めるたまねぎ状の層構造をなす。鉄が最もエネルギー的に安定なので、核融合によって鉄の核からそれ以上エネルギーは取り出せず、自己重力を支えることができなくなり重力崩壊が生じる。中心部が高密度になると中性子の核を形成するようになり、中性子の縮退圧によって収縮は止まる。その後さらに落ち込んでくる外層が中心核表面で跳ね返され、外側に向かって強い衝撃波を生じ、ついには、外層を吹き飛ばして超新星爆発を起こす。

このような重力崩壊型ではシミュレーションから球対称爆発は絶望視され [10, 11, 12, 13]、ある種の非対称性が爆発に本質的な役割を果たすが詳細は未だにわかっていない。爆発の非対称性について観測的に明らかにするためには、星間空間の環境の影響を受けない、より星の中心で生成された元素の空間構造を観測することが必須である。したがって、Ia 型超新星爆発でも有効であった ^{58}Ni をただ観測するだけでなく、空間分解のよい検出器によって精密撮像することで空間分布を知ることができれば、重力崩壊型超新星爆発の爆発機構に迫ることができる。

重力崩壊型超新星爆発で生成される ^{58}Ni は Ia 型超新星爆発に比べてさらに少ないため観測するのが難しい。したがって、Ni の撮像によって爆発の非対称性に迫った観測は現在までにされていない。一方、別の観測で爆発の非対称性を示唆する超新星残骸がいくつか見つかっている。そのうちの一つに超新星残骸 Cas A (Cassiopeia A) における ^{44}Ti の観測がある [2]。 ^{44}Ti は半減期 60 年と比較的短く、電子捕獲の後 ^{44}Sc を経て安定核の ^{44}Ca に崩壊する。この際に、67.9 keV と 78.4 keV の核 γ 線を放出する。また、 ^{44}Ti が生成される場所は鉄コア付近であるため、 ^{56}Fe 、 ^{44}Ti の空間分布を撮像することで爆発の非対称性に迫ることができる。

X 線望遠鏡 NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) で Cas A を観測し、65–70 keV のエネルギーバンドで ^{44}Ti の空間分布を描いたのが図 1.3 である [2]。この図から ^{44}Ti は空間的に非一様に分布していることが分かる。また、図 1.4 は ^{56}Ni すなわち ^{56}Fe の空間分布と ^{44}Ti の空間分布をを比較したものである。図 1.4 において ^{56}Fe (赤) と ^{44}Ti (青) の分布は著しく異なっている。ここで、Fe は逆行衝撃波によってイオン化されることで初めて X 線観測を行うことができるが、 ^{44}Ti は核 γ 線の観測なので衝撃波に依存しない分布を示す。したがって、 ^{56}Fe と ^{44}Ti で分布に違いが生じる。このように逆行衝撃波が星の中心部に届いていないような若い超新星残骸では ^{44}Ti の分布が爆発機構に迫る有効な手段となる。NuSTAR の観測によると、 ^{56}Fe と ^{44}Ti の分布非対称性から、Cas A の爆発は単純な球対称爆発モデルの予想とは食い違うことが示唆され、著者らは爆発前の親星内部で低モードの対流不安定の成長を示すと主張している [2]。しかし、 ^{44}Ti の半減期は短いためこれらの観測は Cas A のように若い超新星残骸に限られてしまう。一方、超新星残骸の大半は年齢数千から数万年と ^{56}Ni をイオン化する程度に爆発から時が経っているので、 ^{56}Ni を撮像することで系統的に爆発起源に迫ることができる。

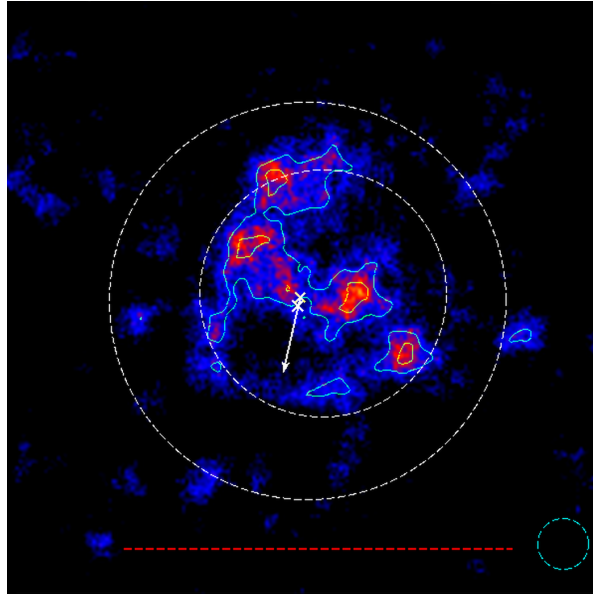


図 1.3: NuSTAR による Cas A の 65–70 keV のエネルギーバンドイメージ [2]。 ^{44}Ti は空間的に非一様に分布していることを示している。白破線の縁はそれぞれ、順行衝撃面 (外側)、逆行衝撃波 (内側) を示す。

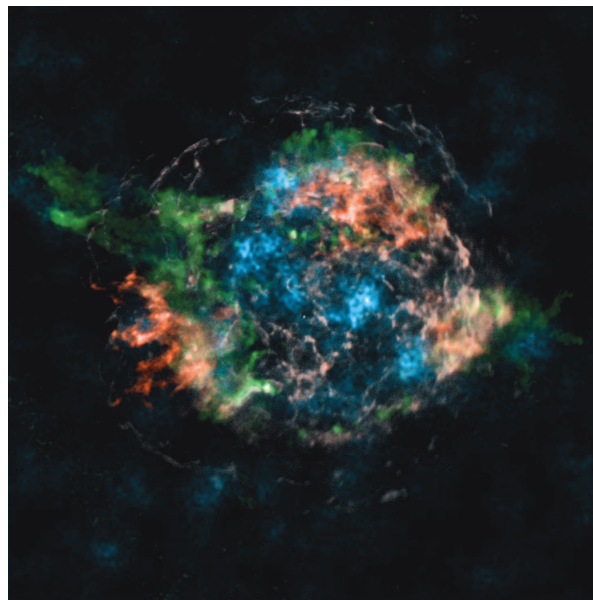


図 1.4: CasA における ^{44}Ti と ^{56}Fe の空間分布比較図 [2]。青色は NuSTAR による 65–70 keV のエネルギーバンドイメージで ^{44}Ti の空間分布を示す。赤色 Chandra による 4–6 keV の X 線バンドイメージで ^{56}Fe の空間分布を示す。両者を比較すると空間構造は著しく異なっている。

1.2 従来の観測の問題と次世代 X 線撮像分光器の開発

1.2.1 従来の観測装置の問題点

現在に至るまで、様々な X 線天文衛星で超新星残骸の観測が行われてきた。しかし、前項で見たように、今までに超新星残骸から Ni K 輝線を観測した例は非常に少数である。したがって過去の検出器の問題点をフィードバックすることで、我々は、Fe K 輝線とさらに強度が一桁小さい Ni K 輝線を分光し、超新星残骸におけるこれらの元素の空間構造を精密に撮像することを目指す。現代の X 線天文衛星に搭載されている主な検出器である X 線 CCD (Charge-coupled device) [15] は優れた分光能力 (140eV FWHM @6 keV) をもち、空間分解能秒角を実現するピクセルサイズ (24 μm) を実現している優れた X 線撮像分光器である。Suzaku 衛星、Chandra、XMM-Newton、さらには Hitomi 衛星など世界中の基幹 X 線衛星に主力観測装置として搭載された実績がある。しかし、X 線 CCD は衛星軌道上の宇宙線が起源である非 X 線バックグラウンド (NXB: Non X-ray background)[14] がとても高いため、10 keV 以上の観測は困難であり、Fe K 輝線周辺のエネルギーバンド (6.4 - 8.1 keV) でも S/N が悪く、観測対象が明るい天体に限られている (図 1.5)。1.1 節でみたように、Fe K 輝線よりも一桁程度小さい強度の Ni K 輝線を観測した例が極端に少ないのはそのためである。よって、超新星残骸における ^{58}Ni を観測するためには、より NXB を小さく抑えなければならない。検出器周辺を物理的にシールドで囲み、検出器に入射する宇宙線を止めることは可能であるが、現実的ではない厚みのシールドが必要となり、衛星搭載は困難である。したがって、効率良く NXB を除去できる検出器の開発が必要である。また、精密撮像を行うためには、NXB を押さえるのと同時に高い空間分解能が要求される。これらは主に X 線望遠鏡と検出器の画素サイズに依存して決まる。現行の Chandra は空間分解能が 0.5 秒角、XMM-Newton は 12 秒角と非常に優れた空間分解能であったが、低い NXB を同時に満たすことができていないため Ni の精密撮像を行うことができていない。以上から、NXB を効率良く抑えることのできる検出器を開発し、高空間分解能の X 線望遠鏡を積んだ衛星に搭載することによって、我々の目的を達成することが初めて可能となる。

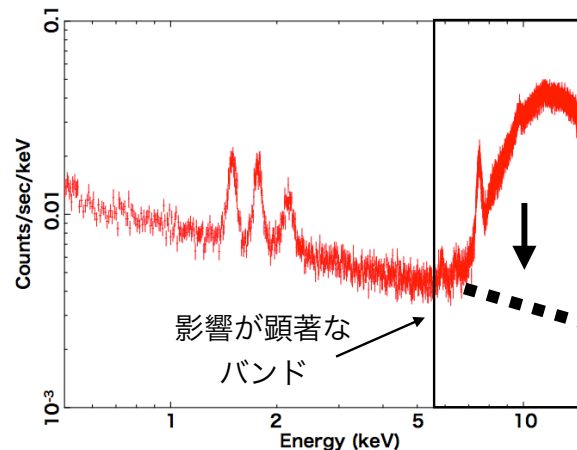


図 1.5: すざく衛星搭載の X 線 CCD で取得した NXB のスペクトル。

1.2.2 次世代 X 線撮像分光機の開発

Fe K 輝線と Ni K 輝線の精密撮像分光による超新星の爆発機構に迫る計画に、次世代 X 線天文衛星「FORCE」がある。これは 10 秒角の優れた空間分解能と前項の問題を解決する検出器を搭載することで、我々の目的達成を可能とする計画である。我々は「FORCE」に搭載する検出器の開発を開始した。搭載する検出器は、前項の問題点も踏まえ、NXB を抑えることだけではなく、輝線中心を決める優れたエネルギー分解能が必要がある。また、超新星残骸は熱的・非熱的な電子によってそれぞれ X 線が放射されるため、観測で得られるスペクトルはこれら二つの成分が混ざった状態で広帯域に渡って得られる。元素含有量はこれらの成分を正確に分離できるかに依存して大きく変化する。これらを分離するために広帯域観測 (0.5–40 keV) が必要である。以上より、検出器に要求される性能は、優れたエネルギー分解能、低い NXB、広帯域撮像 (0.5–40 keV) である。

NXB は検出器の時間分解能を改善することで解決することができる。まず検出器周囲をアクティブシールドで囲う。NXB はエネルギーが高く、検出器とアクティブシールドを突き抜けるため、検出器とアクティブシールドがほぼ同時に反応する。従って、これらの反同時計数をとることができれば NXB を大幅に抑えることが可能となり、図 1.5 の黒破線のように NXB が下がることが期待される。NXB のアクティブシールドへの入射頻度は ~ 1 kHz 程度であるため、アクティブシールドと検出器間で反同時計数をとるには少なくとも 1 msec より良い時間分解能である検出器が必要である。しかし、X 線 CCD は電荷を転送し読み出すという性質上、全ピクセルを読み出すのに時間を要するため時間分解能が数秒程度と不十分である。したがって反同時計数を用いることができなかった。これを可能とするのが CMOS センサーである。CMOS センサーは X 線 CCD とは違い、CMOS LSI プロセスによって製造されるため、各ピクセルに読み出し回路とトリガー機能を持った回路を同時に搭載することができる。これにより、ピクセルから出力されるトリガー情報を読み出すことで、時間分解能が $\sim 10 \mu\text{sec}$ となり X 線 CCD から飛躍的に向上させることが可能となる。通常の CMOS センサーの検出部は薄い空乏層であるため、X 線を観測するためには適さない。よって、我々は SOI 技術を用いて、高速の読み出し回路と厚い空乏層を同時に満たす X 線 SOI ピクセル検出器の開発を開始した。この X 線 SOI ピクセル検出器において、高エネルギー X 線感度は空乏層厚に依存するが、低エネルギー X 線は光子の入射面構造に依存する。よって、私は目標とする 0.5 keV の感度を実現するため、裏面照射型 X 線 SOI ピクセル検出器の開発を推進した。なお本論文は、M. Itou et al., NIM A 831 (2016) 55. に記載された内容を含む。

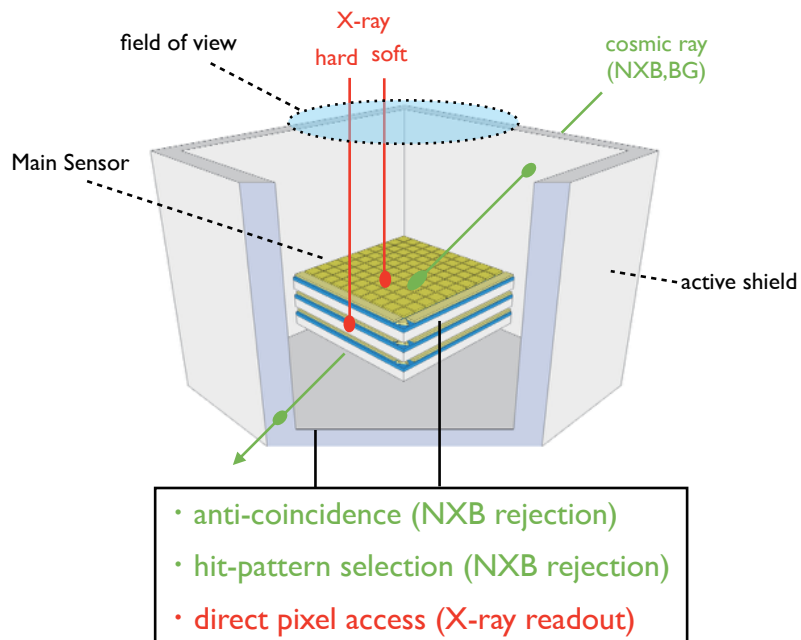


図 1.6: 反同時計数法による NXB の除去の概念図。

第2章 X線天文用SOIピクセル検出器

2.1 SOIピクセル検出器の構造

SOIとはシリコンウェハの上に薄いSiO₂の絶縁層 (BOX 層) を形成し、その上に別のシリコン薄膜 (SOI 層) を形成する技術である。この技術を用いることで、高抵抗率なシリコンのセンサー部と低抵抗率なCMOS回路部といった抵抗率の異なる二種類のウェハを一枚のウェハに実現することができる。SOIピクセル検出器はSiO₂層を挟んで低抵抗率シリコンの回路層と高抵抗率シリコンのセンサー層の3層構造を持ち、検出部・読み出し回路一体化している [16]。その模式図を図 2.1 に示す。SOIピクセル検出器は、センサー裏面に電圧 (バックバイアス電圧) をかけ厚い空乏層を得ることで広いエネルギー帯域のX線を検出し、高速のCMOS回路による高度な信号処理を行うことを可能とする。

以下では、SOIピクセル検出器を理解する上で重要となる、p型・n型半導体、pn接合と空乏層について説明する。

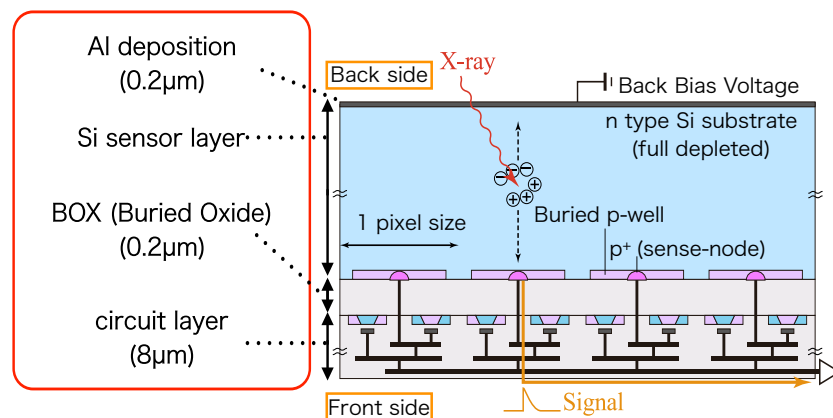


図 2.1: SOIピクセル検出器の構造図。

2.1.1 p型・n型半導体

固体物質は電気の通しやすさを示す電気伝導度 σ [$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$] によって絶縁体、半導体、導体の三つに大きく分けられる。これらの物質は、分けることができる。 $(\sigma$ の逆数は抵抗率: $\rho = 1/\sigma$ [$\Omega\cdot\text{cm}$])。典型的には、 $\sigma = 10^{-18} - 10^{-8}$ の物質を絶縁体、 $\sigma = 10^4 - 10^6$ の物質を導体と呼び、これらの中間の物質を半導体と呼ぶ [17]。代表的な半導体としては Si、Ge、GaAs などが挙げられるが、以下では Si 半導体について述べる。

純粋な真性半導体は電気伝導性が低く、用途が限定されている。この半導体結晶に不純物を付加することで、電気伝導性を上げることができる。シリコン結晶に3価、5価の元素を不純物を付加することで作られるのがp型半導体及びn型半導体である。例として、3価の元素(アクセプター)であるホウ素を4価の元素であるシリコンに付加すると、図2.2のように結晶内の共有結合で使用される電子が一つ足りなくなる。この電子の空席(正孔)が電流の担い手(キャリア)として振る舞う。これがp型半導体である。一方、図2.2のようにシリコン結晶に5価の元素(ドナー)を付加すると、電子が一つ余り、この余った電子がキャリアの役割を担う。これがn型半導体である。

以上のように、不純物の原子一つにつき、キャリアが一つ増えるので、不純物原子の添加量を調節することで電気伝導性を変化させることができる。

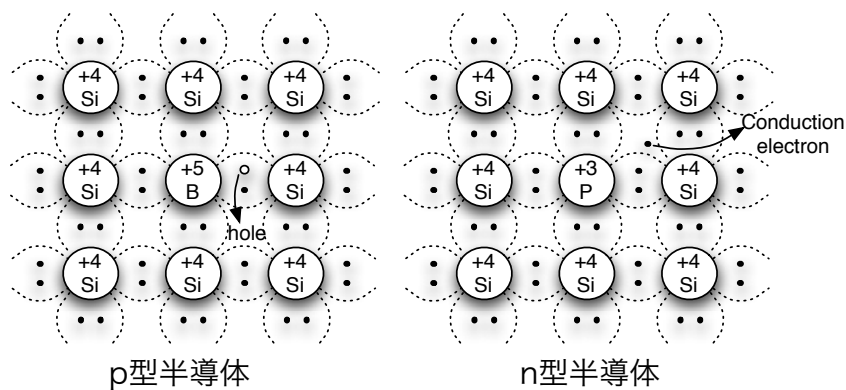


図 2.2: p 型半導体と n 型半導体の模式図。

2.1.2 pn 接合と空乏層

p 型半導体と n 型半導体を接合させた pn 接合を考える。図 2.3 はその概念図である。p 型側では正孔の、n 型側では電子の濃度が高いため、接合面を通じてそれぞれのキャリアが反対側に拡散する。すると、p 型ではアクセプターイオンが、n 型ではドナーイオンが取り残されることで、pn 接合間に電位差が生じる。この電位差によって、拡散とは逆方向にドリフト電流が発生し、最終的に拡散とドリフトが釣り合った平衡状態に至る。この際、接合面付近にはキャリア密度が非常に低い空乏層が形成される。拡散とドリフトの平衡状態のときに生じる pn 接合間の電位差を内蔵電位 (V_{bi}) と呼ぶ。シリコンでは内蔵電位は約 0.6 V 程度である。

