修士論文

軟ガンマ線カメラ構築に向けた撮像型のシリコン半導体ストリップ検出器の開発

M042466　澤本直之

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

平成 18 年 2 月

概 要

100 keV から 1 MeV のエネルギー領域における宇宙ガンマ線観測は、次世代観測衛星の検出器グループが開発を進めている半導体コンプトン望遠鏡の実現によって大幅に開拓されると期待されている。広島大学では、その構成に必要な高速読み出しのできる X 線イメージセンサーとして、シリコンストリップ検出器 (SSD) の開発を進めてきた。これまで小型の両面シリコンストリップ (DSSD) において、コンプトン望遠鏡の原理的な限界に迫ることのできるエネルギー分解能と、硬 X 線での撮像を達成している。次期の天文衛星プロジェクトでコンプトン望遠鏡を SSD によって実現させるため、2 つの研究をおこなった。

ひとつは、DSSD の容量を低減させることと望遠鏡の構成に必要な大面積 DSSD の性能評価である。半導体検出器では、それ自体の電気容量が雑音の原因となるため、DSSD のストリップを長さ方向で分割し低容量化を試みた。原理どおりの検出器容量が得られ、X 線に対するエネルギー分解能は 10 % 以上も向上している。有効な手法であることが確認でき、今後の製作において選択肢のひとつとなる。面積を 2 倍以上に拡大した、4 cm×4 cm の新しい DSSD の性能評価をおこなった。コンプトン望遠鏡にはさらに大型の 5 cm×5 cm が要求されており今後の大面積化をおこなうための予備的な試験である。リーク電流、検出器容量ともに、素子の拡大に伴う程度の増加となっており、X 線のエネルギー分解能も小型の DSSD と遜色ない性能であることを実証した。

DSSD とは別に、これまでの開発実績を生かして、DSSD に対して製造コストの削減や歩留まりの向上、読み出しやすさなどを向上させるため、片面の 2 次元 SSD を新規に開発した。試作素子は、p+と n+の両方を片側表面のみに配置してダイオードを形成させており、電極構造と共に独自の形状になっている。また、ストリップ構造であるので CCD のようなピクセルに比べて省チャンネル化と速い読み出しを期待している。赤色レーザー光に対しては 2 次元位置情報が得られ、100 keV 程度までの X 線ではスペクトルを取得することにも成功しており、撮像型の検出器としての高い有望性が得られている。その一方で、赤外線によって素子内部をスキャンした結果、有感領域である空乏層が内部で一様ではないことを明らかにし、つぎの試作に向けた電極構造の見直しの指針を得た。

目 次

第 1 章　序論 **6**

1.1　宇宙 X 線・ガンマ線観測 6

1.2　次世代衛星 NeXT 計画と半導体検出器 7

1.3　目的 9

第 2 章　シリコン半導体検出器の基礎特性 **10**

2.1　半導体検出器 10

2.1.1　検出原理 10

2.1.2　半導体検出器と p-n 接合ダイオード 10

2.2　シリコン半導体検出器の基礎 11

2.2.1　Leakage Current 12

2.2.2　Capacitance 13

2.2.3　信号読み出し 14

2.2.4　エネルギー分解能 15

第 3 章　両面シリコンストリップ検出器の性能評価 **19**

3.1　はじめに / DSSD の開発状況 19

3.2　2.5 cm 四方の小型 DSSD 19

3.2.1　基礎特性 I-V、C-V 20

3.2.2　X 線応答の線形性 21

3.3　ストリップを 2 分割した DSSD 22

3.4　大面積の DSSD 26

3.4.1　Leakage Current、Capacitance 26

3.4.2　X 線応答 26

第 4 章　片面二次元ストリップ型放射線イメージセンサー **32**

4.1　試作素子の構造 32

4.2　基礎特性 36

4.2.1　Leakage Current 36

4.2.2　Capacitance 38

4.3　X 線応答 40

4.4　空乏層の状態 43

4.4.1　測定の原理 43

4.4.2 計測セットアップ・計測方法 44
4.4.3 試作素子の赤外線スキャン結果 48
4.4.4 空乏領域の分布 53
4.5 今後の素子試作についての考察 54

第 5 章 まとめ **56**

表 目 次

3.1 小型 DSSD の基本設計の比較 [7] 20
3.2 大面積 DSSD の基本設計 26
3.3 蛍光 X 線のエネルギー 29

4.1 試作素子の仕様 33

図 目 次

1.1 半導体多層コンプトンカメラの概念 7
1.2 吸収係数 [11] 8

2.1 p-n 接合ダイオードの概念 11
2.2 両面シリコンストリップ検出器の基本的な構造 12
2.3 Body Capacitance と Interstrip Capacitance 13
2.4 読み出しシステムのブロック図 14
2.5 検出器と CSA の一般的な接続例 15
2.6 検出器を両面から読み出す場合の接続例 15
2.7 RC チップをもちいて AC 結合させた例 18

3.1 リーク電流の比較 20
3.2 Total Body Capacitance の比較 20
3.3 X 線計測用セットアップのブロック図 22
3.4 DSSD で得られた X 線スペクトル。上から順に ^{241}Am、^{133}Ba、^{109}Cd。 23
3.5 (左)ADC-channel と X 線エネルギーの対応。(右) 変換後の差。 . . . 24
3.6 2 分割 DSSD の模式図 24
3.7 2 分割 DSSD の基礎特性 25
3.8 X 線計測によって得たエネルギー分解能 25
3.9 X 線計測セットアップのブロック図 27
3.10 4 cmDSSD で取得した ^{57}Co の X 線スペクトル (p-strip#P30) 28
3.11 20 °C と 0 °C でのエネルギー分解能 29
3.12 約 50 keV までを拡大したスペクトル 30
3.13 散乱角度に対する反跳電子の持つエネルギー 31

4.1 試作素子 33
4.2 素子表面の拡大写真 33
4.3 電極構造の模式図と、その断面の様子 34
4.4 p^+「枝」の部分での構造の違い (断面図) 35
4.5 リーク電流の測定結果 36
4.6 リーク電流の温度依存性 37
4.7 ガードリングのリーク電流 37
4.8 検出器容量の測定結果。C-V カーブ。 38