平衡状態の pn 接合に、よりキャリアの拡散が進む方向、つまり n 型の電位が高くなるように外部電圧(逆バイアス電圧)を印加すると、pn 接合間の電位勾配がさらにきつくなり、空乏層が広がる。逆バイアスを V 、アクセプターイオン、ドナーイオンの濃度をそれぞれ N_A 、 N_D とかくと、p 型、n 型半導体中の空乏層厚 x_p 、 x_n はそれぞれ、

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_{bi})}{eN_A(1 + N_A/N_D)}}, \quad x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_{bi})}{eN_D(1 + N_D/N_A)}} \quad (2.1)$$

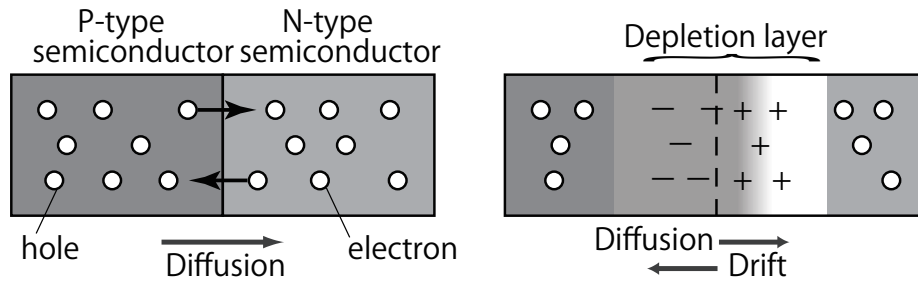


図 2.3: pn 接合と空乏層の形成。

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_{bi})}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (2.2)$$

と書ける。 ϵ は半導体の誘電率 (シリコンでは 1.04×10^{-12} F/cm)、 W_{dep} は全空乏層厚である。例えば、 $N_A \gg N_D$ のようにアクセプター濃度とドナー濃度が激しく異なった pn 接合を考える。この時、全空乏層厚 W_{dep} は、

$$W_{dep} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_{bi})}{eN_D}} \quad (2.3)$$

と書き表すことができる。さらに n 型半導体の抵抗率 ρ は

$$\rho = \frac{1}{\mu_e N_D} \quad (2.4)$$

であるので、抵抗率 ρ を用いると W_{dep} は

$$W_{dep} = \sqrt{2\epsilon\mu_e\rho(V + V_{bi})} \quad (2.5)$$

となる。ただし μ_e は電子の移動度である。空乏層は逆バイアス電圧及び抵抗率の平方根に比例することが分かる。よって、同じ逆バイアス電圧でより厚い空乏層を得るためには、抵抗率が大きいものが必要である。

2.2 X線とSOIピクセル検出器の相互作用

X線と物質の相互作用は大きく3つに分けられる。以下で各反応過程の詳細を述べるとともに、光電吸収の項目ではSOIピクセル検出器におけるX線との相互作用について説明する。

光電吸収

入射 X 線が軌道電子に吸収されることでエネルギーを与え、軌道電子は電離し、光子自体は消滅する。このとき、電離によって発生した自由電子は、

$$E_e = E - E_b \quad (2.6)$$

のエネルギーを得る。ただし、 E は入射光子のエネルギー、 E_b は電子が元いた軌道における束縛エネルギーである。

電子が弾き飛ばされて空いた準位には一つ上の順位から別の電子が落ち込むことで埋められる。その際に、落ち込んだ準位差に応じた特性 X 線または外殻電子 (オージェ電子) が放出される。特性 X 線とオージェ電子のどちらが放出されるかは競合過程であり、ある確率 (蛍光収率) で特性 X 線として放出する。また、光電吸収の反応断面積は、入射光子のエネルギー E の ~ -3.5 乗、原子番号 Z の $4-5$ 乗に比例する。

SOI ピクセル検出器においては、センサー部における空乏層が有感部となる。まず、空乏層に入射した X 線は、光電効果により Si 原子の内殻電子を叩き出す。この電子によって周囲の電子が電離し、電子・正孔対を作る。Si の蛍光収率は 5 % 程度と小さいので、ほとんどの場合、内殻電子の束縛エネルギー分のエネルギーを持つオージェ電子を放出し、さらに電子・正孔対を作る。このようにしてできる電子・正孔対は入射エネルギーに比例した個数だけ生成される。エネルギー E の X 線が入射したとすると、平均電離エネルギー W (シリコンは 3.65 eV) を用いて、生成される対の個数は E/W 個となる。

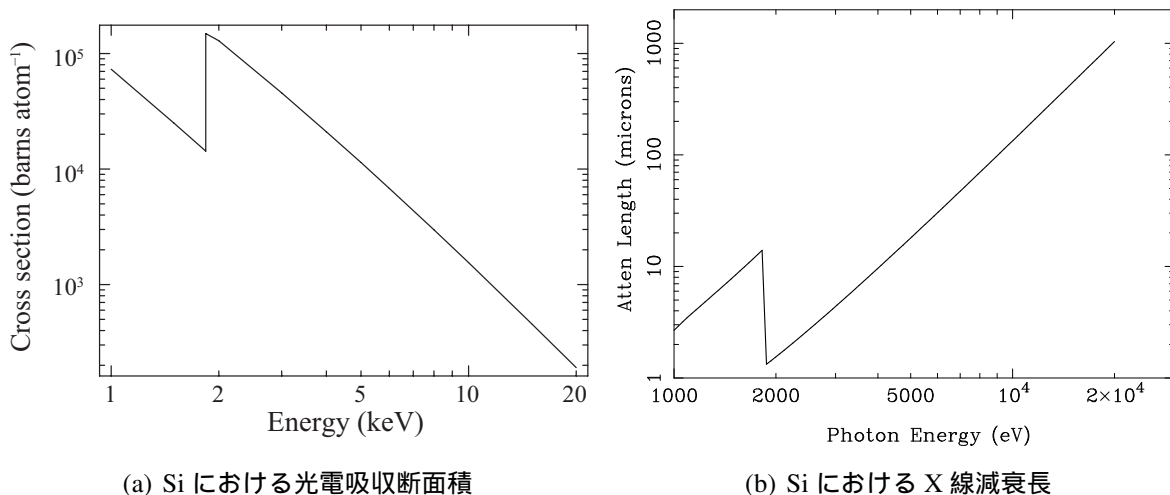


図 2.4: Si と X 線の相互作用。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は、X 線光子と電子との非弾性散乱である。入射光子のエネルギーを E として、光子が θ 方向に散乱されたとする。散乱後の光子のエネルギー E' とすれば、

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.7)$$

ここで、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。散乱断面積は物質中の電子の個数に比例するので、 Z が大きくなると比例して増加する。

電子対生成

電子対生成はクーロン場の中で $E > 2m_e c^2$ の高エネルギー入射光子が消滅し、電子・陽電子の対を生成する。入射光子のエネルギーから $2m_e c^2$ を引いたものが、電子と陽電子の運動エネルギーとして分配される。また、陽電子は周囲の物質と対消滅を起こしてしまうので、2次的に2個の消滅光子が生成される。反応断面積は Z^2 に比例する。

以上3つの相互作用の断面積は相互作用する物質の原子番号 (Z) と入射 X 線エネルギー (E) に応じて変化する。図 2.5 にその依存性を示す。左右2本の実線より外側ではそれぞれ、光電吸収、対生成が優位であり、その中間のエネルギー帯域はおもにコンプトン散乱が効く。 $Z = 14$ の Si の場合、 ~ 20 keV までは光電吸収が支配的である。

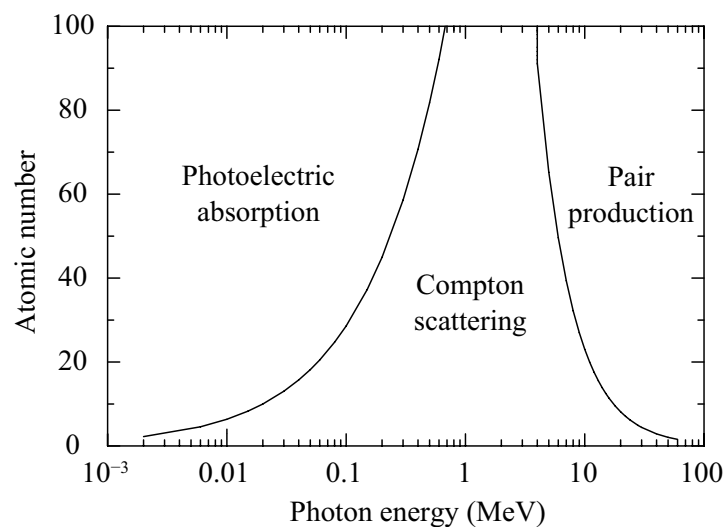


図 2.5: 入射 X 線エネルギー・物質の種類に応じて支配的となる相互作用。左右の実線はそれぞれ全断面積のうち光電吸収および対生成の割合が半分を占める領域を示している

2.3 表面照射型、裏面照射型について

SOI ピクセル検出器の断面図を図 2.1 に示す。電極側に対し、表面または裏面どちらから X 線を照射させるかによって特性が異なる。

2.3.1 表面照射型 (Front-illuminated: FI)

表面照射型は回路層側 (表面) から X 線を照射する方式をとる。FI SOI ピクセル検出器においては回路層 ($\sim 8 \mu\text{m}$) で吸収された X 線は検出されないため、軟 X 線に対する感度は低下する。

2.3.2 裏面照射型 (Back-illuminated: BI)

裏面照射型はセンサー層側 (裏面) から、X 線を照射する方式をとる。BI SOI ピクセル検出器は入射面に回路層がないため、FI SOI ピクセル検出器より軟 X 線感度は高くなる。さらに軟 X 線の感度を向上させるためには、完全空乏かつ薄い不感層の検出器である必要がある。入射面である裏面構造はプロセスにおける裏面処理に依存し、薄い不感層となるような裏面処理を施さなければならない。

2.4 電荷収集

2.2 節で説明したように、X 線が空乏層で吸収されると電子・正孔対を生成する。N 型半導体の場合、センサー層にかけられた正の電圧でできた電場によって生成された正孔雲はセンスノードの方向にドリフト運動しながら、自らの熱運動によっても拡散する。以下では、それぞれの運動について述べる。

まず、センサー部における電場を求める。検出器表面から裏面方向に z 軸をとり、BOX 層とセンサー層の境界を $z = 0$ にとるものとする。今、センスノードは 0 V 、バックバイアスは V を印加しているものとする。空乏層が z_d 広がっているとすると、空乏層表面には、

$$Q_s = +eN_D z_d \quad (2.8)$$

という電荷が誘起する。ただし、 N_D はドナー濃度、 e は電気素量である。この時、 z 軸正の方向に電位 $\phi(z)$ が発生する。この $\phi(z)$ は Si の誘電率 ϵ とすれば、Poisson 方程式、

$$\frac{\partial^2(\epsilon\phi(z))}{\partial x^2} = -eN_D \quad (2.9)$$

を満たす。境界条件として $z = z_d$ で電場が 0 になることと、 $z = 0$ での電位を 0 を課すと、電位 $\phi(z)$ と電場 $E(z)$ は

$$\phi(z) = -\frac{eN_D}{2\epsilon} z(z - 2z_d) \quad (2.10)$$

ドリフト

$$E(z) = \frac{eN_D}{\epsilon} (z_d - z) \quad (2.11)$$

と書き表せる。 $\phi(z_d)$ はバックバイアス V で表せるので、空乏層厚 z_d は、

$$z_d = \sqrt{\frac{2\epsilon V}{eN_D}} \quad (2.12)$$

と表すことが出来る。

この時、正孔雲は電場 $E(z)$ に沿ってドリフトする。正孔の移動度を μ_p とするとドリフト速度 v は電場 $E(z)$ を用いて式 (2.13) と表せる。

$$v = \mu_p E(z) \quad (2.13)$$

したがって、X線が z で光電吸収された時、正孔雲がセンスノードまでドリフトする時間 t は、

$$t = \frac{\epsilon}{\mu_p e N_D} \ln \frac{z_d}{z_d - z} \quad (2.14)$$

熱拡散

空乏層内で正孔雲の発生によって、局所的にキャリアが過剰になるため、周囲との濃度差を緩和するために正孔雲は熱運動によって拡散する。この過程は拡散方程式に従うので、正孔雲の密度を ρ_p とすると、

$$\frac{d\rho_p}{dt} = D\Delta\rho_p \quad (2.15)$$

と書ける。ここで、 D は拡散係数である。ここでボルツマン定数を k_B とするとアインシュタインの関係より、式 (2.16) と表せる。

$$D = \frac{k_B T}{e} \mu_p \quad (2.16)$$

したがって、 z 軸に垂直な面での拡散は式 (2.15) を解いて、

$$\rho_p = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (2.17)$$

というガウス分布となる。 r は、 z 軸に垂直な面内の電荷を中心とする動径方向の距離を表す。以上より、センスノードに到達する時の正孔雲の広がり σ は、

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D \frac{\epsilon}{\mu_p e N_D} \ln \frac{z_d}{z_d - z}} \quad (2.18)$$

となる。また式 (2.16) を用いて、式 (2.19) は

$$\sigma = z_d \sqrt{\frac{k_B T \epsilon}{eV} \ln \frac{z_d}{z_d - z}} \quad (2.19)$$

と表せる。

バックバイアス電圧を十分かけ完全空乏化しているときを考える。この時、空乏層厚はセンサー層厚 W 程度まで広がっている。式 (2.9) に境界条件として、 $z = 0$ で電位が 0 か

つ $z = W$ で電位は V であるという条件を課す。以上と同様に、Poisson 方程式を解き、正孔雲の広がり σ をもとめると、

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\epsilon k_B T}{e^2 N_D} \ln \frac{\frac{1}{2}W + \frac{\epsilon V}{e N_D W}}{\frac{1}{2}W + \frac{\epsilon V}{e N_D W} - z}} \quad (2.20)$$

と書ける。

正孔雲の平均的な大きさ

式 (2.19) と式 (2.20) はともにある場所 z で X 線が吸収された時の正孔雲の大きさを示す。しかし、X 線が吸収されるのは確率過程なので、あるエネルギーの X 線における正孔雲の大きさを議論する際、様々な深さで光電吸収されて生じた正孔雲の平均的な大きさがよい指標となる。裏面から入射する X 線に対して考える。減衰長が α 、センサー層厚が W のとき、 z から $z + dz$ に間で吸収される確率 $P(z)$ は

$$P(z) = \frac{\exp(-\frac{W-z}{\alpha})}{\alpha} dz \quad (2.21)$$

と表せる。したがって、正孔雲の平均的な大きさ r_α は、

$$r_\alpha = \frac{\int_0^{W_{dep}} \sigma \times P(z) dz}{\int_0^{W_{dep}} P(z) dz} = \frac{\int_0^{W_{dep}} \sigma \times \exp(-\frac{W-z}{\alpha}) dz}{\int_0^{W_{dep}} \exp(-\frac{W-z}{\alpha}) dz} \quad (2.22)$$

と表すことができる。ただし、 W_{dep} は空乏層厚、 σ はある z で吸収されたときの正孔雲の大きさである。

2.5 SOIピクセル検出器の性能指標

SOIピクセル検出器の性能指標としてゲイン、エネルギー分解能、検出効率がある。これらは検出した X 線のエネルギーの決定や入射 X 線に対しどれだけを読み出すことができるかを示す指標であり、検出器開発において性能を直に示すので重要である。

2.5.1 ゲイン

入射 X 線のエネルギーと波高値との関係を示すものである。近似的には一次関数で表現できる。また、SOIピクセル検出器におけるピクセル間ゲインのばらつきは 1% 程度見られる [?]。ばらつきを含めたゲインを精度良く見積もることが入射 X 線エネルギーの決定において重要である。センサー部からの信号経路には電極や読み出し回路、出力アンプなどが存在し、出力ゲインは場所ごとの増幅率のかけ合わせで決まる。センサーにおける変換ゲインは電極における寄生容量によって決まる。本研究ではゲインを、X 線が作用して生成した電子 1 つあたりどれだけの電圧値に変換されたかを示すものとして定義する。

2.5.2 エネルギー分解能と読み出しノイズ

2.2 節で述べたように、電子・正孔対は入射 X 線のエネルギーに比例した量生成する。つまり、X 線を測定した際にできる輝線の広がり、生成されるキャリアの統計的な揺らぎによって生じる。キャリアの数の統計的ゆらぎはポアソン分布と比べて有意に小さいことが知られており、ポアソン分布からのずれは物質に固有のファノ因子 F で表される。シリコンではファノ因子は ~ 0.1 程度である。また、実際には、輝線の広がり、読み出す回路の電子ノイズ $\sigma_R[e^-]$ にも依存する。したがって、実質的な標準偏差 σ は

$$\sigma = \sqrt{F \frac{E}{W} + \sigma_R^2} \quad (2.23)$$

と表すことができる。これより、輝線の広がり (ΔE) を半値全幅 (Full Width at Half Maximum: FWHM) で評価すれば、

$$\Delta E = 2 \sqrt{2 \ln 2} W \sqrt{F \frac{E}{W} + \sigma_R^2} \quad (2.24)$$

となる。冷却環境や読み出し回路を工夫することより σ_R は数 e^- 抑えられ、分解能は向上する。

2.5.3 検出効率

検出効率とは、SOI ピクセル検出器に入射してきた X 線のうち、X 線として検出することができた割合を示す。各エネルギーにおける検出効率は、低エネルギー X 線においては空乏層に入射するまでの不感層厚に、高エネルギー X 線は空乏層厚に依存する。空乏層に入射した X 線が漏れなく X 線イベントとして読み出せたとすれば、理想的な検出効率 Q [%] は、

$$Q(E) = \exp\left(-\int \frac{1}{\mu(E, l)} dl\right) \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{W_{dep}}{\mu_{Si}(E)}\right)\right\} \quad (2.25)$$

と表せる。ここで、 μ は空乏層に至るまでの不感層における減衰長、 l は空乏層に至るまでに光子がたどった軌跡に沿った長さ、 μ_{Si} は空乏層 (Si) における減衰長、 W_{dep} は空乏層厚である。

第3章 多色蛍光X線校正システム

我々は様々なX線に対する裏面照射型SOIピクセル検出器の性能を測定するため、多色蛍光X線校正システムを使用して評価を行った。ここでは、実験のセットアップと照射するX線の絶対強度の測定結果を示す。

3.1 実験セットアップ

多色蛍光X線校正システムの模式図は図3.1に示す。多色蛍光X線発生部(真空槽1)とSOIピクセル検出器測定部(真空槽2)の二つから構成されており、連結して評価システムとしている。以下、多色蛍光X線発生部(真空槽1)とSOIピクセル検出器測定部(真空槽2)に分けて実験セットアップを説明する。

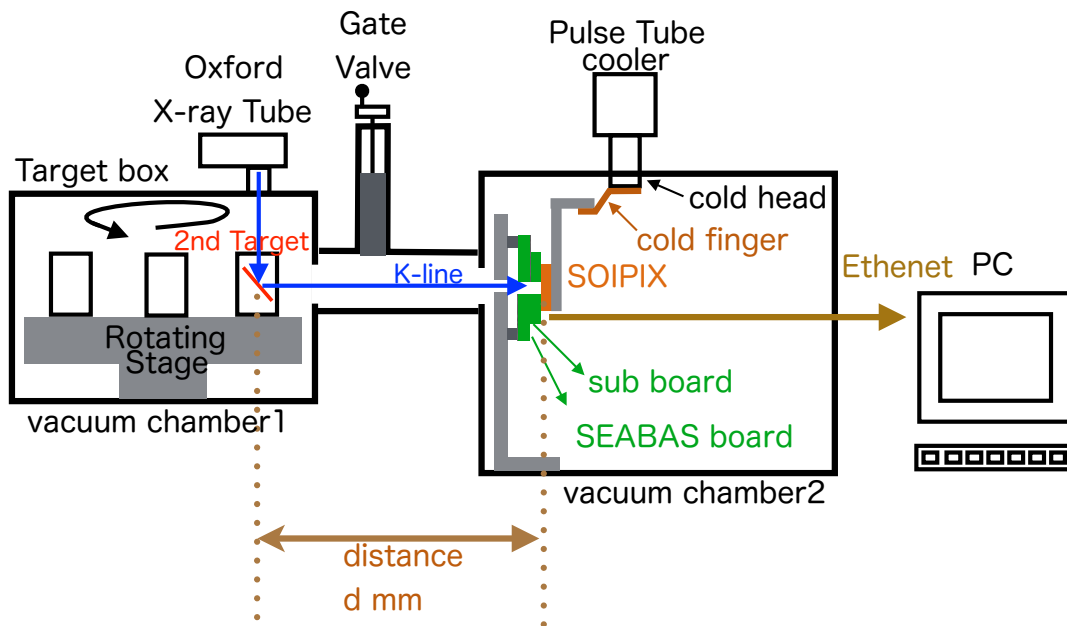


図 3.1: 多色 X 線校正システムの模式図。X 線二次ターゲットから SOI ピクセル検出器までの距離 d は 509 mm、絶対強度測定用の Silicon Drift Detector (3.2 節) までは 475 mm である。

3.1.1 多色 X 線発生部

多色 X 線発生部には、X 線線発生装置 (Oxford 5000 シリーズ) と 8 つの 2 次 X 線ターゲットが備え付けてある。真空槽 1 は大阪真空機器製作所 (株) に発注したものである。この真空槽には、ドライ真空ポンプ (アネスト岩田製) とターボ分子ポンプ (大阪真空機器製作所製) が接続されており (図 3.2)、 -50 の飽和水蒸気圧 4.5×10^{-2} Torr を十分下回る $\sim 10^{-5}$ Torr 程度の真空度で試験を行える環境である。この多色蛍光 X 線発生部は Suzaku 衛星に搭載された CCD カメラである X-ray Imaging Spectrometer (XIS) の評価システムとして開発され、実際に使用されていた実績があるシステムである [18]。X 線発生装置からの連続 X 線を 2 次 X 線ターゲットに照射することで蛍光 X 線を取り出すものである。蛍光 X 線の絶対強度を真空槽 2 に設置した検出器で測定した。その詳細は 3.2 節で示す。

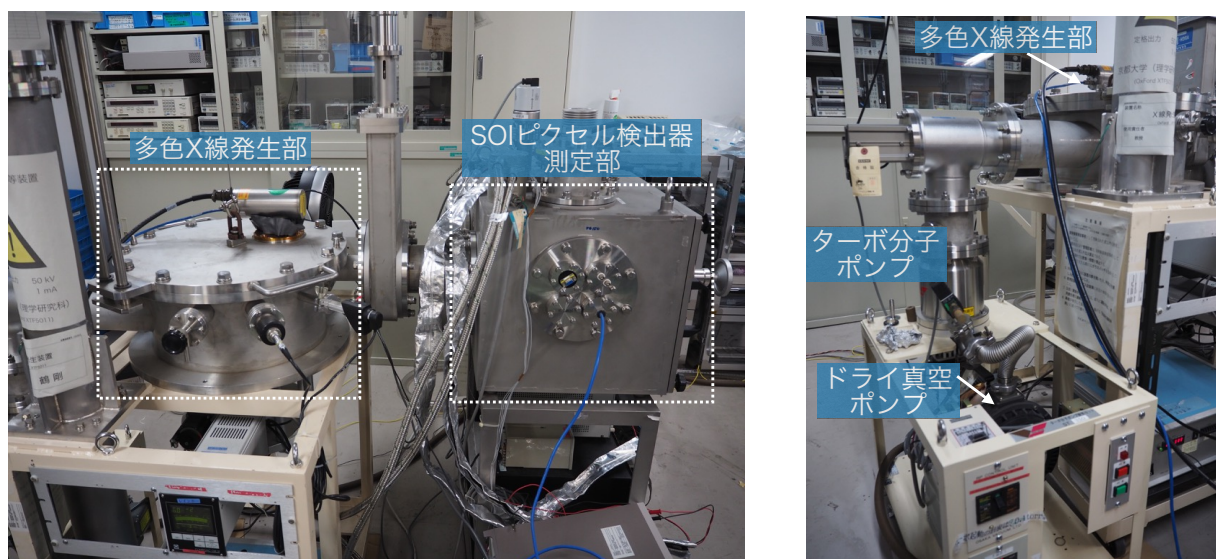


図 3.2: 多色蛍光 X 線発生部 (真空層 1) と SOI ピクセル検出器測定部 (真空層 2) の写真 (左)。真空層 1 における真空系 (右)。

3.1.2 SOI ピクセル検出器測定部

SOI ピクセル検出器測定部では、図 3.1 で示したように、多色 X 線発生部で得られた蛍光 X 線を真空槽 2 内部に設置した SOI ピクセル検出器で測定することが可能である。また、真空槽 2 の外部から電源や温度計、冷却器を接続して素子の評価を行った (図 3.3)。ここでは SOI ピクセル検出部における、電源系、真空冷却系、データ取得システムについて説明する。

電源系

SOI ピクセル検出器の回路への電源供給には KENWOOD PWR18-1 トランジスタ電源を用いた。また、素子へのバックバイアス電圧用として、KEITHLEY2410 ソースメータ

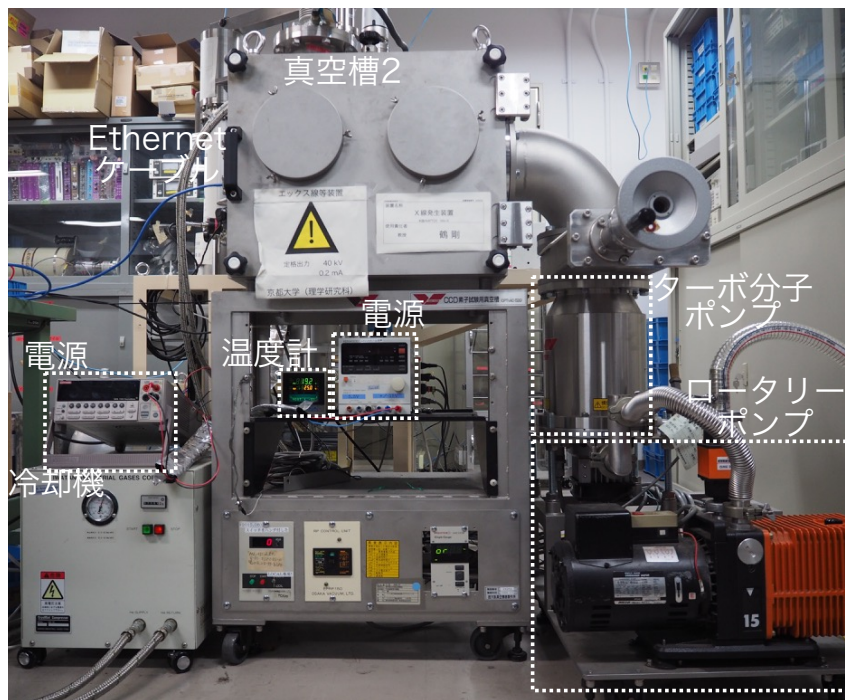


図 3.3: SOI ピクセル検出器測定部 (真空槽 2) の写真。

を用いた。このソースメータは、素子に流れる電流を 0.01 nA の精度で計測することが可能である。

真空冷却系

真空槽 2 は真空槽 1 同様、大阪真空機器製作所 (株) に発注したものである。ロータリーポンプ (アルカテル社製) とターボ分子ポンプ (大阪真空機器製作所社製) を接続し、真空槽 1 同様、 -50 の飽和蒸気圧 4.5×10^{-2} Torr を十分に下回る真空度で行う。冷却には岩谷瓦斯のクライオミニ (コンプレッサー: CA201、コールドヘッド: P301) を使い、コールドヘッドの先に、素子を冷却するためのコールドプレートを接続する。コールドプレートは厚み 5 mm の銅で作製し、熱電対を取り付け温度計と接続した (図 3.4)。コールドプレートの密着度を高くするために、素子とコールドプレート間とコールドプレートとコールドヘッド間に薄いインジウム板を挟んでいる。コールドプレートからコールドヘッド間のパスとしてアルミ板を加工し編組線と組み合わせたものを作製し、できるだけコールドプレートとの接触面積を大きくして熱伝導をよくした。また、そのパスにルミ蒸着フィルムとプラスチック製メッシュを交互に 10 層ほど積層した Multi Layer Insulator (MLI) を巻きつけることで断熱状態を保つようにした。この結果、素子は -50 程度に保ちながら試験を行うことができた。

データ取得システム

SOI ピクセル検出器の動作の制御と外部へのデータの出力を行うために読み出しボードを用いている (図 3.5)。読み出しボードは、素子に依らない共通のメインボードである

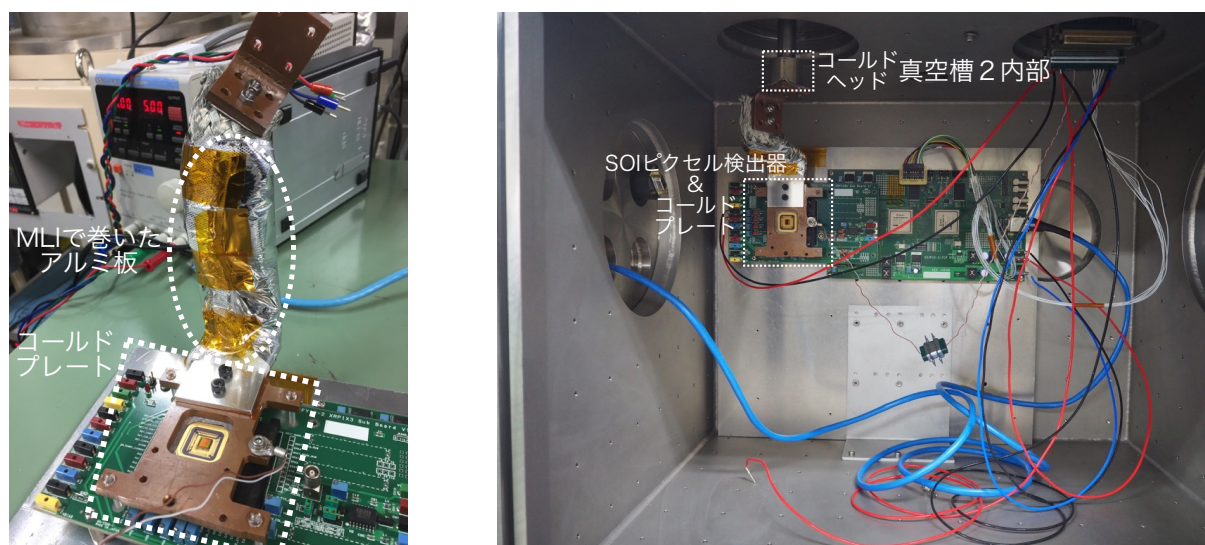


図 3.4: 素子に取り付けたコールドプレート (左) と真空槽 2 への設置写真 (右)。

SEABAS (Soi EvAluation BoArD with Sitcp) [19] と素子によって異なる SUB ボードの二つから成る。SEABAS ボードには、素子制御用の User FPGA とネットワークでのデータ転送用の SiTCP FPGA の二つが搭載されている。使用する素子に合わせてユーザーが User FPGA でデジタル回路を組み変えることで素子の制御を行う。SiTCP FPGA は User FPGA から出される出力信号をイーサネット転送できる形式に変換するものである。読み出しボードと計算機をイーサネットケーブルで接続することで、簡単にデータ取得を行うことができる。SEABAS ボードには ADC と DAC が搭載されていて、各信号の AD (DA) 変換を行うことができる。ADC の分解能は $1\text{ V}/12\text{ bit}$ であり、 1 ADU (Analog-to-Digital Unit) の幅は $244\ \mu\text{V}$ である。また DAC の分解能は $3.3\text{ V}/12\text{ bit}$ である。素子から得られるデータは計算機に転送され取得することができる。計算機上では DAQ (Data Acquisition system) ソフトウェアを使用し、データを取得する。DAQ ソフトウェアは ROOT ライブラリ (C++) を用いて開発されたもので、素子の露光時間、取得フレーム数などの制御信号を計算機上から読み出しボードに送ると同時に転送されてくるデータをファイルに保存する役割を担う。

3.2 X線絶対強度測定

SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価を行うにあたって、試験前に照射する X 線を SOI ピクセル検出器とは別の検出器 Silicon Drift Detector (SDD) を用いて測定した。SOI ピクセル検出器は小さな半導体検出器を複数格子状に並べた検出器であるが、SDD は単独の半導体検出器である。今回の試験に用いた Amptek 社製 XR-100SDD の仕様は表 3.1 に示す。SDD は各 X 線のエネルギーに対する検出効率が分かっているため、入射する X 線の絶対強度を測定することができる。本研究では、2 次 X 線ターゲットとして Al (1.4 keV)、Cl (2.6 keV)、Ti (4.5 keV)、Fe (6.5 keV)、Se (11.2 keV) を用いた。また、測定に使用する二次 X 線は多色 X 線発生部に設置してある X 線発生装置からの一次 X 線によって変わる。



図 3.5: SOI ピクセル検出器のデータ読み出しボード。

一次 X 線は X 線発生装置の X 線管に印加する高電圧とフィラメント電流値 (熱電子の数) で制御が可能である。従って、X 線発生装置駆動の際の電圧値とフィラメント電流値とともに、SDD で測定したデータを表 3.2 にまとめた。SDD で得られた各 X 線のスペクトルは図 3.6 に示す。各輝線に対してガウシアンでフィットして強度を求めた。

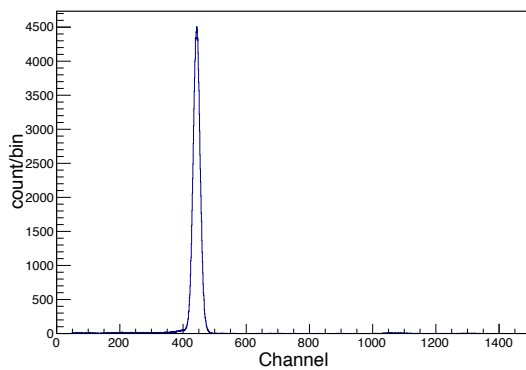
表 3.1: XR-100SDD の仕様。

有効面積	25 mm ²
空乏層厚	500 μm
エネルギー分解能	125 eV @ 5.9 keV

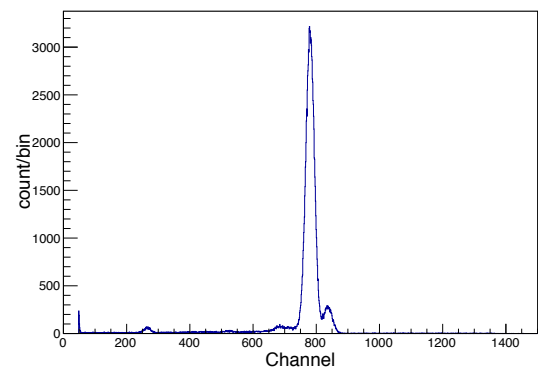
表 3.2: SDD で測定したデータ一覧。

ターゲット	電圧値 [kV]	電流値 [mA]	測定時間 [分]
Al	5.0	0.30	10
Cl	5.0	0.30	40
Ti	8.0	0.30	95
Fe	10.0	0.36	260
Se	15.0	0.40	80

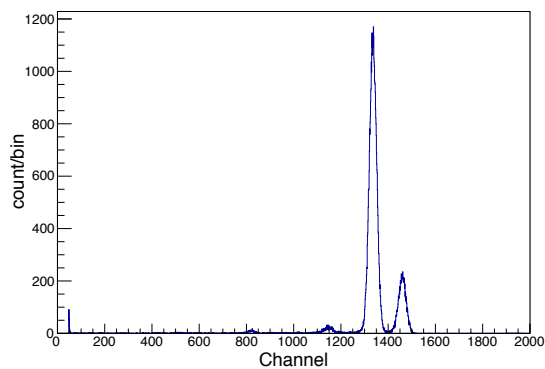
フィット結果から SOI ピクセル検出器を設置する場所での X 線絶対強度 [ph/mm²/sec] を算出するにあたって、考慮すべき点が3つある。1つ目は、SDD における検出効率である。表 3.3 と図 3.7 は SDD における X 線エネルギーに対する検出効率を示す。これを用いて、検出したイベント数から入射した X 線光子数に変換することができる。2つ目は二次 X 線ターゲットから検出器までの距離である。図 3.1 にある通り、二次 X 線ターゲットから SOI ピクセル検出器までの距離と SDD までの距離が異なり、それぞれ 509 mm、475 mm である。3つ目に SDD の入射面の面積である。SDD 内部において検出器直前にコリ



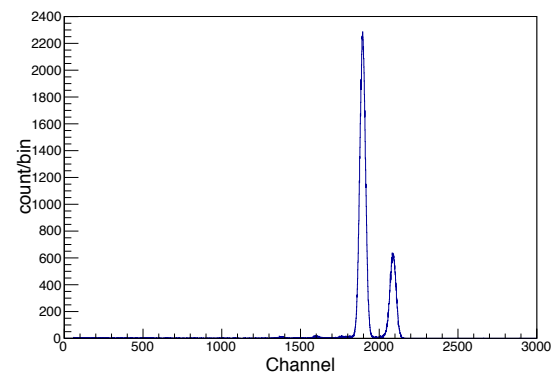
(a) Al ターゲットで得られたスペクトル



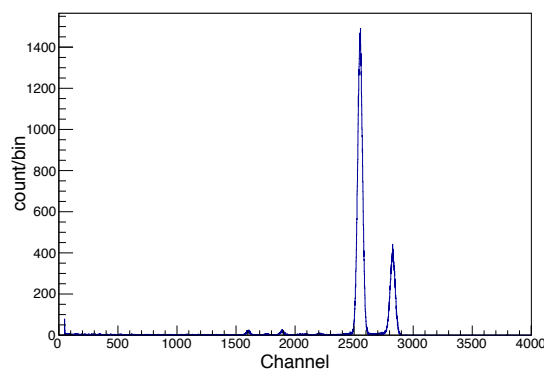
(b) Cl ターゲットで得られたスペクトル



(c) Ti ターゲットで得られたスペクトル



(d) Fe ターゲットで得られたスペクトル



(e) Se ターゲットで得られたスペクトル

図 3.6: SDD で得られた各 X 線スペクトル。

メータ (面積 17.0 mm^2) があるが、これには寸法誤差が 10% ある。X 線強度測定における誤差はこの寸法誤差が支配的である。以上を踏まえ、フィット結果を用いて算出した X 線絶対強度を表 4.1 にまとめた。

エネルギー	検出効率 [%]
1.5 keV (Al-K α)	81.3
2.6 keV (Cl-K α)	75.6
2.8 keV (Cl-K β)	76.9
4.5 keV (Ti-K α)	87.3
4.9 keV (Ti-K β)	89.4
6.4 keV (Fe-K α)	92.4
7.1 keV (Fe-K β)	95.3
11.2 keV (Se-K α)	89.2
12.5 keV (Se-K β)	89.5