4.9 空乏層が素子の表面付近をひろがっていく様子 (想像図) 39
4.10 素子の断面を空乏層がひろがっていく様子。(想像図) 40
4.11 X 線計測を行なったセットアップのブロック図 40
4.12 素子と計測器の接続回路図 41
4.13 試作素子で取得した Ba の X 線スペクトル。20 °C 42
4.14 赤外線で空乏層の厚さを測定する概念 44
4.15 光の波長と吸収長の関係 45
4.16 赤外線照射用セットアップの模式図 46
4.17 データ取得系のブロック図 46
4.18 レーザー発光用セットアップのブロック図 47
4.19 レーザーの照射位置 47
4.20 発光時間とレーザー強度の関係 48
4.21 ^{133}Ba の X 線スペクトルとレーザー強度の比較 49
4.22 フォトダイオードの検出器容量とパルスハイトのバイアス電圧依存性 49
4.23 照射位置とその番号 50
4.24 バイアス電圧の違いによるパルスハイトの差。位置「1」。 50
4.25 赤外線スキャンの結果「P-side」 51
4.26 赤外線スキャンの結果「N-side」 52
4.27 n^+ ストリップ下方にできる空乏層の様子 53
4.28 評価結果から予想される空乏層の様子 (断面図) 54

第1章　序論

1.1　宇宙X線・ガンマ線観測

近年、X線などによる天文学の理解がすすむにつれ、硬X線や軟ガンマ線など高いエネルギー帯域で精度の良い観測を行うことが今まで以上に必要になってきた。たとえば、ジェット起源のシンクロトロン放射は輻射メカニズムが周囲の磁場構造によってきまると考えられており、このようなブラックホール近傍でおこっている高エネルギー現象は、その放射の偏光をX線で観測することが構造解明の有力な手段のひとつになっている。銀河団、超新星残骸などの高エネルギー天体からも、相対論的エネルギーまで加速された粒子が非熱的な制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などを起こし硬X線・ガンマ線の広い波長域に信号を出していると考えられ、これら電磁放射を観測することで加速機構でおきている物理過程や構造の解明が可能になると考えられている。

しかし、硬X線・軟ガンマ線の波長域では光電吸収の確率が低く、大部分がコンプトン散乱による検出となってしまう。そのため、撮像観測や精度のよいエネルギー計測を行なうことができないのである。また、この波長域では目標の天体からのフラックスが小さく、バックグランドが大きいのでよい感度を得ることが難しく、詳しい解析がなされていない未解決のままの現象が残っているため、このエネルギー領域は現在まさによい研究対象となっている。

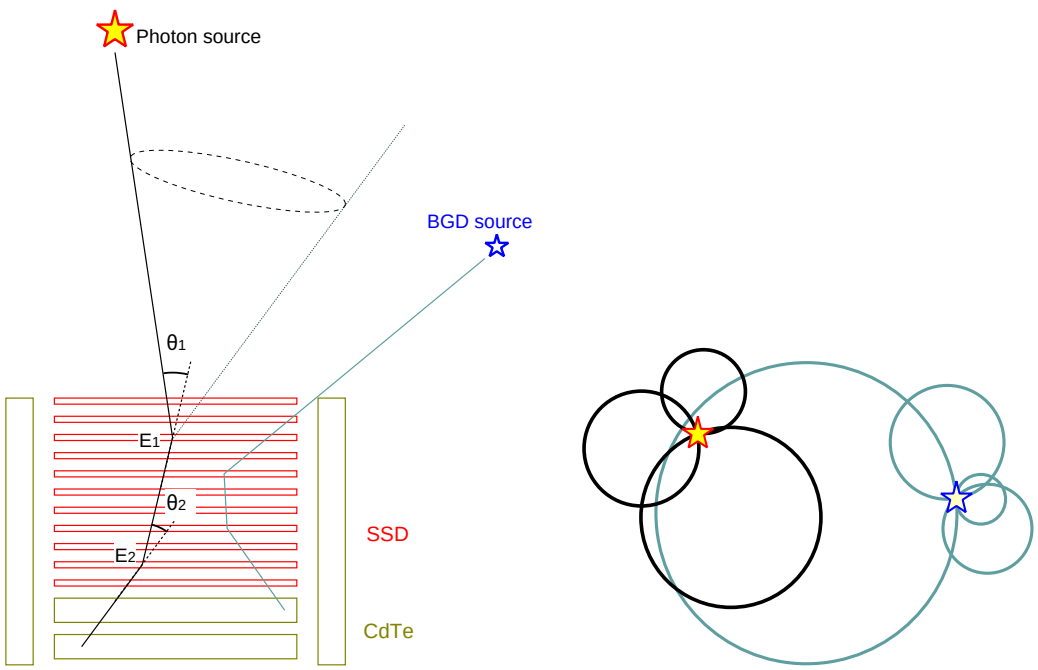
日本の科学衛星・ASTRO-E2(すざく)は従来の衛星よりも高いこのエネルギー帯域をねらって精度のよい観測をおこなうべく、2005年7月10日に打ち上げられた。現在はすでに観測がはじまっており、とくに我が研究室がかかわってきた硬X線検出器・HXDは、撮像能力は持たないが、数十から数百keVにおいて過去にはない感度で観測をおこなっている。

硬X線からガンマ線のエネルギー帯域で精度のよい観測が遅れているのは、この領域では、光子と物質が相互作用する確率が低くとらえにくいという技術的な問題があったためである。すざくHXDが活躍をはじめた現在も、軟ガンマ線の撮像観測では遅れをとっているのが実情である。

1.2 次世代衛星 NeXT 計画と半導体検出器

天文学上の謎は、現在だけでなくこれまでにも多く存在してきた。技術的に観測がむずかしいことが大きな理由のひとつであるが、過去の科学衛星は新しい手法によって観測成果をあげ、これらの謎の理解をすすめてきた。現在ある謎や困難も、この先に計画される衛星プロジェクトによって解明に向かっていくだろう。次世代の衛星プロジェクト NeXT(Non-thermal energy eXploration Telescope [2]) には、観測の遅れている硬 X 線からガンマ線領域を高感度で観測するために「コンプトンカメラ」という手法が提案されている。これは検出器中でおこるコンプトン散乱を活用することに特徴がある。いままでの場合、ガンマ線は検出器内でコンプトン散乱を起こし、もっていたエネルギーの一部を電子に与えた後、検出器から抜け出ていく。この散乱された 2 次ガンマ線も検出することで、入射ガンマ線のエネルギーだけでなくその到来方向までも決めることができるというものである。この考えに基づいた次世代の検出器として半導体多層コンプトンガンマ線カメラが候補に挙がっており、NeXT 衛星への搭載を目指した開発が行われている。

半導体多層コンプトンガンマ線カメラの基本構造を図 1.1 に示す。シリコンやテルル化カドミウムなどの半導体検出器を数十層にわたり積み重ね、その中で複数回のコンプトン散乱をさせて最後には光電吸収をさせるという方法である。