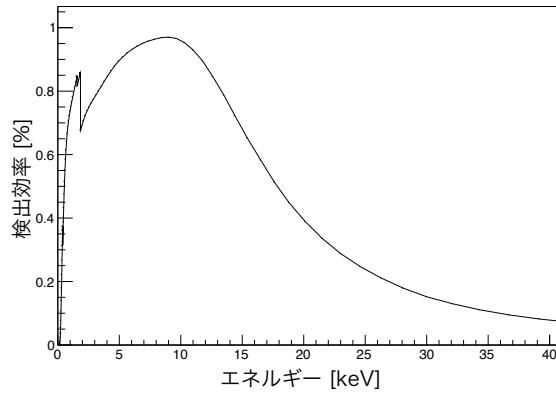


図 3.7: SDD における X 線エネルギーに対する検出効率。

表 3.3: SDD における測定した各 X 線エネルギーに対する検出効率

表 3.4: X 線絶対強度。

	エネルギー (keV)		フラックス (ph/mm ² /sec) [†]
	K α	K β	
Al-K	1.5		12.2 ± 1.3
Cl-K	2.6	2.8	3.3 ± 0.3
Ti-K	4.5	4.9	0.52 ± 0.05
Fe-K	6.4	7.1	0.46 ± 0.04
Se-K	11.2	12.5	0.70 ± 0.07

[†] フラックスは K α と K β を足し合わせている。

第4章 LA処理を適用したXRPIXの軟X線感度の測定

4.1 X線天文用SOIピクセル検出器の開発

SOIピクセル検出器は2005年に高エネルギー加速器研究機構(KEK)で発足したSOIPIX(SOIPIXel sensor)グループを中心に開発されている検出器で、京都大学は2008年より加入している。KEKで開発された高エネルギー実験用SOIPIXの性能評価において、SOIPIXでX線を撮像分光することを確認した[20]。その経験をもとに、京都大学が中心となって、KEK、宮崎大学、東京理科大学と共にX線天文用のSOIピクセル検出器「XRPIX」を開発してきた。以降、裏面照射型XRPIXにおける軟X線感度について述べる。

4.2 XRPIX2b-LAの仕様

4.2.1 XRPIX2bの概要

XRPIX2bは京都大学が主導で開発したX線天文学用SOIピクセル検出器の四号機である(図4.1)。チップの製造はラピスセミコンダクタ(株)のFD-SOI 0.2 μm ピクセルプロセスで行った。チップのサイズは6.0 mm \times 6.0 mm、ピクセルサイズは30 μm \times 30 μm である。

図2.1より、XRPIXにはBOX層直下にBuried p-well (BPW)という薄いp層があり、これは素子に印加する高いバックバイアス電圧値によってCMOS回路におけるMOSFETの特性が変化すること(バックゲート効果)を防ぐ役割を担う。XRPIX2bにはこのBPWのサイズを変えた4つのグループ(図4.1におけるA、B、C、D)に分けられている。これらはセンサー部の変換ゲインがそれぞれ異なるため、出力ゲインも異なる。本研究では、有効面積が最大の領域A(ピクセル数144 \times 144)を用いた。

検出部のウェハはシリコン結晶生成法の異なる二種類があり、Czochralski法を用いた抵抗率が $\sim 700 \Omega\text{-cm}$ のCZウェハと、Floating Zone法を用いた抵抗率が1 k $\Omega\text{-cm}$ 以上のウェハがある。2.1.2節で述べたように、抵抗率が高いFZウェハの方が低いバックバイアス電圧で厚い空乏層を得ることが期待出来る。XRPIX2b-LAはイオンインプラント+レーザーアニール(LA)処理を施した裏面照射型の素子で、センサー層は500 μm のFZウェハで構成されている。また、XRPIX2b-LAは裏面に0.2 μm のAl遮光膜が蒸着してある。

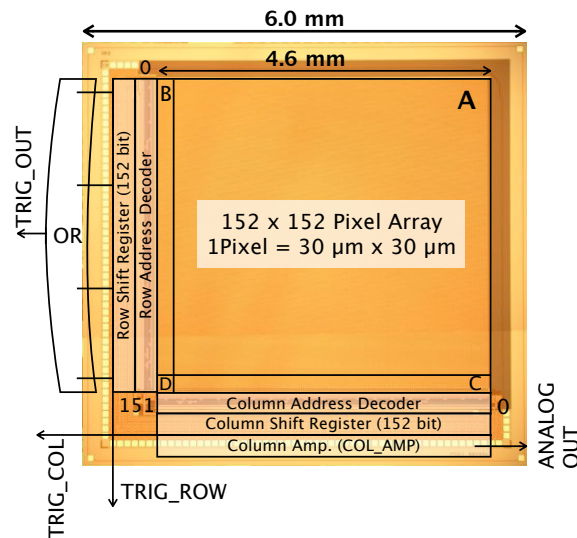


図 4.1: XRPIX2b のチップ写真とブロック機能図。

4.2.2 ピクセル回路について

XRPIX2b のピクセル回路図 4.2 に示す。ピクセル回路は低ノイズ化のために Correlated Double Sampling (CDS) 機能を搭載した読み出し部と、X 線の入射を判定するトリガー機能部の二つに分けられる。XRPIX2b の読み出しは、ある時間露光した後たまった電荷をリセットするという手順を踏む。リセットの際に検出部に発生するノイズを減少させる役割を CDS 回路が担う。また、XRPIX2b の読み出し回路における回路ゲインはセンスノード後段のソースフォロワー (SF) 回路によって決まる。

4.2.3 LA 処理について

裏面照射型の素子は裏面処理が必要である。裏面処理を行う理由は主に二つある。一つ目は、裏面入射面における不感層厚を薄くすることである。BI XRPIX は裏面から X 線を入射することを想定しているが、裏面に回路層 ($\sim 8 \mu\text{m}$) 程度の不感層があっては軟 X 線感度向上は不可能である。二つ目は、ウェハ切断面に生じる結晶欠陥を回復させるためである。シリコンウェハは大きなシリコン結晶の塊であるインゴットからスライスされ、物理的に切り出される。その切断面ではシリコンの結晶構造が壊れ、結晶欠陥が数多く残る。この結晶欠陥によりエネルギーバンドに不純物準位が形成されるため、暗電流が増加する。よって、結晶構造を回復させることで、暗電流を抑えることが必要である。

裏面処理の一つにイオンインプラント+レーザーアニールがある。イオンをドーピングすることで、裏面に損傷を与える。さらに、レーザーでアニールすることでドーピングしたイオンが活性化し、再配列がおきることで結晶欠陥を埋め、結晶を回復させる。

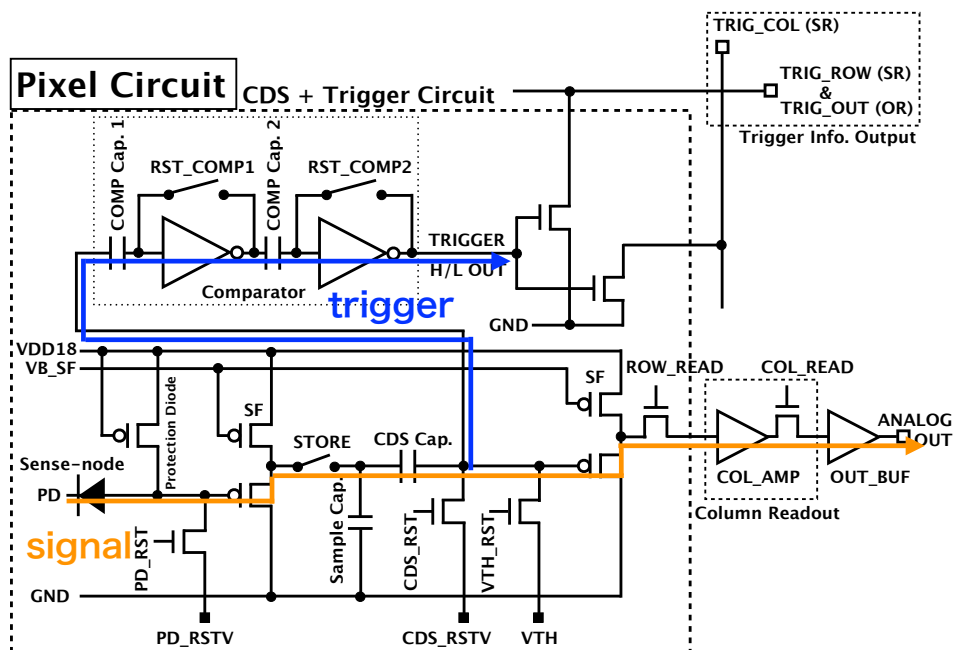


図 4.2: XRPIX2b のピクセル回路図。

4.3 基本性能試験: ペDESTAL特性

XRPIX は X 線が入射していないときでも、リセット電圧や暗電流に起因した出力が常に存在する。これをペDESTALと呼ぶ。X 線照射実験の前に、同じ環境で XRPIX2b-PZ のペDESTAL特性を調べる試験を行った。試験は真空槽内で遮光し、素子を -50°C に冷却した状態で行った。一定の時間露光し、全てのピクセルの出力を順番に読み出し、その後再び露光を始める「全面読み出し法」でデータを取得した。図 4.3 はあるフレームの出力を示している。これを見るとピクセルごと出力にばらつきがあることが分かる。

次にひとつのピクセルに着目し、出力の時間変化(ライトカーブ)とヒストグラムを図 4.4 に示す。ライトカーブは、非常に早く変化する「ノイズ成分」と変化が緩やかな「オフセット成分」に分けることができる。出力の波高値は、ガウシアンで分布していることが分かる。この分布の平均値がオフセット成分の時間平均に、広がりがノイズ成分とオフセット成分の時間変化に対応する。

さらに、全ピクセルの出力波高値の中央値ライトカーブとあるフレームの各ピクセルからの出力波高値ヒストグラムを図に示す。このライトカーブから素子全体の出力傾向を見ることができる。ヒストグラムはピクセルごとオフセット成分にばらつきがあるため、幅を持った分布をしている。全体としてはガウシアンで分布している。

各ピクセルは緩やかに変化する固有のオフセット成分 $\text{PH}_{0ij}(f)$ (添字の i, j はそれぞれ Column, Row のアドレスを、 f はフレームを表す) と、ノイズ成分 $\Delta\text{PH}_{ij}(f)$ を持つことが分かった。すなわち、あるピクセルのあるフレームにおけるペDESTAL $\text{PH}_{ij}(f)$ は

$$\text{PH}_{ij}(f) = \text{PH}_{0ij}(f) + \Delta\text{PH}_{ij}(f) \quad (4.1)$$

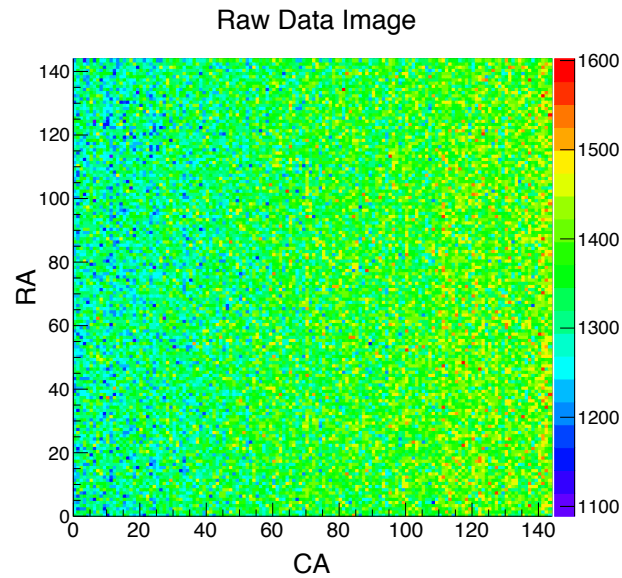


図 4.3: 真空層内で冷却した状態で取得した XRPIX2b-LA の出力。縦軸、横軸はともに素子の列アドレス、行アドレスを示す。

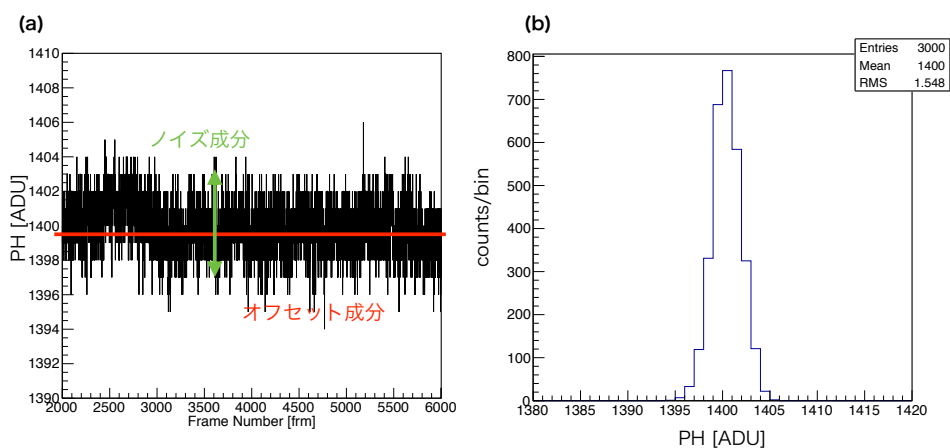


図 4.4: 1 ピクセルのデータ。(a) ライトカーブ。赤線はオフセット成分、緑線はノイズ成分を示す。(b) ヒストグラム

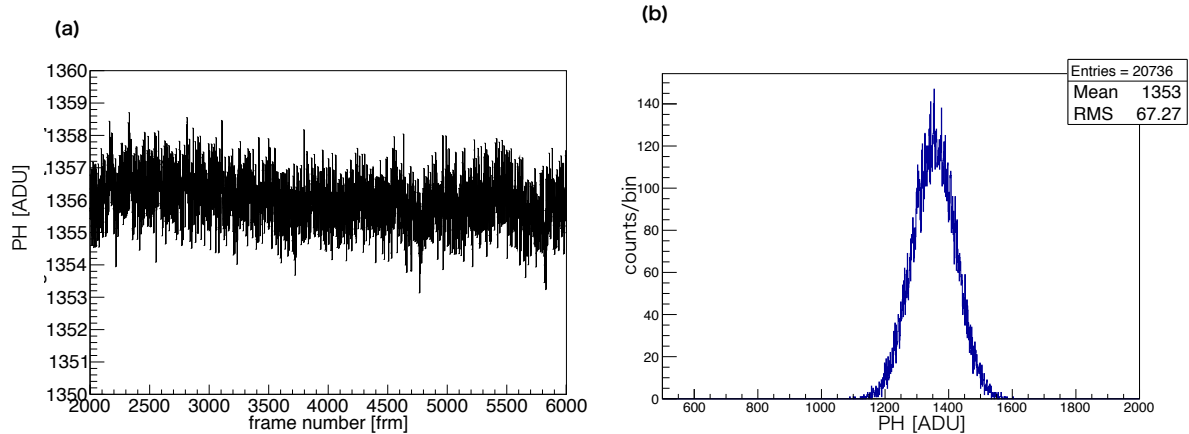


図 4.5: 1 ピクセルのデータ。(a) 全ピクセルの出力波高値の中央値ライトカーブ。(b) ヒストグラム

と書ける。

もし、各ピクセル、各フレームの $PH_{0ij}(f)$ が算出できれば、それを $PH_{ij}(f)$ から引くことで、オフセット成分の時間変化とピクセル間でのオフセット成分のばらつきを補正することができる。本研究では、あるピクセルにおいて、着目するフレームの前後 50 フレームの出力平均を取ることで早く変化するノイズ成分を打ち消し、ランニングアベレージ $PH_{0ij}(f)$ を推定した。すなわち、

$$PH_{0ij}(f) \approx \frac{1}{101} \sum_{f'=f-50}^{f+50} PH_{ij}(f') \quad (4.2)$$

とする。

上で述べた計算方法で各 $PH_{0ij}(f)$ を求めて、それを各ピクセル、各フレームの生出力から差し引いて補正する。オフセットを差し引いているため、平均出力は 0 となり、時間変化も補正される。ヒストグラムも同様に平均が 0 となり、ピクセル間のオフセット成分のばらつきも補正される。これを以後、ゼロピークと呼ぶ。ゼロピークの幅はノイズ成分と考えられ、これを「読み出しノイズ」と定義する。

4.4 X線検出の解析方法

4.4.1 解析プロセス

「全面読み出し法」でデータを取得した場合の解析プロセスについて紹介する。前節のペDESTAL特性の研究をもとに、解析は以下の手順で行った。

(1) オフセット成分の差し引き

4.3 節で行ったように、各フレームにおける各ピクセルの $PH_{0ij}(f)$ の推定値を算出する。その後、各フレームにおける各ピクセルのペDESTALからその推定値を差し

引く。これにより、オフセット成分のピクセル間のばらつき、および時間変動が補正される。

(2) bad pixel の選定

各ピクセルごとに読み出しノイズを計算し、その平均値とばらつき (標準偏差: σ_{pix}) を求める。平均値よりも $3\sigma_{pix}$ 以上ノイズの大きいピクセルを bad pixel と判定し、以降の解析では用いない。

(3) X 線イベントの検出

各フレーム、各ピクセルの出力から X 線のイベントを判定する。イベントの検出については 4.4.2 節で詳しく説明する。

(4) チャージシェアリングイベントの評価

XRPIX のようなピクセル検出器では、発生した電荷が複数のピクセルにまたがってしまうチャージシェアリングイベント (マルチピクセルイベント) が存在する。空乏層の深い位置で発生した電荷雲は、読み出しノードがあるセンサー層表面に到達するまでに大きく広がる。このような場合はチャージシェアリングイベントの割合が大きくなる。よって、空乏層のより深い位置吸収される X 線でこのイベントが起こりやすい。チャージシェアリングイベントは、複数の読み出しノードから電荷が回収されるので、入射した X 線のエネルギーを知るためには、解析時にそれらの電荷を足し合わせる必要がある。解析時の補正についても 4.4.2 節で説明する。

4.4.2 イベント検出とチャージシェアリングイベントの補正

この項では X 線イベントの検出とチャージシェアリングイベントの補正を行うため以下のような手順で「イベントセレクション」を行った。(図 4.6)。

(i) イベントの抽出

あるピクセルに着目する。出力値が周囲 8 ピクセルの出力値よりも大きくかつ、あらかじめ設定したイベント閾値 (特に記載がない限り読み出しノイズの 15 倍の値) よりも大きいとき、X 線による「イベント」と定義する。

(ii) シングルピクセルイベントの判定

周囲 8 ピクセルの出力値が全て、あらかじめ設定したスプリット閾値 (特に記載がない限り読み出しノイズの 3 倍の値) よりも小さいとき、これを「シングルピクセルイベント」と定義する。これは X 線により作られた電荷が一つのピクセルに収まったイベントだと考えられる。中心のピクセルの出力がシングルピクセルイベントの出力とする。

(iii) ダブルピクセルイベントの判定

抽出したイベントに隣り合う 4 つのピクセルの出力のうちひとつのみが、あらかじめ設定したスプリット閾値を超えるようなイベントを「ダブルピクセルイベント」と定義する。これは電荷が 2 つのピクセルにまたがったチャージシェアリングイベ

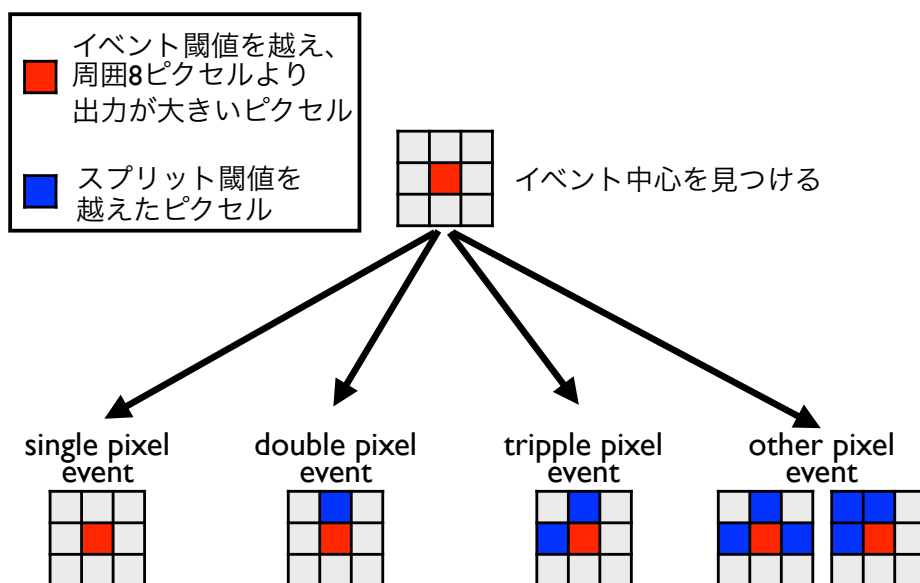


図 4.6: イベントセレクションの関係図。

ントと判定する。ダブルピクセルイベントの出力は、中心のピクセルと、スプリット閾値を超えたピクセルの出力を足し合わせたものとする。以降、複数のピクセルにまたがったチャージシェアリングイベントの出力は中心のピクセルと、スプリット閾値を超えたピクセルの出力を足し合わせたものである。

(iv) トリプルピクセルイベントの判定

イベント中心に隣り合う4つのピクセルのうちふたつが、スプリット閾値を超えるようなイベントを「トリプルピクセルイベント」と定義する。これは、図 4.6 のような中心ピクセルとスプリット閾値を超えたピクセルの配置になるイベントの回転対称も、トリプルピクセルイベントに含まれる。

(v) その他のイベントの判定

以上以外のイベントとして、図 4.6 のような中心ピクセルとスプリット閾値を超えたピクセルの配置になるイベントを「その他のイベント」と定義した。図示したように中心ピクセル含め4つのピクセルにまたがるイベントまでを抽出した。

4.5 XRPIX2b-LA における軟 X 線裏面照射実験

4.5.1 取得データについて

軟 X 線性能評価のために多色蛍光 X 線校正システムを用いて X 線を裏面側から照射した。XRPIX2b では Al-K (1.5 keV) は読み出すことができないため照射していない。XRPIX2b-

LA におけるデータ取得条件は、各 X 線に対して、露光時間を 10 msec に設定し、バックバイアス電圧を 160 V から 300 V まで 20 V 刻みで印可した。また素子の温度は -50°C で駆動させ試験を行った。

表 4.1: XRPIX2b-LA で取得した X 線データ一覧。

ターゲット	バックバイアス電圧値 [V]	取得フレーム数
Cl	200–300	10000
	180	20000
Ti	200–300	55000
	160、180	110000
Fe	200–300	45000
	160、180	90000
Se	200–300	30000
	160、180	60000

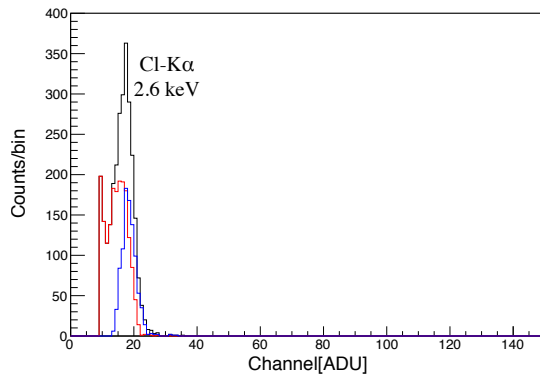
4.5.2 エネルギースペクトルとゲイン

「全面読み出し法」を用いて得られたエネルギースペクトルを図 4.7 に示す。いずれもバックバイアス電圧は 300 V を印可した状態で取得したスペクトルである。それぞれ Cl-K (2.6 keV)、Ti-K (4.5 keV)、Fe-K (6.4 keV と 7.1 keV)、Se-K (11.2 keV と 12.5 keV) の輝線の検出を確認した。図 4.7 (a) ではシングルピクセルとダブルピクセルイベントの中心値がずれていることがわかる。これは周囲のピクセルに電荷が漏れ出しているにも関わらず、そのピクセルでスプリット閾値を超えないため、漏れ出した分が再構成できなかったからだと考えられる。

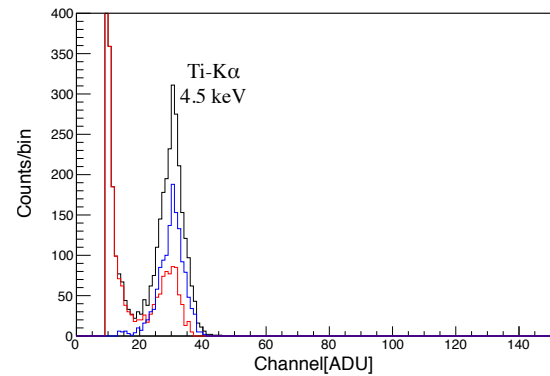
したがって、Cl-K のみダブルピクセルイベントを、他はシングルピクセルイベントのエネルギースペクトラムを用いて、輝線の中心エネルギーを求めることでエネルギー較正を行った。それぞれのピークをガウシアンでフィットした。Fe、Se については $K\alpha$ 、 $K\beta$ 輝線が分離できているため、二つのガウシアンでフィットした。図 4.8 は、一次関数でフィットした結果を示す。求めた傾きから XRPIX2b-LA の X 線エネルギーと出力の関係を算出した。1 ADU = 244 μV 、Si の平均電離エネルギー 3.65 eV/e⁻ を用いると、素子のゲイン g [$\mu\text{V}/e^-$] は、

$$g = k \times 244 \times (3.65 \times 10^{-3}) \quad (4.3)$$

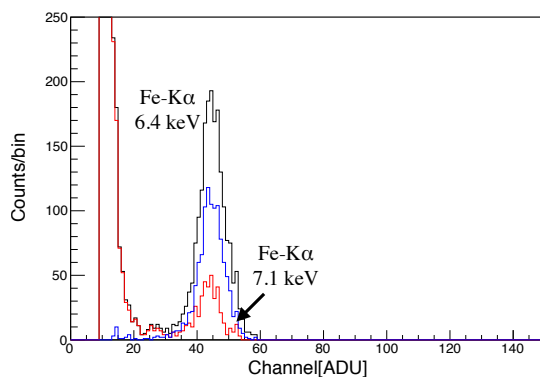
と書ける。ただし、 k [ADU/keV] は一次関数でフィットして得られた傾きである。この式を使用して、2b-LA のゲインを計算すると、 $6.61 \pm 0.03 \mu\text{V}/e^-$ であった。また、このゲインを用いて読み出しノイズを求めると $53 e^-$ (0.2 keV) である。イベント閾値とスプリット閾値はそれぞれ、読み出しノイズの 6σ (1.3 keV)、 3σ (0.6 keV) に設定し、2b-LA の軟 X 線の裏面性能評価の解析を行った。



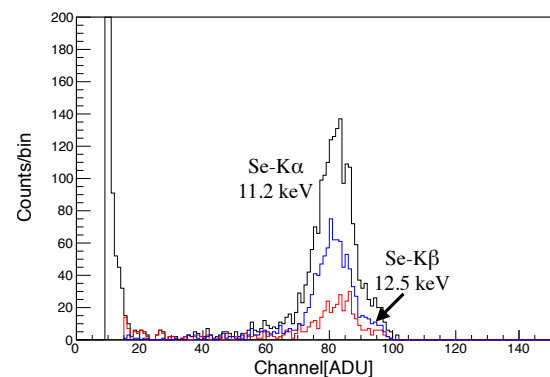
(a) Cl ターゲットで得られたスペクトル。



(b) Ti ターゲットで得られたスペクトル。



(c) Fe ターゲットで得られたスペクトル。



(d) Se ターゲットで得られたスペクトル。

図 4.7: XRPIX2b-LA で得られた各 X 線スペクトル。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベント、黒線は 4.4.1 項の解析手順で X 線と判定されたイベントを全て足し合わせたもの。

4.5.3 実験結果 1: 空乏層の広がり

裏面の不感層厚を求めるためには、完全空乏化している必要がある。そこで、XRPIX2b-LA のセンサー層が完全空乏するために必要なバックバイアス電圧を調べた。Se K α (11.2 keV、減衰長 176 μm)、K β (12.5 keV、減衰長 243 μm) 輝線を用いて検出効率のバックバイアス依存性を測定した。高エネルギー X 線の検出効率は、Si における減衰長が長いいため検出効率は空乏層厚に依存する。十分なバックバイアス電圧を印加すれば、空乏層厚は一定値をとると考えられるので、検出効率も同様に一定値をとる。

図 4.9 は Se K 輝線の検出効率のバックバイアス電圧依存性を示す。検出効率はバックバイアス電圧値が 200 V 以上であまり変化がないことが分かる。また、チャージシェアリングイベントについてみる。バックバイアス電圧値が大きくなるにつれてシングルピクセルイベントの検出効率は緩やかに増加し、ダブルピクセルイベントも同様増加している。一方、トリプルピクセルイベントとより広がったその他のイベントの検出効率はバックバイアス電圧値 200 V 以降減っているのが分かる。これはバックバイアス電圧値を上げるにつれて、センサー層内の電場が強くなり、電荷雲が小さくなったためだと考えられ

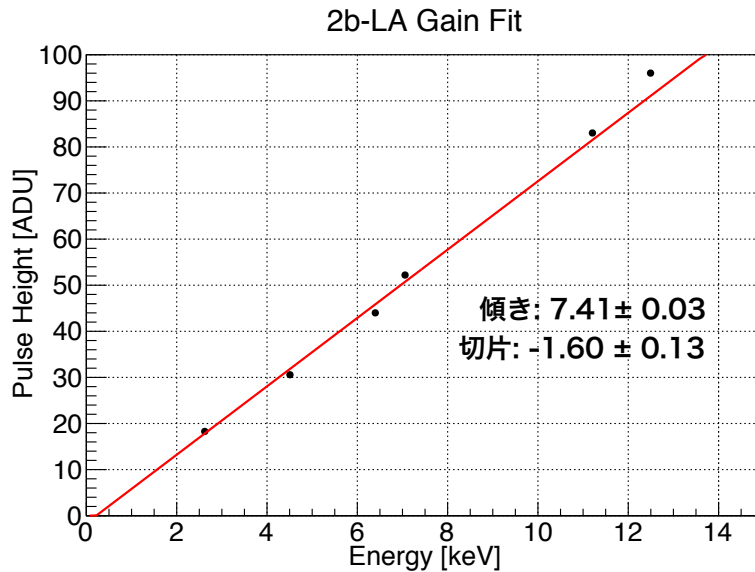


図 4.8: XRPIX2b-LA のエネルギー較正の結果。

る。以上より、完全空乏化に至るバックバイアス電圧は 200 V であると分かった。

この結果を用いて、ウェハの抵抗率を算出する。空乏層厚 $W_{dep} = 500 \mu\text{m}$ とバックバイアス電圧 $V = 200 \text{ V}$ を、式 2.5 に代入すると、抵抗率 ρ は $4.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ と求まる。さらに式 2.4 に抵抗率を代入すると、ウェハの P のドーパ量は $1.04 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ と求まる。

また、各エネルギーにおける検出効率を示したのが図 4.10 である。さらにバックバイアス電圧に対しての各エネルギーにおける検出効率も同時に示している。これからわかるように、より低いエネルギーの X 線は空乏層が広がり薄くなる不感層厚に対して敏感なので、高いバックバイアス電圧値になるほど急激に検出感度が向上していることがわかる。また、Se-K のような高エネルギー X 線は空乏層厚が大きく影響するが、バックバイアス電圧が 200 V で完全空乏化するので Cl-K ほど検出効率は大きく変化しない。

4.5.4 実験結果 2: 不感層の厚み

従って、200 V 以上のバックバイアス電圧をかけ、完全空乏かせて、裏面における不感層厚を測定した。本研究で使用した X 線の中で最も減衰長が短く、不感層厚に敏感なのは Cl-K α (2.6 keV、減衰長 $2.99 \mu\text{m}$) である。よって、Cl-K の検出効率から XRPIX2b-LA における不感層の厚みを求める。

式 2.25 より、裏面にある $0.2 \mu\text{m}$ の Al 遮光膜を考慮して、XRPIX2b-LA における Cl の検出効率 Q_{Cl} は

$$Q_{Cl} = \exp\left(-\frac{0.2}{\mu_{Al}(Cl)}\right) \times \exp\left(-\frac{d}{\mu_{Si}(Cl)}\right) \times \left\{1 - \exp\left(-\frac{W-d}{\mu_{Si}(Cl)}\right)\right\} \quad (4.4)$$

ここで W はセンサー層厚、 d はセンサー層における不感層厚である。以上の式から不感層厚 d は

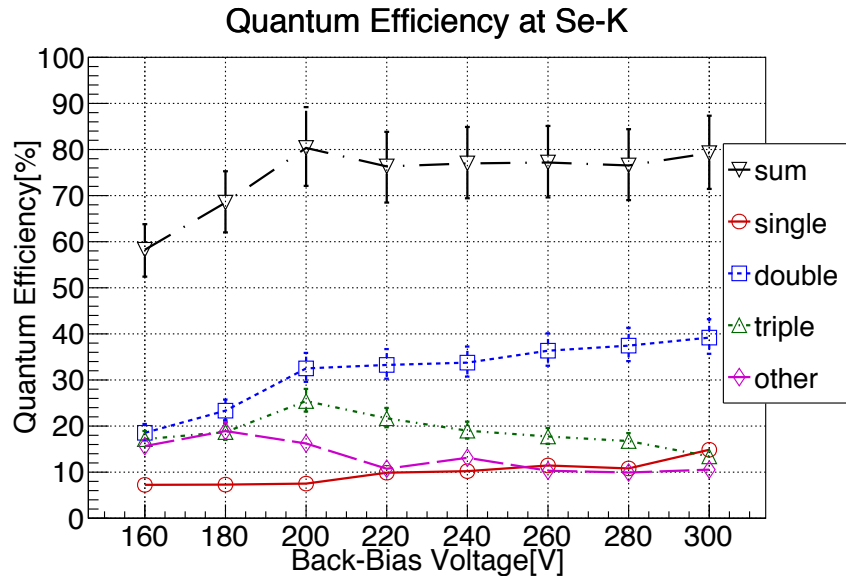


図 4.9: XRPIX2b-LA における Se-K の検出効率のバックバイアス電圧依存性。

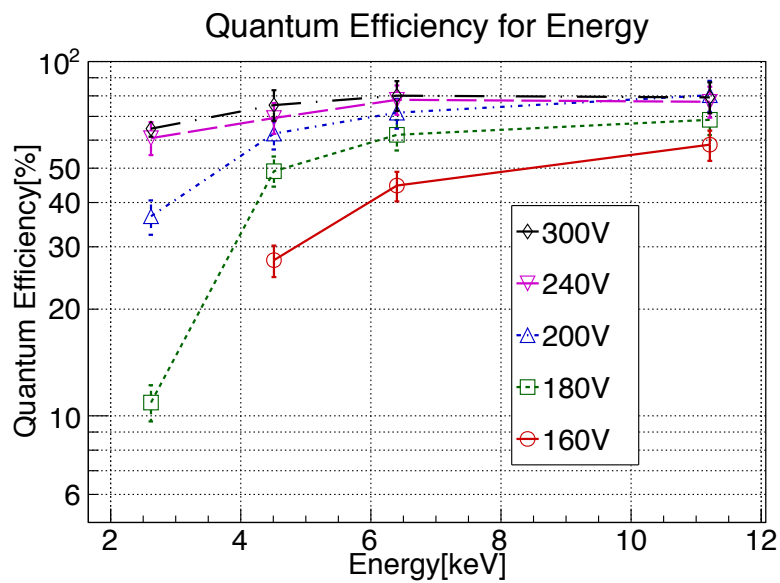


図 4.10: XRPIX2b-LA における検出効率とエネルギーの関係。

$$d = -\mu_{Si}(Cl) \times \log \left\{ Q_{Cl} \times \exp \left(\frac{0.2}{\mu_{Al}(Cl)} \right) + \exp \left(-\frac{W}{\mu_{Si}(Cl)} \right) \right\} \quad (4.5)$$

となる。

図4.7(a)から分かる通り、XRPIX2b-LAにおいてCl-Kは $K\alpha$ 輝線と $K\beta$ 輝線に分光できていない。したがって、検出効率は $K\alpha$ 輝線と $K\beta$ 輝線の合算で算出した。Cl-K α におけるSi、Alそれぞれでの減衰長は $2.99\mu\text{m}$ 、 $3.20\mu\text{m}$ である。バックバイアス電圧値が300Vの時のCl-Kの検出効率から不感層厚は、 $1.1 \pm 0.3\mu\text{m}$ と求められる。この結果は、裏面の $0.2\mu\text{m}$ のAl遮光膜は含まず、センサー層に生じる不感層の厚みを示している。また、測定の誤差はX線の絶対Fluxを測定する際に使用したSDDのコリメーターの寸法誤差(10%)が支配的である。XRPIX2b-LAの不感層厚は要求値 $1\mu\text{m}$ を達成する見込みを得た。

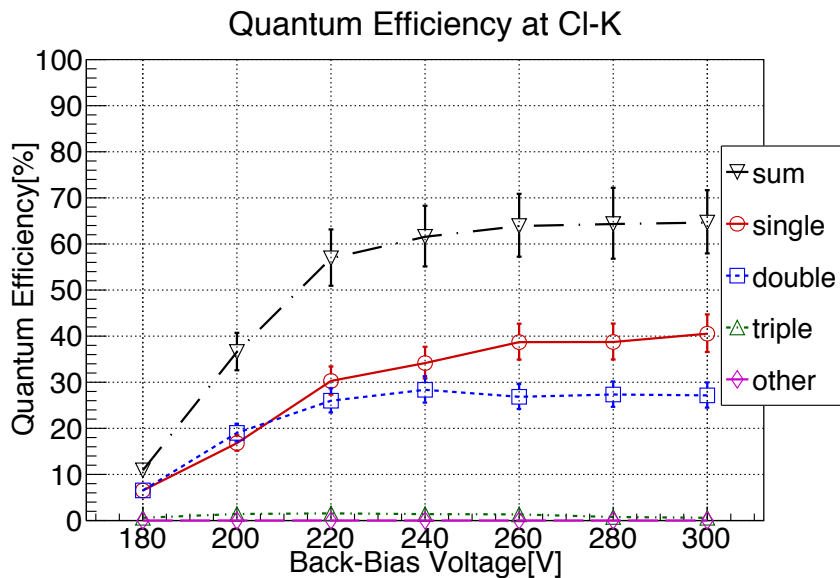


図 4.11: XRPIX2b-LA における Cl-K 検出効率とバックバイアス電圧依存性。

4.6 XRPIX2b-LA のデバイスシミュレーション

前節までの実験結果を解釈するため、TCAD (Technology Computer Aided Design) によるデバイス構造のシミュレーションを行った。TCAD とは半導体デバイスのプロセスから作成したデバイスの電気特性までをシミュレーションできるソフトウェアである。本研究で用いた TCAD シミュレーターは HyENEXSS 5.5 [22] である。このシミュレーターで XRPIX2b-LA を仮想的に作り、空乏層の広がり和不感層のバックバイアス依存性について調査した。

4.6.1 シミュレーションで再現したデバイス構造

HyENEXSS 5.5 は三次元におけるデバイスシミュレーションが可能であるが、本研究では二次元でのシミュレーションを行った。図 4.12 は XRPIX2b のピクセルレイアウトで、

本シミュレーションでは赤線の断面を再現した。断面図が図 4.13 である。BOX 層とセンサー層の境界を原点として、素子表面に向かって y 軸をとった。図 4.13 中の赤線は電位を固定した箇所を示し、それぞれの V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node} はセンスノードの固定電位、 $V_{circuit}$ はピクセル回路の電位である。BPW 直上のピクセル回路は今回のシミュレーション結果には影響しないため省略した。