(a)Si/CdTe コンプトンカメラの基本構造　(b) 複数イベントの重ね合わせ

図 1.1: 半導体多層コンプトンカメラの概念

入射ガンマ線光子の散乱による反跳電子のエネルギー E_1、E_2、散乱された角度 θ_1、θ_2、光電吸収されたエネルギー E_3 とすると、エネルギー保存則と運動量保存則から、次の式が成立する。

$$cos\theta_1 = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2 + E_3} - \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \tag{1.1}$$

$$cos\theta_2 = 1 + \frac{m_e c^2}{E_2 + E_3} - \frac{m_e c^2}{E_3} \tag{1.2}$$

これにより、一つの入射光子の到来方向を頂角θ の円錐面に制限することができる。さらに、複数のイベントを重ね合わせることで天体の位置を求め、天体以外からの X 線・ガンマ線などのバックグラウンドを除去することも可能となる (図 1.1(b))。

式 1.2 が示すように、光子の到来方向は、エネルギー E_1、E_2、E_3 を検出器がどれだけ精度よく測定できるかで決まってしまう。反応位置の正確さも、もちろん重要である。また、コンプトンカメラとして効率良く動作させるには、コンプトン散乱が光電吸収よりも多く起きることも必要となる。吸収係数を比較してみると分かるが、Si は数 MeV までの領域でガンマ線を散乱させやすい。半導体コンプトン望遠鏡の主検出部、兼、ガンマ線散乱体にはシリコン半導体検出器が適していると言える。

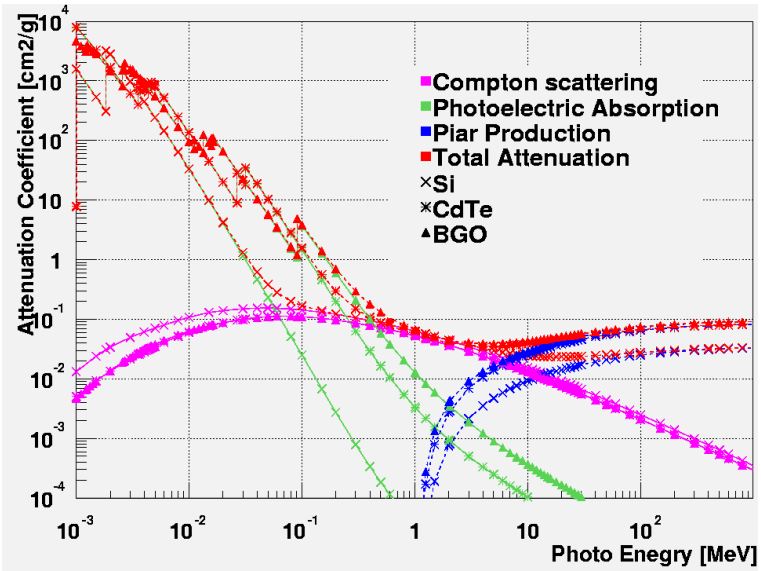


図 1.2: 吸収係数 [11]

1.3 目的

10 keV から 300 keV のエネルギー領域における宇宙ガンマ線観測は、次世代観測衛星 NeXT の検出器グループが開発を進めている Si/CdTe コンプトン望遠鏡の実現によって得られる過去最高の感度と偏光観測によって大幅に開拓されると期待されている。この望遠鏡の構成には、我々の研究グループが数年間にわたり開発を続けているシリコンストリップ検出器 (SSD) が採用されることになっており、近年では、多チャンネルの信号読み出し用 LSI が開発されたことにより、SSD と組み合わせた多チャンネル同時計測システムが立ち上げられ、コンプトンカメラの試作・実証試験などが行なわれはじめるようになった。

コンプトン望遠鏡を実現させるには、それを構成する要素が高い性能をもってい必要がある。SSD に求められる性能として、まず、X 線用のイメージセンサーでなければならない。そして、X 線計測を行なうために優れたエネルギー分解能を持っている必要がある。とくにコンプトン望遠鏡を構成する場合、構成要素のもつエネルギー分解能が望遠鏡全体の性能を左右するため、重要な項目である。これらについては、すでに小型の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の開発がおこなわれ、多チャンネル同時計測による撮像能力の実証と、目標とするエネルギー分解能をもつことが実証されている。

現在は、次期の X 線天文衛星プロジェクトとして実現させるため、半導体コンプトン望遠鏡の試作も次のステップに進み、DSSD もフライト品の開発を進めはじめる段階になっている。そこで本研究では、半導体コンプトン望遠鏡の開発状況にあわせ、これまでに行なわれた DSSD 開発の成果と、コンプトン望遠鏡を構築するための要求を踏まえて、実現に必要となる性能を検出器に持たせていくことを目的として DSSD の開発を行なった。

具体的には、X 線計測において優れたエネルギー分解能を達成するために、雑音源となる DSSD の検出器容量を低減させること、また、フライト品製作に向けた素子面積の拡大をおこなった。さらに、これまでの DSSD 開発の経験と実績を基に、片面構造の Si 半導体イメージセンサーを新規に開発した。

第2章　シリコン半導体検出器の基礎特性

2.1　半導体検出器

2.1.1　検出原理

X 線天文学で用いられる検出器にはいくつか種類がある。その中でも、硬 X 線・ガンマ線の検出はこれまで主に固体結晶のシンチレータを使用し検出効率の高いものが作られてきたのだが、エネルギー分解能の良いものは得られてはいなかった。これに対し、良いエネルギー分解能を期待できるのがシリコンやゲルマニウムなどを用いた半導体の検出器である。放射線は物質中の束縛電子と、光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の 3 種の相互作用を起こす。エネルギーを受け取った束縛電子は物質中を動き、飛跡に沿って電子・ホール対が作られる。半導体検出器は、この電子とホールの対を電荷量として取り出すことにより放射線の検出を行っている。

2.1.2　半導体検出器と p-n 接合ダイオード

半導体として知られているものには、炭素 C、ゲルマニウム Ge, シリコン Si、ガリウム砒素 GaAs、テルル化カドミウム CdTe などがある。これら半導体がもつバンドギャップはさまざまで、例えばシリコン Si の場合は 1.12 eV(300 K) である。真性半導体の両端に電圧をかけて内部に電場をつくると、信号となる電荷を効率よく取り出すことができるが、バンドギャップが小さいときもしくは不純物を含んでいるため熱励起されたキャリアが多く存在する場合には雑音源となる。炭素の結晶；ダイヤモンドの場合はバンドギャップが 5.47 eV と大きく、これらの困難はないが、非常に高価であることが問題となる。ほかの多くの半導体では電場をつくることと不要なキャリアを取り除くことが必要である。