空乏層の成長はウェハの不純物濃度が重要である。まずウェハのリン濃度は先の実験結果から $1.04 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。また、XRPIX2b-LA は裏面 LA 処理を施しているため、裏面界面ではウェハ内部とプロファイルは異なる。二次イオン質量分析 (SIMS) と広がり抵抗測定 (SRA) で XRPIX2b-LA の裏面におけるリン濃度およびキャリア濃度分布を調べた。その結果を図 4.14 に示す。図 4.14 は裏面 (Al 遮光膜は除く) から $1.0 \mu\text{m}$ 地点までの分布を示している。以上より、XRPIX2b-LA のウェハのリン濃度は、BPW やセンスノード付近から SRA の測定限界 (裏面から $1.0 \mu\text{m}$) まで $1.04 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ で一定とし、裏面から $1.0 \mu\text{m}$ まで SRA におけるキャリア密度分布を反映させた。

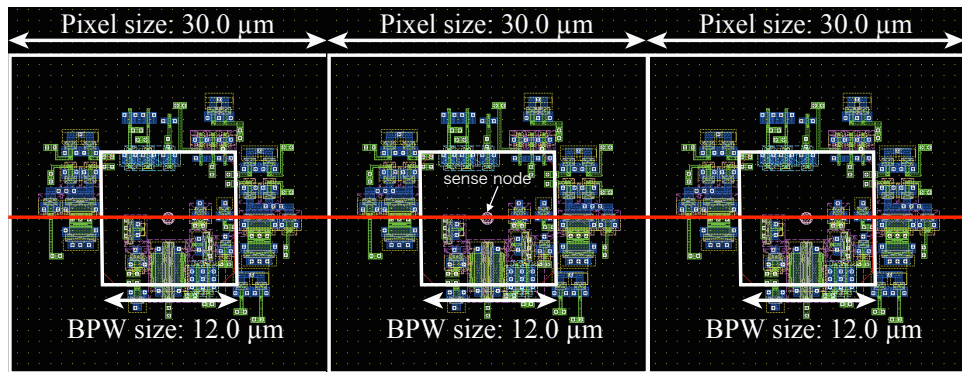


図 4.12: XRPIX2b のピクセルレイアウト。赤線の断面においてデバイスシミュレーションを行った。

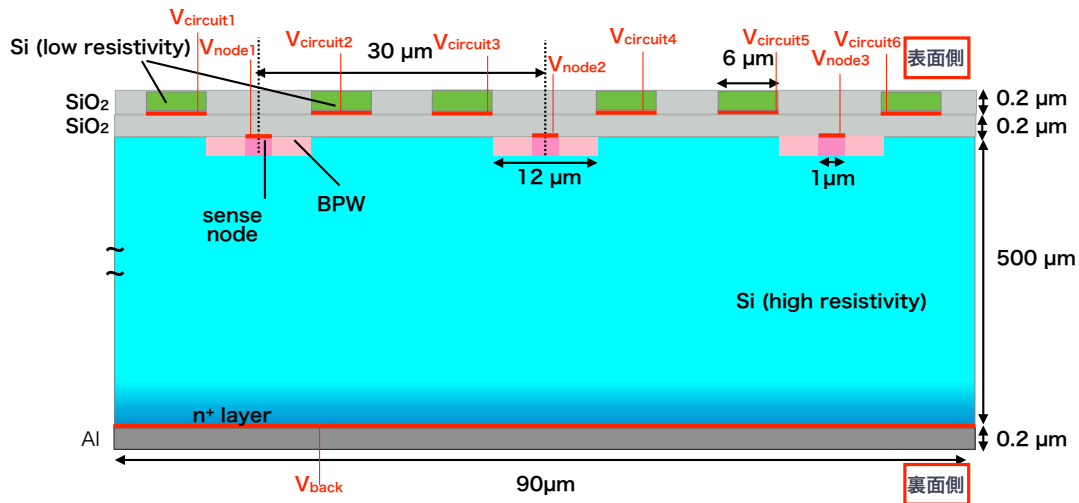


図 4.13: XRPIX2b-LA のデバイス構造。電位を固定する電極の範囲は図中の赤線で示しており、 V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node} はセンスノードの固定電位、 $V_{circuit}$ はピクセル回路の電位に対応する。

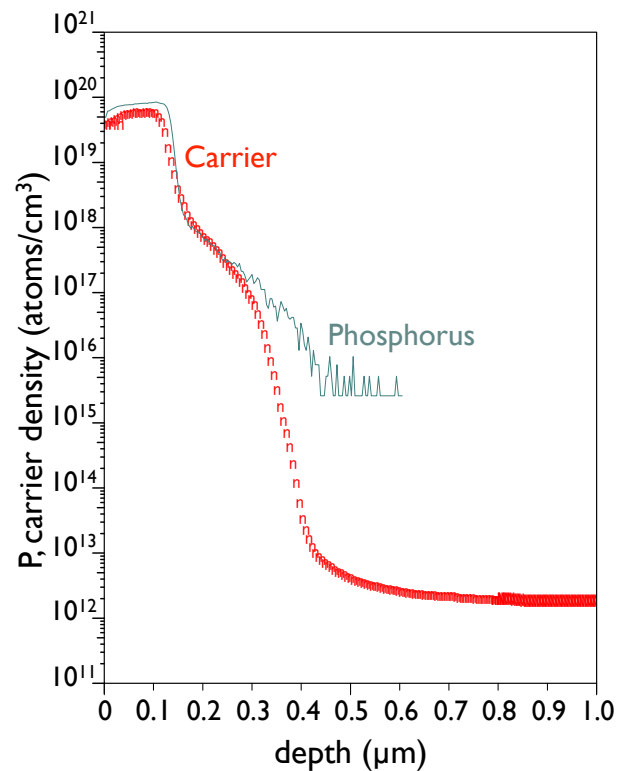


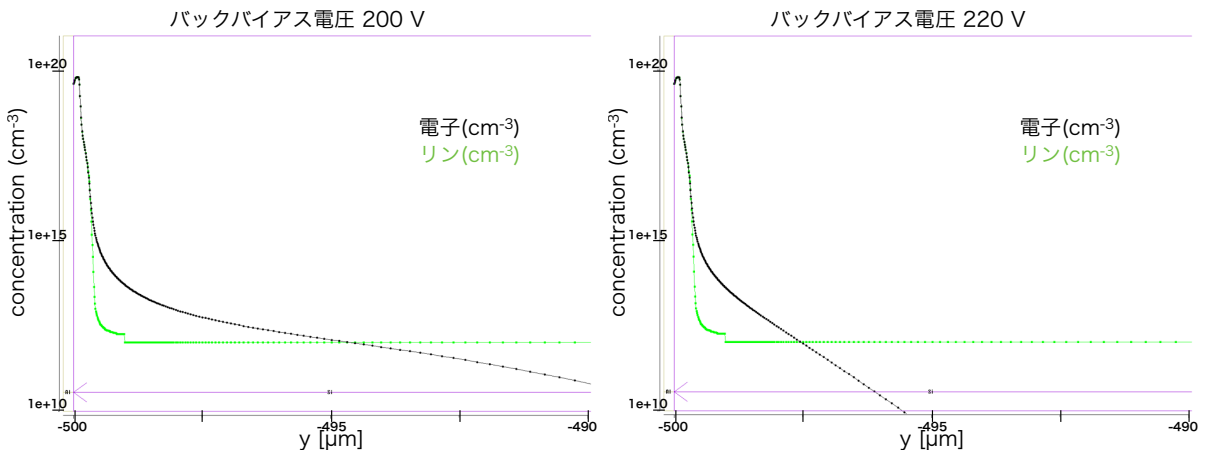
図 4.14: XRPIX2b-LA の裏面におけるリン濃度プロファイル。

4.6.2 デバイスシミュレーションの結果

V_{node} と $V_{circuit}$ は 0 V に固定し、 V_{back} は完全空乏すると思われる 200 V から 20 V 刻みで 300 V まで印加した場合に対してシミュレーションを行った。図 4.15 はデバイスシミュレーションで得られたウェハ中のリンと電子の濃度分布を各バックバイアス電圧ごとに示している。図 4.15 にいて、ドナーであるリンとキャリアである電子の濃度分布曲線の交点が空乏層の最下層地点であり、交点から裏面までが不感層となる。高いバックバイアス電圧を印加するほど、空乏層が裏面に向かって広がっていることがわかる。

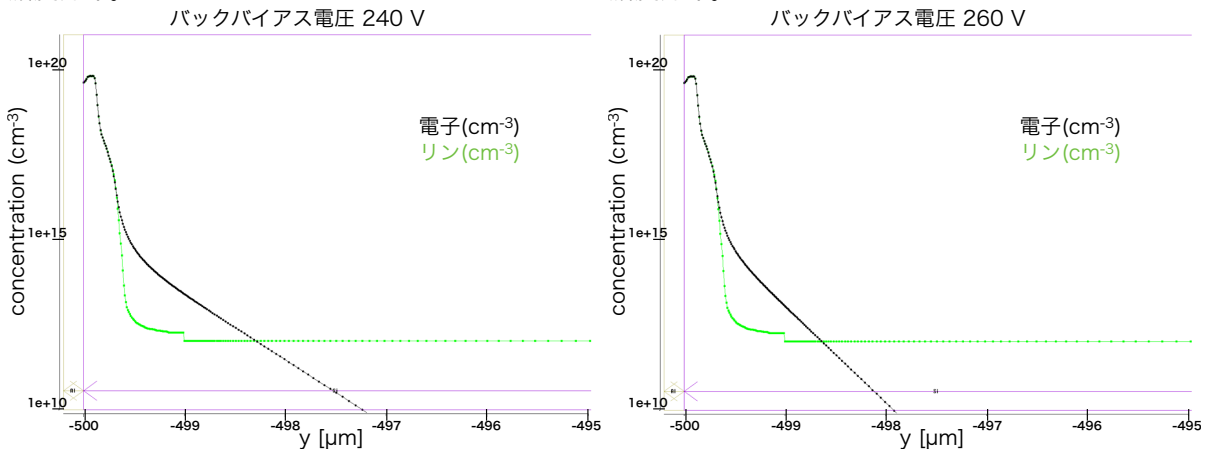
シミュレーション結果と Cl-K によって算出した不感層厚を各バックバイアス電圧ごとに示したものが図 4.16 である。ウェハのリン濃度が 10% つまり完全空乏化電圧が 10% 程度ずれていた場合においても別にシミュレーションを行い、図 4.16 に記載した。バックバイアス電圧が 300 V のとき、Cl-K から算出した不感層厚と TCAD デバイスシミュレーションで得られた不感層厚は矛盾ない結果であることがわかった。したがって、バックバイアス電圧が 300 V のとき不感層厚はどちらの結果からも $\sim 1 \mu\text{m}$ であり、要求値である $1 \mu\text{m}$ 程度である。

さらに精度よく不感層厚を求めるために、XRPIX2b から読み出し回路を改善した XRPIX3b に LA 処理を施した XRPIX3b-LA で実験を行った。さらに薄い不感層が得られることを期待して、XRPIX3b-LA には XRPIX2b-LA で印加した 300 V 以上のバックバイアス電圧を印加した。



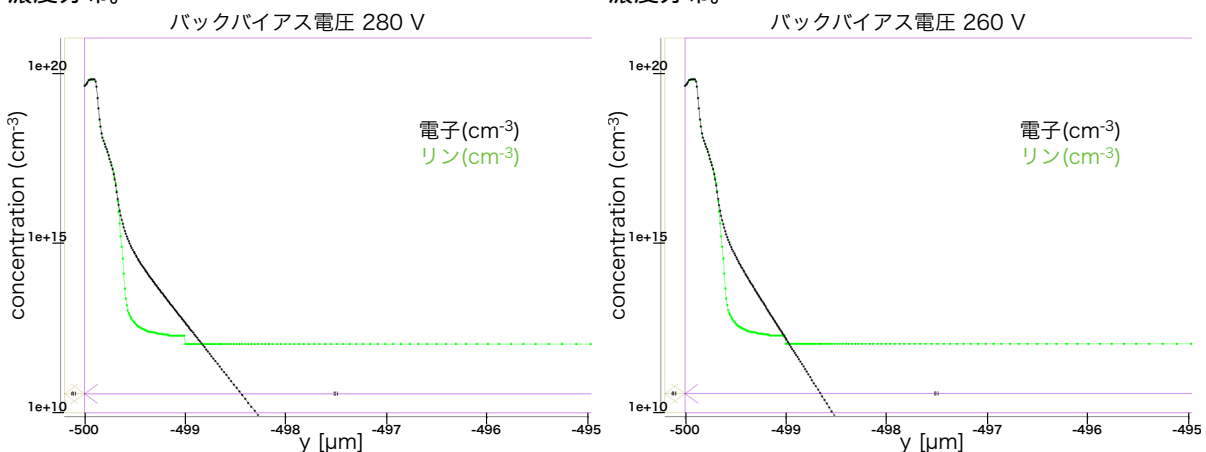
(a) バックバイアス電圧 200V のときのリンと電子の濃度分布。

(b) バックバイアス電圧 220V のときのリンと電子の濃度分布。



(c) バックバイアス電圧 240V のときのリンと電子の濃度分布。

(d) バックバイアス電圧 260V のときのリンと電子の濃度分布。



(e) バックバイアス電圧 280V のときのリンと電子の濃度分布。

(f) バックバイアス電圧 300V のときのリンと電子の濃度分布。

図 4.15: XRPIX2b-LA におけるデバイスシミュレーションの結果。

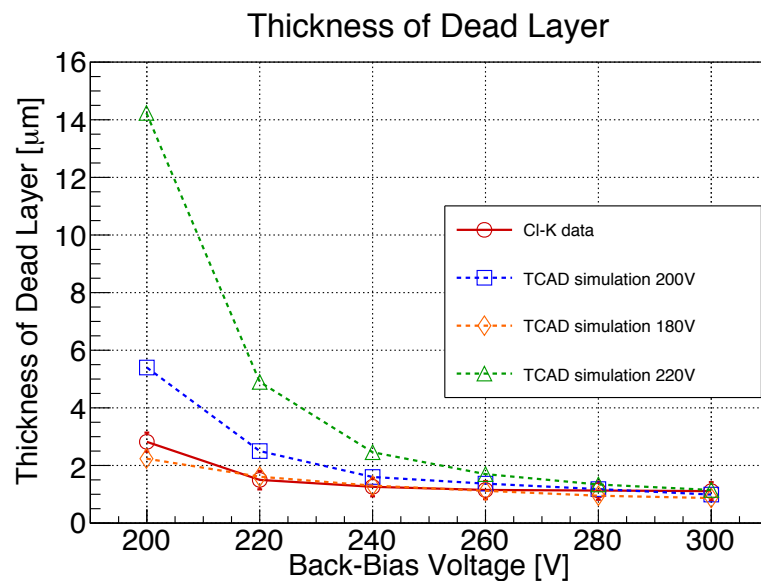


図 4.16: TCAD シミュレーションおよび CI-K から算出した不感層厚のバックバイアス依存性。赤は CI-K から算出した不感層厚、青は完全空乏化電圧が 200V のとき、緑とオレンジはともに完全空乏化電圧において 10% のずれを仮定した場合。裏面の Al 遮光膜は不感層に含まれていない。

4.7 XRPIX3b-LA の仕様と概要

XRPIX3b は京大が開発した X 線天文学用 SOI ピクセル検出器の六号機である (図 4.17)。XRPIX2b と同様のプロセスによって製造されている。チップのサイズは $2.9\text{ mm} \times 2.9\text{ mm}$ 、ピクセルサイズは $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ である。XRPIX3b-LA は FZ ウェハで、センサー層は厚さ $310\text{ }\mu\text{m}$ である。XRPIX3b は 32×32 のピクセルを有するが、図 4.17 のように読み出し回路の違う二つの領域に分けられている。左半分の領域では、XRPIX2b と同様にセンスノード後段の回路にソースフォロワー回路 (SF) を使用している。また、右半分の領域では、センスノード後段の回路にチャージセンシティブアンプ (CSA) 回路を用いることで、回路ゲインを増幅させ、出力ゲインを向上させた。以降 SF 領域と CSA 領域をそれぞれ XRPIX3b-SF、XRPIX3b-CSA と呼ぶ。図 4.18 は SF 回路と CSA 回路それぞれの回路図を示す。CSA 回路におけるフィードバック容量は 1 fF である。

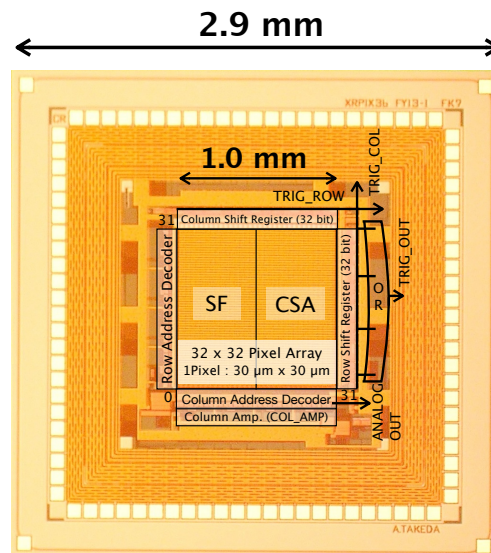


図 4.17: XRPIX3b のチップ写真とブロック機能図。

XRPIX3b を含む XRPIX シリーズの素子について読み出しノイズとゲインの関係をみると、XRPIX1 から XRPIX3b にいたる XRPIX シリーズで直線に乗っていて、XRPIX3b-CSA はこの中で最もゲインが高く、読み出しノイズが小さいので、分光性能が高い素子であることがわかる。したがって、LA 処理を施した XRPIX3b-LA の裏面性の評価を行うことで、より精度高く軟 X 線性能評価を行うことが可能である。

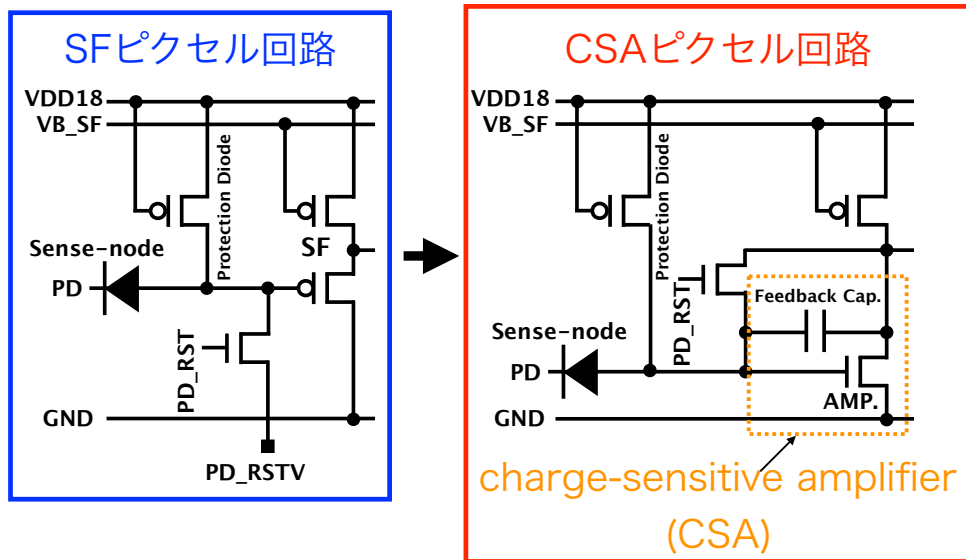


図 4.18: センスノード後段における回路図。

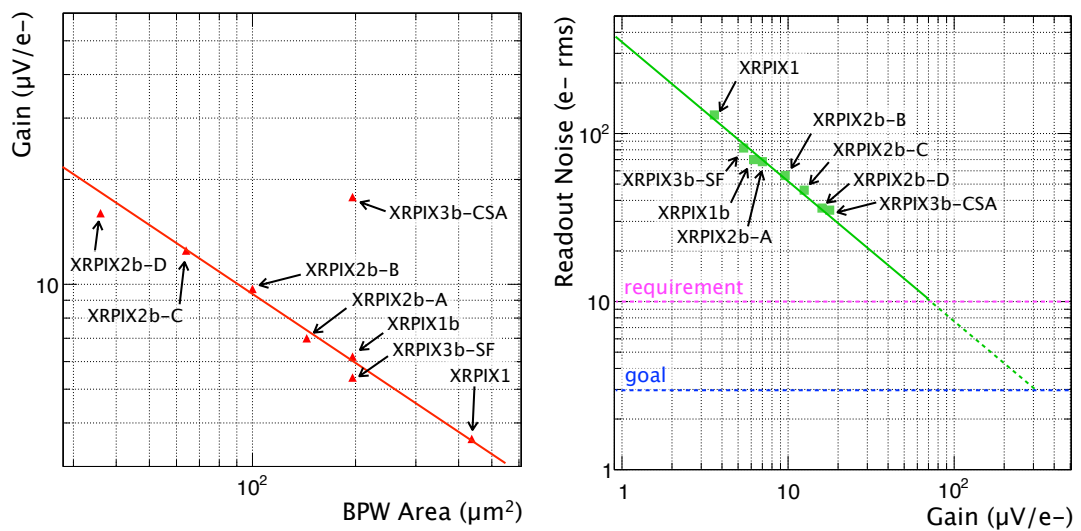


図 4.19: ゲインとBPWのサイズの関係(左図)と読み出しノイズとゲインの関係(右図)[21]。

4.8 XRPIX3b-LAにおける軟X線裏面照射実験

4.8.1 取得データについて

XRPIX2b-LA同様、取得したデータについて表4.2と表4.3まとめる。XRPIX3b-LAにおけるデータ取得条件は、各X線に対して、露光時間を10 msecに設定し、バックバイアス電圧を400 V印可した。XRPIX3b-CSAではAl-K (1.5 keV)を照射し、露光時間1 msecでデータを取得した。また素子の温度はXRPIX2b-LA同様に -50°C で駆動させ試験を行った。

表 4.2: XRPIX3b-SF-LA で取得した X 線データ一覧。

ターゲット	バックバイアス電圧値 [V]	取得フレーム数
Cl	400	500000
Ti	400	900000
Fe	400	900000
Se	400	400000

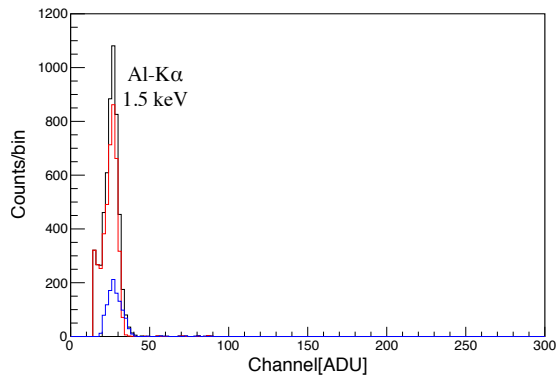
表 4.3: XRPIX3b-CSA-LA で取得した X 線データ一覧。

ターゲット	バックバイアス電圧値 [V]	取得フレーム数
Al	400	200000
Cl	400	500000
Ti	400	900000
Fe	400	900000
Se	400	400000

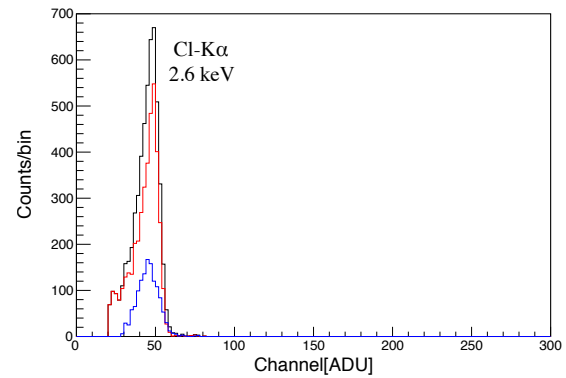
4.8.2 エネルギースペクトルとゲイン

XRPIX3b-CSA-LAとXRPIX3b-SF-LAで得られたエネルギースペクトルをそれぞれ図4.21と図4.20に示す。「全面読み出し法」を用いた読み出しにおいて、XRPIXシリーズでは初めてAl-K (1.5 keV)の取得に成功した。図4.22はXRPIX3b-LAにおけるエネルギー較正の結果を示す。式4.3からXRPIX3b-SF-LA、XRPIX3b-CSA-LAそれぞれのゲインは、 $5.34 \pm 0.01 \mu\text{V}/e^-$ 、 $17.10 \pm 0.03 \mu\text{V}/e^-$ と求まった。この結果から読み出しノイズはそれぞれ、 $69 e^-$ (0.24 keV)、 $38 e^-$ (0.14 keV)であった。XRPIX3b-SF-LAのイベント閾値とスプリット閾値は、XRPIX2b-LAと評価を統一するため、1.3 keV (読み出しノイズの 5.4σ)と0.6 keV (読み出しノイズの 2.5σ)に設定し、以降の評価を行った。また、XRPIX3b-CSA-LAは、XRPIX2b-LAとXRPIX3b-SF-LAよりも分光性能が向上しているため、これらで設定した閾値よりもさらに低い閾値を設定することが可能である。XRPIX3b-CSA-LAの

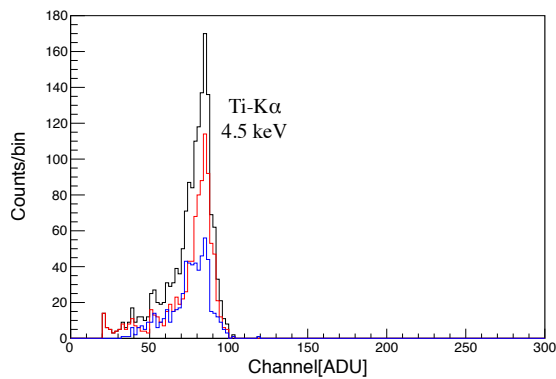
イベント閾値とスプリット閾値はそれぞれ、1.0 keV (読み出しノイズの 7.5σ)、0.42 keV (読み出しノイズの 3σ) に設定し、評価を行った。



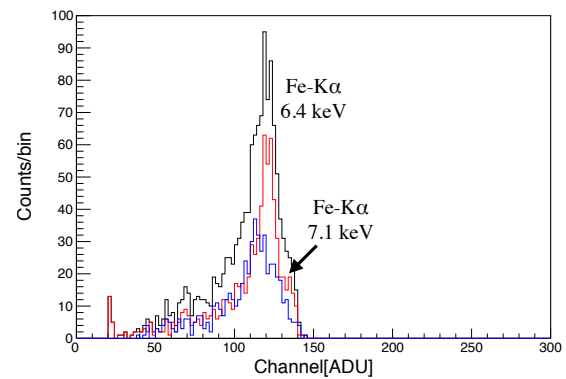
(a) Al ターゲットで得られたスペクトル。



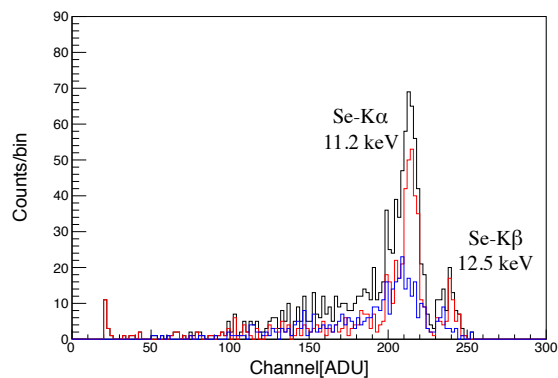
(b) Cl ターゲットで得られたスペクトル。



(c) Ti ターゲットで得られたスペクトル。



(d) Fe ターゲットで得られたスペクトル。



(e) Se ターゲットで得られたスペクトル。

図 4.20: XRPIX3b-CSA-LA で得られた各 X 線スペクトル。

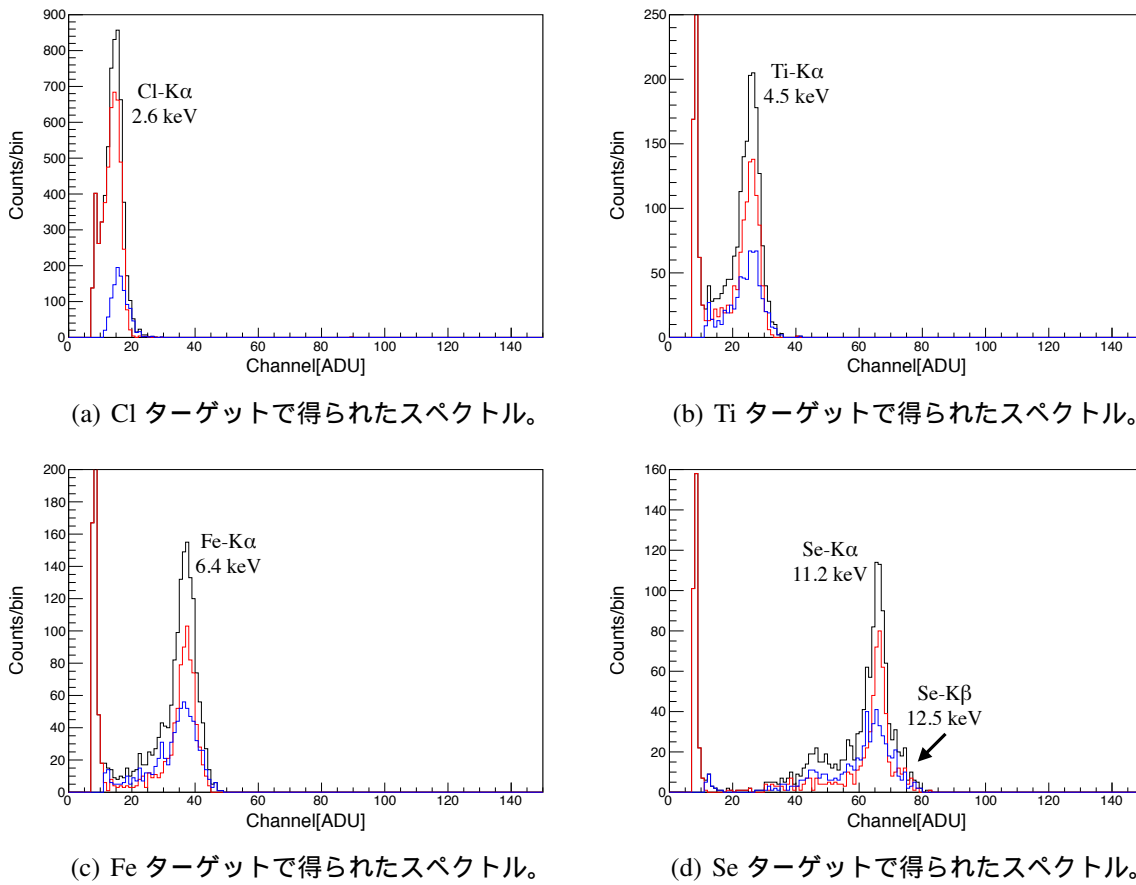


図 4.21: XRPIX3b-SF-LA で得られた各 X 線スペクトル。

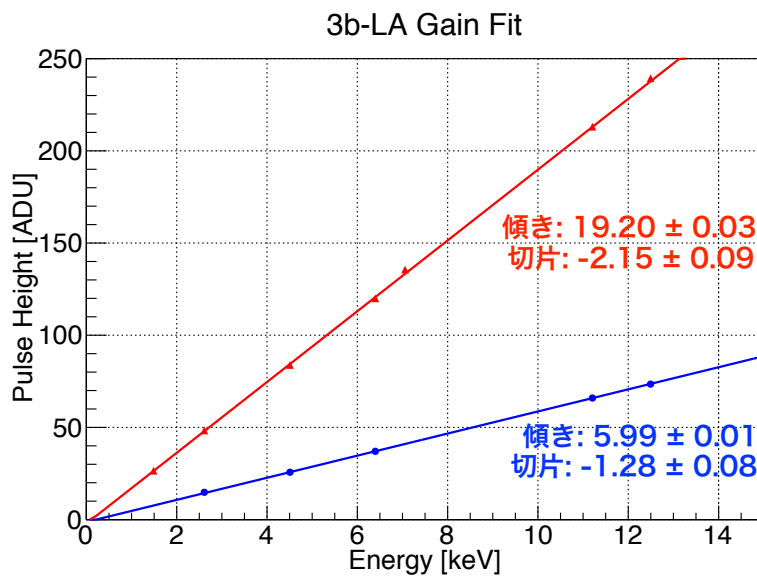


図 4.22: XRPIX3b-LA のエネルギー較正の結果。

4.8.3 検出効率と不感層

印加したバックバイアス電圧値 400 V は 500 μm の XRPIX2b-LA が完全空乏化した 200 V よりも高い電圧値である。したがって、XRPIX3b-LA はバックバイアス電圧値 400 V を印加した時、完全空乏化していると考えられる。4.5.4 項と同様にして、取得した Cl-K から不感層厚を算出すると、XRPIX3b-SF-LA では $0.96 \pm 0.30 \mu\text{m}$ 、XRPIX3b-CSA-LA では $0.46 \pm 0.30 \mu\text{m}$ であることがわかった。また、4.6 節と同様に TCAD デバイスシミュレーションを行い、バックバイアス電圧が 400 V を印加した状態の XRPIX3b-LA を再現した。図 4.24 はその結果を示す。このシミュレーション結果は XRPIX3b-CSA-LA で算出した不感層厚と矛盾ない結果である。また、シミュレーション結果からわかるように $\sim 0.5 \mu\text{m}$ という不感層は現状の LA 処理で出すことのできる最大性能であることがわかる。裏面に 0.2 μm の Al 遮光膜をつけたとしても、要求値 1 μm を完全に達成することができることが示された。

図 4.24 から、裏面から 0.5 μm 程度に広がる高濃度のリンによって空乏層の広がりを制限されている。つまり、このドーピングリンの濃度分布の広がりをさらに薄く抑えることができれば、より薄い不感層を実現することができる。LA 処理でリンの分布を拡散させるパラメータとして考えられるのは、インプラント際のリンイオンのエネルギーとアニールの際のレーザーの出力である。今後、低エネルギーかつ低出力の LA 処理によりさらに薄い不感層を目指し、我々が目指す広帯域撮像分光ができる素子を実現する。

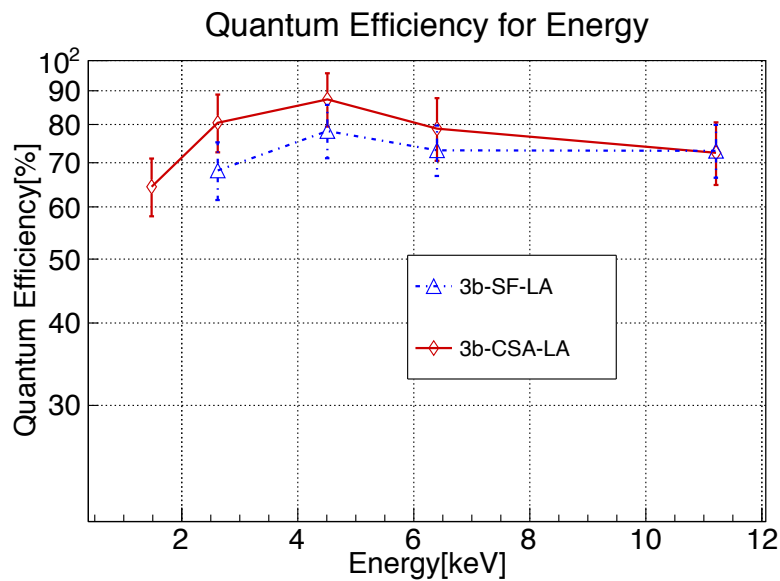


図 4.23: XRPIX3b-LA における検出効率とエネルギーの関係。

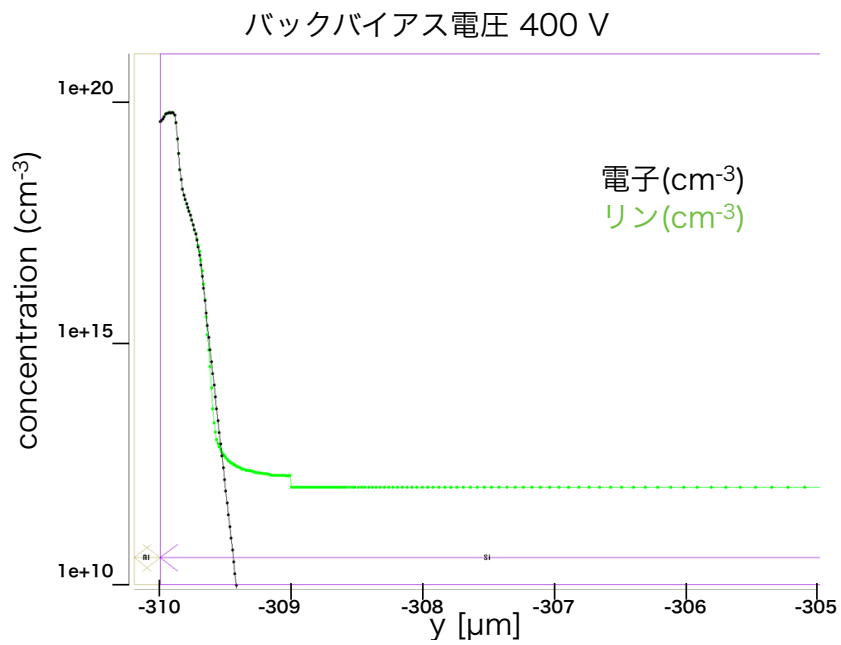


図 4.24: XRPIX3b-LA におけるデバイスシミュレーション結果。

第5章 PZ処理を適用したXRPIXの軟X線感度の測定

5.1 XRPIX2b-PZの仕様

5.1.1 PZ処理について

PZ処理は、ローレンス・バークレー国立研究所で開発されたイオンインプラント+低温アニール処理 [23] で、LA処理とは違う熱処理を行う。PZ処理は以下のような手順で行われる。まず、素子を薄くした後、 -160 の環境下で 33 keV のエネルギーのリンイオンをドーピングすることで、裏面に薄いp層を作る。次に、 500 の温度で10分程度アニールすることで結晶構造を回復させる。

SIMS測定ならびにSRA測定を行い、裏面付近のリンとキャリアの濃度分布を調査した。図5.1はXRPIX2b-PZのSIMS測定の結果である。XRPIX2b-PZにおいてSRA測定は測定不可能であったため、使用した素子のキャリア濃度分布を実際に行うことはできなかった。M. Battaglia, et al., NIM A 674 (2012) 51. で別のSOIピクセル検出器にPZ処理を施した際のSRA測定の結果について記載があり、図5.2にその結果を示す。図5.1と図??を比較すると、裏面からの $0.2\text{ }\mu\text{m}$ のところではリンの濃度分布に両者とも肩が見え、おおよそ実測のSIMS測定は矛盾はない。以上から、前章の実験結果ならびにTCADデバイスシミュレーションから得た結果から判断すると、XRPIX2b-PZのキャリア密度分布および図5.2のような分布であれば、不感層としての最大性能は $\sim 0.4\text{ }\mu\text{m}$ であるといえることができる。

5.2 XRPIX2b-PZにおける軟X線裏面照射実験

5.2.1 取得データについて

LA処理をしたXRPIX同様、取得したデータについて表5.1にまとめる。XRPIX2b-PZにおけるデータ取得条件は、各X線に対して、露光時間を 10 msec に設定し、 20 V から 70 V まで 10 V 刻みでデータを取得した。また素子の温度は -50 で駆動させ試験を行った。