このような理由から、半導体を放射線検出器として使用する場合には「空乏化」させることが必要であり、n 型半導体と p 型半導体とを金属学的に結合させて p-n 接合ダイオードを形成したものを用いる。p-n 接合部付近ではキャリアの密度勾配が大きくなるため、p 型へ電子が、n 型へはホールが拡散し、残ったアクセプタイオンとドナーイオンが拡散を妨げるように電場をつくりやがて平衡状態に達する。

接合部ではキャリアのほとんど存在しない「空乏層」と呼ばれる領域が広がり、これが検出器の有感領域となる (図 2.1)。

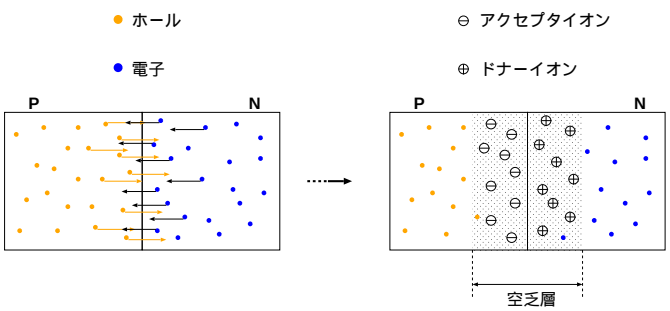


図 2.1: p-n 接合ダイオードの概念

p-n 接合間に逆バイアスを掛けることでキャリアはさらに取り除かれ、残ったイオンがつくる電位差が逆バイアス電圧とつりあうまで空乏層が拡がる。また、内部に電場ができるので放射線の相互作用により生成された電子・ホール対が再結合してしまう前にそれらを効率良く分離・収集することもできようになる。

このように半導体検出器は、空乏化させるためにダイオード構造にして、逆バイアスを印加して用いるのが一般的である。また空乏層を厚くするために、純度の高い半導体結晶を用いる。

p-n 接合ダイオードの検出器として、フォトダイオード、APD、電荷結合素子 (CCD)、CdTe 半導体検出器、シリコンストリップ検出器 (SSD) などがある。近年になって開発が進んできたものもあるが、これら半導体検出器は一般に小型であるうえエネルギー分解能がよいといった特徴がある。宇宙観測衛星や加速器実験においてメインとなる検出器としても採用され、これから考案される検出器においても設計の自由度を広げられる要素であると認識されている。また天文学の分野以外においても、CCD などのように一般的に認知されてきたものもあり、半導体検出器は今後の進展が大いに期待される機器であるといえる。

2.2 シリコン半導体検出器の基礎

半導体検出器のなかでも一般的なのが、CCD やフォトダイオードなどに代表されるシリコン製の検出器である。ダイオードやトランジスタなど電子工学と共通の技術があるため他の半導体にくらべて扱いやすいことなどがその理由となる。

ここではシリコン検出器の基礎的な性質について、本研究であつかうシリコンストリップ検出器を例にして述べていく。

シリコンストリップ検出器 (Silicon Strip Detector: SSD) は、高エネルギー物理学の分野で短寿命粒子のための検出器として開発されたものである。n 型シリコ

ン半導体ウェーハーの上に p^+ 型のシリコン半導体を細く短冊状にならべることで多数の p-n 接合ダイオードが形成され, それぞれのダイオードが独立な検出器のように働いている。このストリップ構造によって位置分解能を持つことができる。X 線が空乏層に入射し n 型半導体バルク内で相互作用を起こした場合、生成されたホールは最も近くにある p^+ 型半導体ストリップに、電子は反対側の n^+ 半導体へとそれぞれ内部の電場に沿って引き寄せられる。信号を出したストリップは X 線の反応位置を 1 次元で表すことになるのである。

p^+ 側だけでなく裏面の n^+ 側にもストリップ構造を持たせたものを両面シリコンストリップ検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector: DSSD) と呼んでいる。DSSD の基本構造を 図 2.2 に示す。n^+ 側のストリップは p^+ 側に対して垂直に配置されている。これにより、信号を出した p・n ストリップはそのまま反応位置の x・y 座標をあらわすことになるため、2 次元で位置検出を行なえるようになる。位置決定精度はストリップの間隔によって決まり、数 10 ~ 数 100 μm の決定精度をもつ。

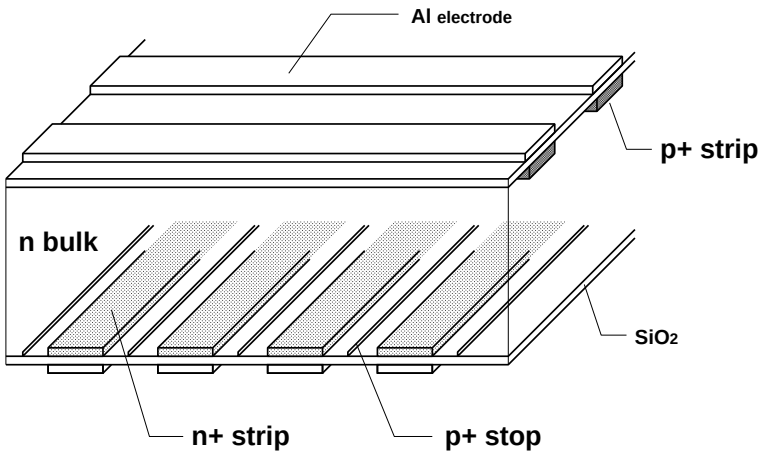


図 2.2: 両面シリコンストリップ検出器の基本的な構造

DSSD の特徴として、高い位置分解能を持つことの他に素早い応答性がある。deadtime が約 30 nsec 程度でこれはプラスチックシンチレータに近い速さである。

2.2.1 Leakage Current

半導体などの絶縁物に電圧を加えると、熱的に励起されエネルギーギャップを越えて伝導帯に遷移した電子・ホールによって数 nA 程度の直流電流が流れる。これをリーク電流という。電気的に扱う信号が小さい半導体検出器では、回路系の雑音となってしまう。半導体結晶内に存在する不純物がエネルギーギャップの中間に新たなエネルギー準位を作り電子・ホールの遷移を助けていることがリーク電