5.2.2 エネルギースペクトルとゲイン

XRPIX2b-PZで得られたエネルギースペクトルを図5.3に示す。バックバイアス電圧は 70 V を印加し、取得したものである。得られたシングルピクセルイベントのエネルギー

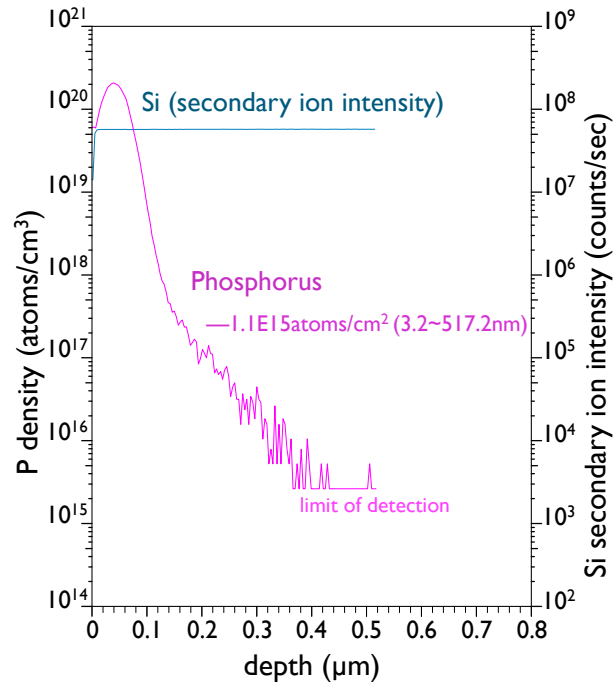


図 5.1: XRPIX2b-PZ における SIMS 測定結果。裏面でのリンの濃度分布を示す。

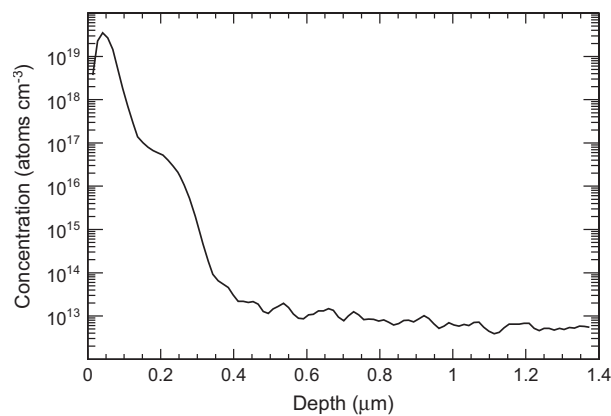


図 5.2: PZ 処理を行った SOI ピクセル検出器における SRA 測定結果 [23]。裏面でのキャリア濃度分布を示す。

表 5.1: XRPIX2b-PZ で取得した X 線データ一覧。

ターゲット	バックバイアス電圧値 [V]	取得フレーム数
Cl	40–70	10000
	30	20000
Ti	40–70	55000
	20、30	110000
Fe	40–30	45000
	20、30	90000
Se	20–70	35000

スペクトラムを用いて、輝線の中心エネルギーを求めることでエネルギー較正を行った。それぞれのスペクトルに対して、ガウシアンでフィットした。また、Fe、Seについては $K\alpha$ 、 $K\beta$ 輝線が分離できているため、二つのガウシアンで両者はフィットした。図 5.4 は、これらの結果を一次関数でフィットした結果を示し、その傾きから XRPIX2b-PZ のゲインを算出した。式 (4.3) から XRPIX2b-PZ のゲインを計算すると、 $6.90 \pm 0.02 \mu\text{V}/e^-$ であった。また、この結果から読み出しノイズは $53e^-$ (0.2 keV) である。イベント閾値とスプリット閾値はそれぞれ、XRPIX2b-LA、XRPIX3b-SF-LA と統一して、読み出しノイズの 6σ (1.3keV)、 3σ (0.6 keV) に設定し、XRPIX2b-PZ の軟 X 線の裏面性能評価の解析を行った。

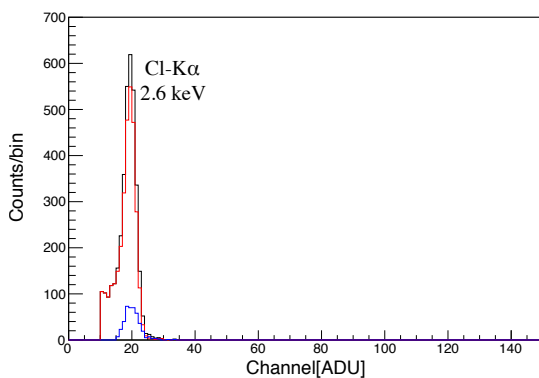
5.2.3 実験結果 1: 空乏層の広がり

XRPIX2b-LA と同様に XRPIX2b-PZ のセンサー層が完全空乏化するバックバイアス電圧を調べる。評価方法としては、XRPIX2b-LA と同様に Se K 輝線を用いて検出効率とバックバイアス依存性を調べる方法をとった。Se $K\alpha$ (11.2 keV、減衰長 $176 \mu\text{m}$)、 $K\beta$ (12.5 keV、減衰長 $243 \mu\text{m}$) 輝線を多色 X 線照射システムを用いて裏面側から照射した。露光時間 10 msec、温度 -50 度、35 万フレームのデータを取得し、検出効率を算出した。図 5.5 は Se K 輝線の検出効率とバックバイアス電圧依存性を示す。図から検出効率はバックバイアス電圧値が 30V 以上であまり変化がないことが分かる。また、チャージシェアリングイベントについてみる。バックバイアス電圧値が大きくなるにつれて、シングルピクセルイベントの検出効率は増えているのに対し、ダブルピクセルイベントの検出効率はバックバイアス電圧値 20V から 30V で増えるが、30V 以降減っているのが分かる。これはよりセンサー層間の電場が強くなり、電荷雲の大きさが小さくなったためだと考えられる。以上より、完全空乏化に至るバックバイアス電圧は 30 V であるとわかった。

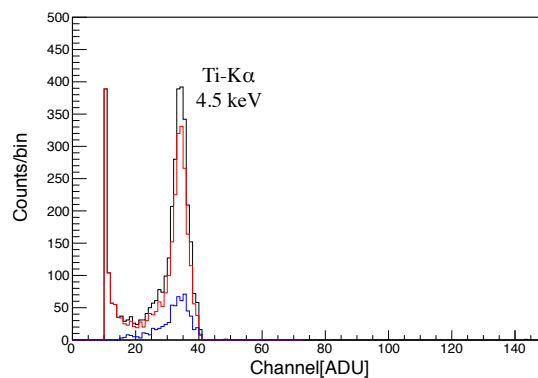
このことから、2b-PZ のウェハの抵抗率を算出する。空乏層厚 $W_{dep} = 62 \mu\text{m}$ 、バックバイアス電圧 $V = 30 \text{ V}$ として、式 2.5 に代入すると、2b-PZ の抵抗率 ρ は $0.41 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ であることがわかった。このことからウェハの P のドーパ量は $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ となる。これは図 5.2 と矛盾ない結果であることがわかる。

また、図 5.6 は XRPIX2b-PZ の検出効率とエネルギーの関係と、検出効率のバックバイアス依存性も示す。XRPIX2b-LA と同様に XRPIX2b-PZ もバックバイアス電圧が上がる

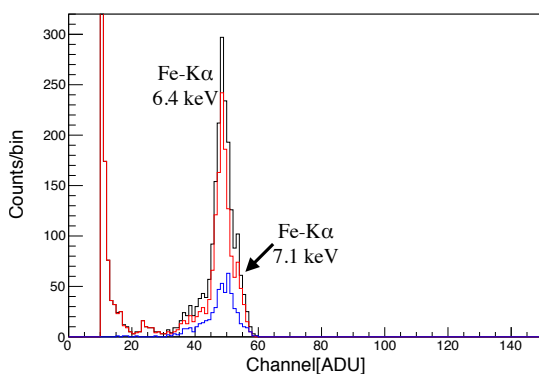
と、各エネルギーに対する検出効率も向上している。XRPIX2b-PZはセンサー層が $62\ \mu\text{m}$ と薄い。そのため、Se-Kのような高エネルギー X 線の多くは吸収されず、他素子よりも Se-K の検出効率が低い。



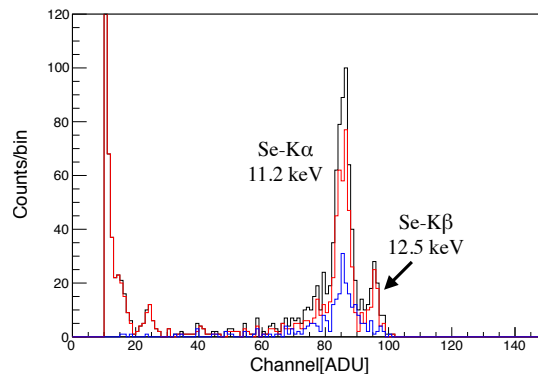
(a) Cl ターゲットで得られたスペクトル。



(b) Ti ターゲットで得られたスペクトル。



(c) Fe ターゲットで得られたスペクトル。



(d) Se ターゲットで得られたスペクトル。

図 5.3: XRPIX2b-PZ で得られた各 X 線スペクトル。図中の赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベント、黒線は X 線と判定されたイベントを足し合わせたものである。

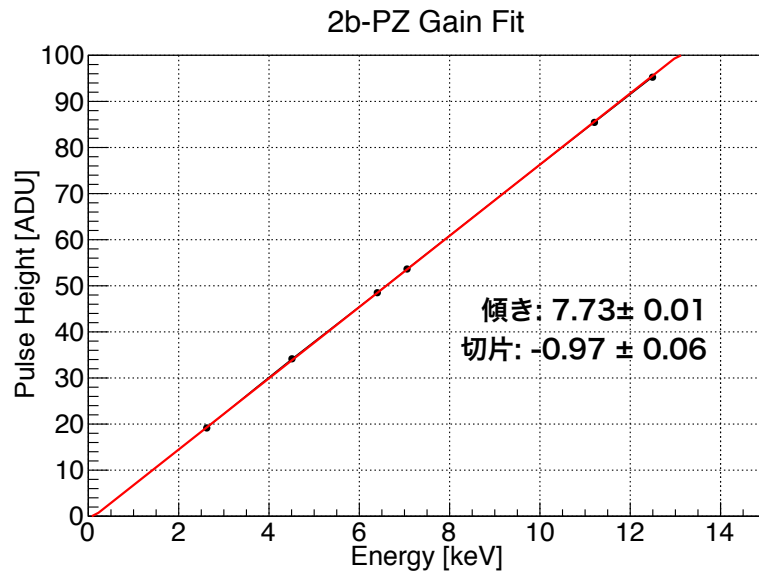


図 5.4: XRPIX2b-PZ における Se-K の検出効率のバックバイアス電圧依存性。

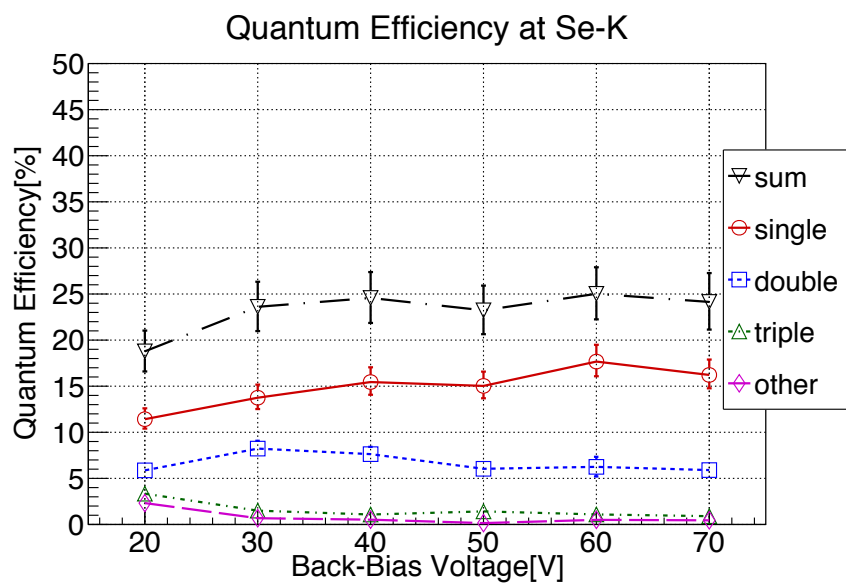


図 5.5: XRPIX2b-PZ における Se-K の検出効率とバックバイアス電圧依存性。

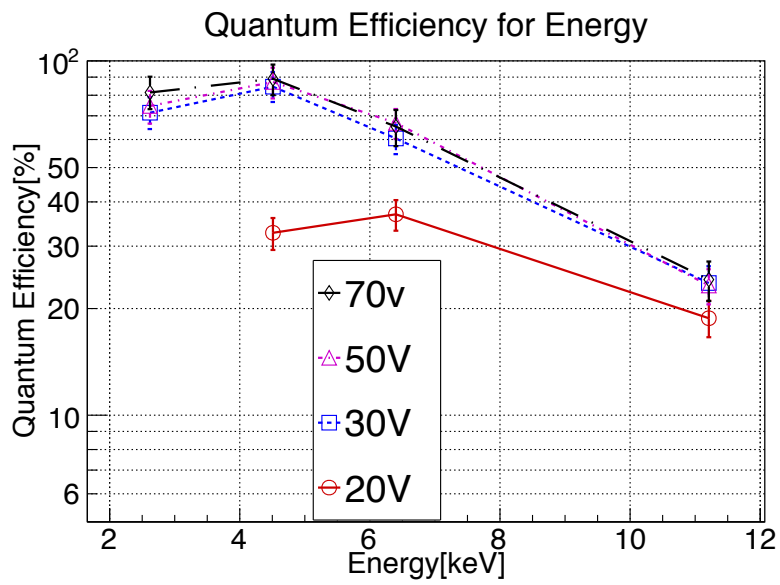


図 5.6: XRPIX2b-PZ における検出効率とエネルギーの関係。

5.2.4 実験結果 2: 不感層の厚み

5.2.3 項で見たように、2b-PZ は 30V 以上で完全空乏することがわかった。従って、30V 以上のバックバイアス電圧をかけ、より電荷収集効率を上げた状態で裏面における不感層厚を求める。

式 4.5 より、XRPIX2b-PZ は Al 遮光膜は付いていないことを考慮して算出する。バックバイアス電圧値が 70V の時の検出効率から不感層厚を求めれば、 $0.61 \pm 0.31 \mu\text{m}$ と求められる。この結果は図 5.2 で得られた SRA 結果から見ても矛盾ない結果である。すなわち、XRPIX2b-PZ においても $0.2 \mu\text{m}$ の Al 遮光膜をつけたとしても、要求値 $1.0 \mu\text{m}$ を達成することがわかった。また、XRPIX2b-PZ における空乏層の広がり和不感層厚は、LA 処理で見られたものと同様に、リンの広がりによって制限されていることがわかった。

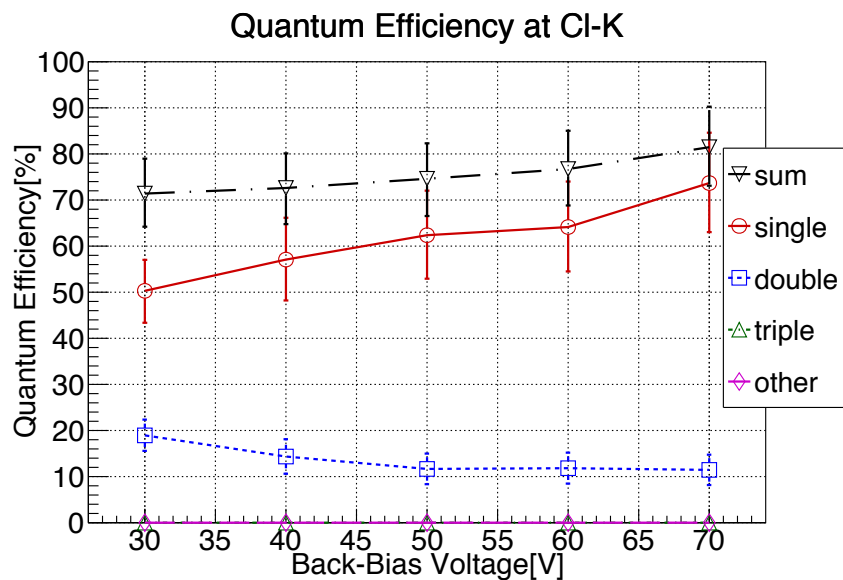


図 5.7: XRPIX2b-PZ における Cl-K の検出効率とバックバイアス電圧依存性。

第6章 まとめ

本論文では、次世代 X 線天文衛星搭載に向けた広帯域撮像分光器の開発を目標に、その観測器である裏面照射型 XRPIX の軟 X 線感度の現状から問題点を抽出し、改善点を見つけるに至った。

裏面処理の異なる二つの裏面照射型 XRPIX で軟 X 線照射実験を行い、デバイス構造についてシミュレーションした結果わかったことは、

- LA 処理、PZ 処理の不感層厚はそれぞれ $\sim 0.5 \mu\text{m}$ 、 $\sim 0.6 \mu\text{m}$ で、不感層の要求性能値である $1 \mu\text{m}$ を達成している。
- LA 処理における実験結果は TCAD シミュレーションで再現することができた。
- LA 処理、PZ 処理のいずれも、裏面におけるドナーの広がりが空乏層の成長を制限している。

ということである。

以上を踏まえて今後は、薄い不感層を得るためにドナーの広がりを抑制することを行う。LA 処理の場合、インプラントするイオンのエネルギーを抑え、さらにレーザーの出力を抑えることでドナーの広がりを抑えることが可能であれば、さらに薄い不感層を得る。また、物理的に不感層が薄くなってもイベントとして読み出すことができなければならぬため、XRPIX3b-CSA よりも読み出しノイズが低く分光性能が高い素子の開発を同時に進める。以上をもって、さらに軟 X 線感度の高い撮像分光器の開発を進める。

謝辭

参考文献

- [1] D. Maoz et al. 2014, ARAA 52 107.
- [2] B. W. Grefenstette et al. 2014, Nature, 506, 339.
- [3] S. Park et al. 2013, ApJL 767, L10.
- [4] H. Yamaguchi et al. 2015, ApJL 801, L31.
- [5] J. Whelan & I. Iben, 1973, ApJ186, 1007.
- [6] I. Hachisu, M. Kato & K. Nomoto 1996, ApJL 470, L97.
- [7] R. F. Webbini 1984, ApJ 277, 355.
- [8] R. Pakmor et al. 2010, Nature, 463, 61.
- [9] T. Tamagawa et al. 2009, PASJ 61, S167.
- [10] M. Liebendörfer et al. 2001, Physical Review D 63, Issue 10.
- [11] M. Rampp et al. 2002, A&A 396, 361.
- [12] T. Thompson et al. 2003, ApJ, 592, 434.
- [13] K. Sumiyoshi et al. 2005, ApJ, 629, 922.
- [14] N. Tawa et al. 2008, PASJ 60, S11.
- [15] K. Koyama 2007, PASJ, 59, S22.
- [16] Y. Arai et al. 2010, NIM A, doi:10.1016/j.nima.2010.04.081
- [17] S. M. ジー. 半導体デバイス. 南日康夫、川辺光央、長谷川文夫訳. 産業出版, 2004, p17
- [18] K. Hamaguchi, et al., NIM A 450 (2012) 360.
- [19] T. Uchida. 2008, IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE. 55, 1631.
- [20] 劉周強. 京都大学, 2010, 修士論文.
- [21] A. Takeda, et al., J. Instrum. 10 (2015) C06005.

- [22] 3D TCAD Simulator HyENEXSS, Developed by Selete. Semiconductor Leading Edge Technologies Inc.
- [23] M. Battaglia, et al., NIM A 674 (2012) 51.