流発生の原因のひとつである。DSSD ではこれ以外にも、ダイオード構造や電極などがシリコン中の電場構造を乱すことでリーク電流が生じる。また、放射線による検出器の損傷、特にバルク損傷による結晶の乱れもリーク電流の増加につながっている。リーク電流は周囲の温度に影響を受け、一般に次の式で表される。

$$I(T) \ \propto \ T^2 \exp\left(-\frac{E_{\rm g}}{2k_{\rm B}T}\right) \tag{2.1}$$

ここで、温度：T、エネルギーギャップ：E_g、ボルツマン定数：k_B、である。常温付近では、7 度の上昇で約 2 倍のリーク電流の増加になってしまうが、低温下で動作させればリーク電流を十分に減らすことが可能である。

2.2.2 Capacitance

一般に半導体検出器は、それ自体が有限な大きさを持つ絶縁体であるので電気容量を持っており、これは電気的なノイズの要因となる。DSSD で重要となる容量は 2 つある。ひとつは Body Capacitance で、p^+ ストリップと n^+ ストリップとの間に形成されている (図 2.3)。逆バイアスをかけ空乏層を広げるにつれて容量は減っていき完全に空乏層が広がると容量値は一定になる。

もうひとつは、Inter-strip Capacitance である。これはあるストリップとその近隣のストリップとの間に形成されているもので、Body Capacitance と同様に空乏層が広がるとその容量値は減っていく。DSSD は n^+ ストリップの構造を維持するため、n^+ ストリップを取り囲むように電気的に浮いた状態の細い p^+ ストリップ (p-stop または p-block と呼ばれる) がつくられている。n^+ 側はこの p^+ 構造との間にも容量を持つ。Inter-strip Capacitance は両隣のストリップからの寄与がそのほとんどである。

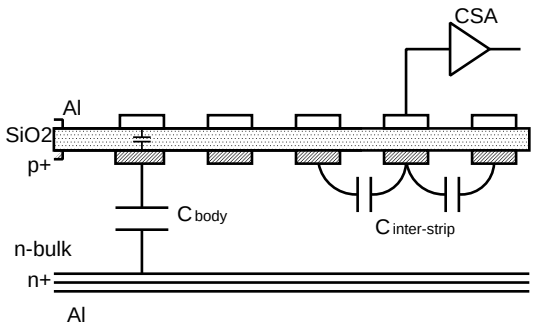


図 2.3: Body Capacitance と Interstrip Capacitance

検出器のもつ容量は平行板コンデンサを仮定することにより、

$$C \ [\mathrm{pF}] \ = \ \varepsilon_{\rm Si} \ \varepsilon_0 \ \frac{S}{d} \tag{2.2}$$

と近似することができる。真空の誘電率：ε_0 (=8.85×10^{-12} [F/m])、シリコンの比誘電率：$\varepsilon_{\rm si}$ (=11.9)、検出器の面積：S、厚さ：d、である。DSSD では式 (2.2) で見積もられる容量は Body Capacitance に相当する。

最初にも述べたように、検出器の容量は電気的なノイズの原因となるため、できるだけ低容量な検出器を開発することが重要になってくる。

2.2.3 信号読み出し

半導体検出器から出力されるシグナルは、X 線と検出器との相互作用によって生じた電荷である。信号読み出しは、この電荷をプリアンプ (前置増幅器、Charge Sensitive Amplifier: CSA) に入力して増幅し、波形整形や AD 変換などを行なうという流れになっている (図 2.4)。半導体検出器は逆バイアスをかけて使用するため、ごく一般的に検出器と増幅器の接続には、その間にコンデンサを介して直流電流 (リーク電流など) をカットする接続方法が用いられる。この方法で接続した例を図 2.5 に示す。

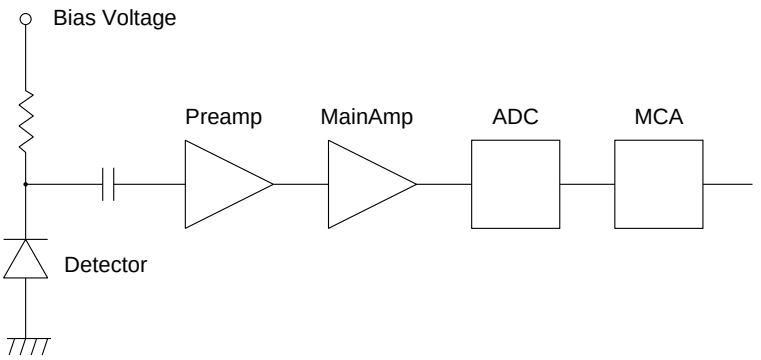


図 2.4: 読み出しシステムのブロック図

検出器で生じた電荷は、カップリングコンデンサ : $\rm C_c$ に一度集められたのちに増幅器に入力される。この例ようなコンデンサを介した接続方法を、AC 結合 (交流結合) という。信号電荷はカップリングコンデンサだけでなく、検出器自身が持っている容量などにも分散して分配されている。電荷の収集効率：ρ は他の容量との比できまっており、

$$\rho = \frac{C_{\rm c}}{C_{\rm c} + C_{\rm d} + C_{\rm etc}} \tag{2.3}$$

となる。検出器の容量：$\rm C_d$、その他の容量：$\rm C_{etc}$、である。通常は、$\rm C_d$ と $\rm C_{etc}$ の和は 10 pF 程度であるので、検出器に生じた電荷を損失することなく増幅器に入力させるために、カップリングコンデンサには 100 pF ~ 500 pF 程度の大きな容量

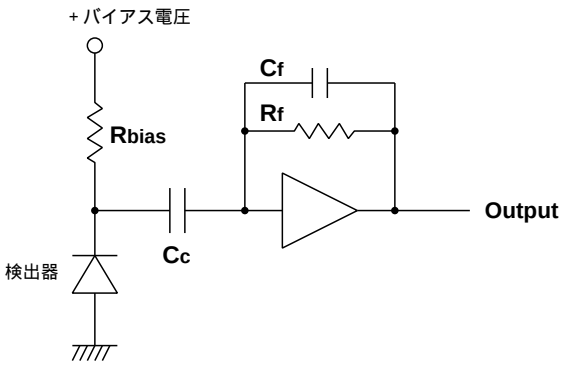


図 2.5: 検出器と CSA の一般的な接続例

値を設定する。カップリング損失が大きいことは、S/N の面から言って好ましくない。

増幅器に入力される直流電流が十分に少ない状況、例えば低温で検出器を動作させリーク電流を抑えている場合などには、カップリングコンデンサを介さずに検出器と増幅器を直接に接続させることも可能になる (DC 結合 : 直流結合)。ただし、低温下であってもバイアス電圧を掛ける側から信号を読み出す場合には AC 結合が必要である。DSSD は p^+ と n^+ の両側から信号を読み出すため、片側は AC 結合せざるを得ない (図 2.6)。

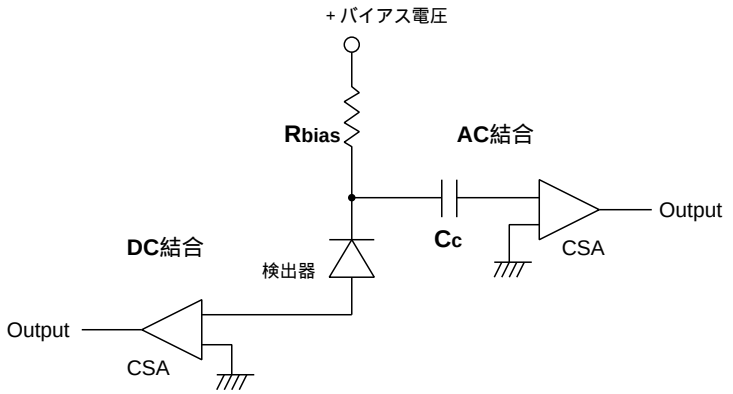


図 2.6: 検出器を両面から読み出す場合の接続例

2.2.4 エネルギー分解能

検出器のエネルギー分解能は、放射線との相互作用により生成された電子・ホール対の数 n の統計分散と回路ノイズに依存する。

放射線が検出器内でエネルギー：E を失った場合、生成される電子・ホール対の数は、

$$n = \frac{E}{\varepsilon} \tag{2.4}$$

となる。ε は電子・ホール対を生成するのに必要な平均のエネルギーで、シリコンでは $\varepsilon = 3.65$ eV である。シリコンのバンドギャップは 1.12 eV であり、本来はこれよりもエネルギーが高ければ吸収される。しかしすべての事象が電子・ホール対をつくるわけではなく、それ以外のことに消費されることもあるため、平均して 3.65 eV で 1 対の電子・ホールが生成されるということである。これはガスの平均イオン化エネルギー (約 30 eV) の 1/10 程度であり、シリコン検出器の検出効率が非常に良いことがわかる。

電荷の生成がポアソン過程であるとすると分散は n になる。実際には統計分散による精度よりもエネルギー分解能は良い値となり、ポアソン分布からずれてる。この統計からのずれを定量化するために、ファノ因子：F が導入されており、

$$F \equiv \frac{\text{統計分散の観測値}}{n} \tag{2.5}$$

で定義され、シリコンでは F = 0.1 程度であることが知られている。これらを考慮すると検出器で生成された信号電荷の統計的なゆらぎは標準偏差で、

$$\sqrt{\sigma^2} = \sqrt{F\,\frac{E}{\varepsilon}} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.6}$$

となる。さらにこれをエネルギー値での半値幅 (FWHM) であらわすと統計的なゆらぎに依存したエネルギー分解能：ΔE_{stat} は、

$$\Delta E_{\mathrm{stat}}\ (\mathrm{FWHM}) \ = \ 2.355\ \varepsilon\ \sqrt{F\,\frac{E}{\varepsilon}} \tag{2.7}$$

となる。

式 (2.7) は、一切のノイズが存在しない理想的な状況でのエネルギー分解能である。半導体検出器から得られる電気信号は小さいため、現実にはさまざまな電気回路ノイズの影響を受けている。

検出器の信号読み出しにおける雑音は、回路素子でのキャリアの熱運動やリーク電流の変動などがおもな要因であるが、これら雑音による電荷：雑音等価電荷 (Equivalent Noise Charge: ENC) が、検出器からの信号電荷とともに読み出されてしまうためにエネルギー分解能の劣化がおきている。ここでは、シリコンストリップ検出器の信号読み出しをおもな例にして、ノイズとなる ENC について述べる。

1. ジョンソンノイズ

   電子回路を構成する抵抗や素子などの中でキャリアは不規則な熱運動をしているため、絶えず変動する電圧が発生している。ジョンソンノイズとはこの

雑音電圧のことで、熱雑音とも呼ばれる。波形整形回路 (shaping amplifier) で波形整形を行った場合、バイアス抵抗で生じるノイズの電荷量 ($\mathrm{ENC_{bias}}$) は、波形整形回路の時定数：τ、バイアス抵抗：$\mathrm{R_{bias}}$ として、

$$ENC_{\mathrm{bias}} = 770\sqrt{\frac{\tau \ \ (\mu\mathrm{sec})}{R_{\mathrm{bias}} \ \ (\mathrm{M}\Omega)}} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.8}$$

で計算される。

2. ショットノイズ

   検出器からのリーク電流 $\mathrm{I_{lc}}$ によってキャリアの流れが統計的に揺らぐことで、雑音電荷が生じる。

$$ENC_{\mathrm{lc}} = 107\sqrt{I_{\mathrm{lc}}\tau \ \ (\mathrm{nA}\cdot\mu\mathrm{sec})} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.9}$$

   となる。

3. アンプノイズ

   信号読みだしの際に、DSSD や回路内のコンデンサが持つ電気容量に応じたノイズが CSA で生じており、次のように表される。

$$ENC_{\mathrm{amp}} = k_0 + k_1 C_{\mathrm{in}} \qquad (\mathrm{e}^-) \tag{2.10}$$

   $\mathrm{k_0}$、$\mathrm{k_1}$ は CSA と shaper によって決まる定数である。$\mathrm{C_{in}}$ は CSA にロードされる電気容量で、AC 結合の場合は基本的に DSSD の持っている容量とほぼ等しい (2.2.3 参照)。アンプの容量対雑音特性勾配を測定することで、求めることができる。

すでに 2.2.3 でも述べたように、検出器と回路を AC 結合させる場合には信号電荷の一部がカップリング損失をおこすため、相対的にノイズの割合が大きくなる。例えば DSSD を AC 結合させている場合 (図 2.7) を考える。DSSD を AC 結合させる場合、カップリングコンデンサを全ての読み出しチャンネルに組み込むことは非常にむずかしいので、われわれは、複数チャンネル分のカップリングコンデンサと、バイアス抵抗をひとつのシリコンチップ上につくったもの (RC チップと呼ぶ) を別に用意して、DSSD を AC 結合させている。RC チップとは、検出器 (DSSD) とは別のシリコンチップに複数組のバイアス抵抗とカップリングコンデンサをつくったものである。大きな抵抗を作りやすいのが特徴であるが、カップリングコンデンサの容量が 22.2 pF(4cmDSSD 用は容量値が約半分) と小さく n 側ストリップからの信号は電荷損失が大きい。RC チップを用いた AC 結合では、電荷損失に

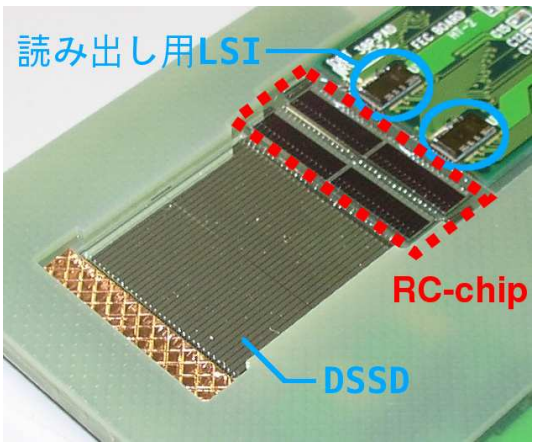


図 2.7: RC チップをもちいて AC 結合させた例

よってエネルギー分解能の悪化が起きていることが確かめられている [岡田、宇野]。RC チップの構造上、そのカップリングコンデンサの容量は数 10 pF と小さい。さらに、SSD とほぼ同じようなストリップ構造しているので、目的のカップリングコンデンサ以外にも Body Capacitance などの電気容量：C_{RC} を持っている。RC チップを用いた接続では、C_C が小さいことに加え C_{RC} があることによるカップリング損失が非常に大きい。C_{RC} はアンプにロードされる容量に加わるため、アンプノイズの増加を引き起こす要因にもなる。

このように、半導体検出器の信号読み出しには多くの雑音が伴っている。これらの雑音をすべて合成すると、

$$ENC^2_{\rm total} = ENC^2_{\rm bias} + ENC^2_{\rm lc} + ENC^2_{\rm amp} \quad (\mathrm{e}^-)^2 \tag{2.11}$$

で表されるほどの雑音電荷量となり、エネルギー分解能を劣化させる成分に相当する。

以上で述べたことを考慮すると最終的にエネルギー分解能は、統計ゆらぎと雑音等価電荷：ENC の各成分の 2 乗和となる。半値幅 (FWHM) であらわすと、シリコン半導体検出器のエネルギー分解能は、

$$\Delta E(\mathrm{FWHM}) = 2.355\ \varepsilon \sqrt{\left(F\ \frac{E}{\varepsilon}\right) + ENC^2_{\rm total}} \tag{2.12}$$

となる。

第3章　両面シリコンストリップ検出器の性能評価

3.1　はじめに / DSSDの開発状況

近年、多チャンネルの信号読み出し用アナログLSI : VA32TAをIDE社・SLAC・宇宙研が共同で開発した。これをつかった読み出しシステムが宇宙研とともに宇野、中本 (広島大理) らによって立ち上げられたことで、ようやくDSSDの多チャンネル読み出しができるようになった。さらにその後、小型のDSSDではVA32TAのパラメータをDSSDに最適化したことで、多チャンネル同時計測においてエネルギー分解能1 %を達成できるまでに至った。[12][11][7] これらの成果により、DSSDを用いた半導体多層コンプトンカメラのプロトタイプが作られるなど、実証試験も行なわれるようになった。こういったDSSDの応用法の開発が進められていく一方で、DSSD自体の開発もひきつづき行なっている。

シリコンストリップ検出器は、片面ストリップ構造であったものを両面ストリップ構造にすることで撮像型の検出器へと改良された。ストリップの幅や間隔についての最適化や、ストリップ分割のための予備的な試作とその評価がなどがおこなわれ、それらを経て小型の両面SSDが作られている。小型の両面SSDは、基礎的な性能評価がおこなわれ、多チャンネル同時計測において撮像能力と高いエネルギー分解能をもつことなどが実証されてきた。[7][11]

現在は、NeXT衛星グループの考えている半導体コンプトンカメラの構成要素として実現に必要となる性能を追求している。この章では特に、雑音源となるDSSDの検出器容量を低減させることとコンプトンカメラの構成に向けてDSSDの面積を拡大させることを目的にして性能評価をおこなった。

3.2　2.5 cm四方の小型DSSD

これまでに開発された2.5 cm四方の小型DSSDには、ストリップのピッチが400μmのものと800μmのものがある。またピッチが800μmでストリップを真中で分割したものがあり、全部で3種類の試作素子がある。便宜上、ストリップのピッチと本数を用いてそれぞれのDSSDを「400p-64」「800p-32」「800p-32-2」と呼ぶことにする。これらの基本仕様について表3.1にまとめた。

表 3.1: 小型 DSSD の基本設計の比較 [7]

DSSD	400p-64	800p-32	800p-32-2
素子厚さ	300 μm	300 μm	300 μm
バルク	n 型半導体	n 型半導体	n 型半導体
ストリップ数 (p・n 各)	64 本	32 本	32×2 本
ストリップの長さ	2.56 cm	2.56 cm	1.25 cm
ストリップピッチ	400 μm	800 μm	800 μm
ストリップギャップ	100 μm	100 μm	100 μm

ここでは、分割していない DSSD の、基礎性能と X 線に対する応答についての評価結果を述べる。

3.2.1 基礎特性 I-V、C-V

「400p-64」、「800p-32」それぞれの DSSD について基礎特性であるリーク電流と Body Capacitance が測定されている。計測器には、バイアス用電源・電流計として Keithly Model 6517 を、キャパシタンスメーターとして Hewlett-Packard HP4284A を使用している。

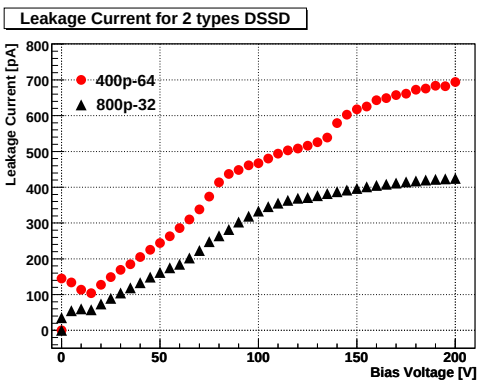


図 3.1: リーク電流の比較

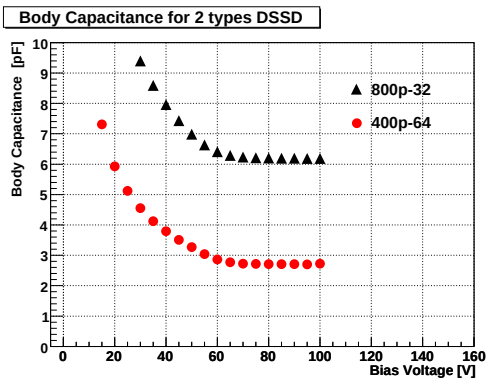


図 3.2: Total Body Capacitance の比較

測定温度 20 °C において、リーク電流と検出器の電気容量はそれぞれ図 3.1、図 3.2 のような特性を持つ。バイアス電圧 100 V の時、ストリップ 1 本あたりのリーク電流は、「400p-64」で 350 pA、「800p-32」で 470 pA である。素子の大きさが同じであっても、ストリップの数や面積など表面構造のちがいによるリーク電流の差が謙著に表れている。

Body Capacitance は両方の DSSD において全体で 230 pF 程度である。電極構造などのないストリップギャップは 100 μm でありピッチに対して十分せまい。平行板コンデンサを仮定した式 (2.2) を適用して見積もると、容量値は 230 pF となり良く一致している。また、約 80 V のバイアス電圧でほぼ空乏化されていることがわかる。[7]

3.2.2 X 線応答の線形性

X 線のエネルギー計測を行うためには、検出器の応答が光子エネルギーに対して線形でなければならない。小型 DSSD の多チャンネル計測において、20 keV 程度以下の低エネルギー光子では非線型な応答が見られた。これは VA32TA アンプ部の帰還抵抗値が非線型性をもつことが原因ではないかと言われている。[11] そこで、DSSD 素子自体のもつ光子に対する応答の線型性についてあらためて検証する。今回は DSSD の p 側ストリップから任意に選んだストリップ 1 本に対して線形性を調べた。

評価の方法は、まず、エネルギーと 100 keV 程度までのいろいろなエネルギーの硬 X 線を照射して、スペクトルを得る。ADC-channel とエネルギー値との対応関係を直線でフィッティングし、得られた直線の式でスペクトルのピークチャンネルをエネルギー値に変換する。この変換によるピークエネルギー値と X 線源のエネルギーとの差をとることで線形であるかどうかを判断する。可能な限り素子の特性を理解できるように、X 線計測用の回路系には十分な使用実績のある単体プリアンプ、MCA などを用いている。そのブロック図を図 3.3 に示す。

測定した X 線のスペクトルを図 3.4 に、そこから得た ADC-channel とエネルギーの対応関係および変換後の「差」を図 3.5 にそれぞれ示す。

変換式により得られたエネルギー値と X 線エネルギーの差は、59.5 keV に相当するピークを除いて、0.1 keV 以下の差である。100 keV 前後の X 線は統計があまり良くないので、ピークチャンネルとエネルギーを対応づけられる点が少ないが、10 keV から 100 keV 程度では 2%以内で線型性が保たれていると言える。

また、評価に用いた X 線源は単一のエネルギーだけではなく、いくつかのエネルギーの X 線を放射している。^{241}Am は、低エネルギーの X 線を放射するので使用したが、14 keV から 26 keV に 4 つのエネルギーピークをもつ。スペクトルピークをひとつずつフィッティングしているため、エネルギーの近いピークの影響をうけて実際のピーク位置からずれてしまうことも考えられる。DSSD のエネルギー分解能が 1 ~ 2 keV 程度であることを考えると、式による変換後のピークエネルギーと実際の X 線エネルギーとの残差が 0.1 ~ 0.3 keV になることも十分に考えられる。

今回の評価から、DSSD 自体は低エネルギーの X 線に対しても十分に線形性のある応答をしていることが言える。ただし、多チャンネル計測でみられた X 線応答の非線型性が読み出し LSI に起因している可能性があるという報告 [11] に対しては、読み出し系が原因であると断定することはできない結果である。

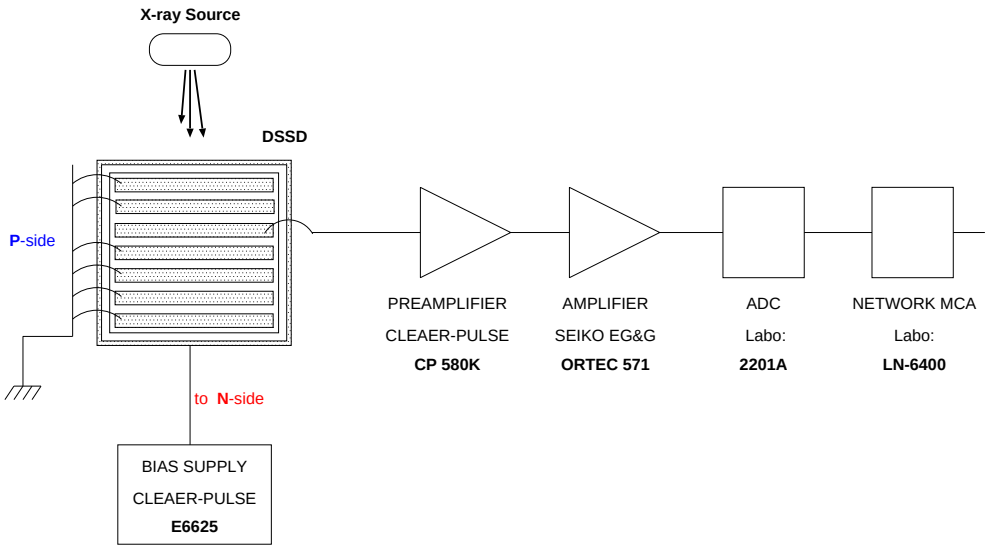


図 3.3: X 線計測用セットアップのブロック図

3.3 ストリップを 2 分割した DSSD

われわれが開発に取り組んでいる半導体コンプトン望遠鏡は、視野外の天体からの信号 (バックグラウンドとなる) を極限まで取り去ることでその性能が発揮される。これを実現するために、望遠鏡を構成する DSSD には高いエネルギー分解能が要求されている。2 章で述べたように、良いエネルギー分解能を得るには、低雑音な信号読み出しを行なうことが重要である。リーク電流は低温にすることで低減できるため、検出器容量を低減させることが雑音を減らすのに最も有効であると考えられる。その手段のひとつとしてストリップを長さ方向で分割するという方法があり、ストリップ 1 本あたりの容量を原理的に低減させることができる。この原理をもちいた小型の DSSD が試作されており、実際にその性能を評価してストリップの 2 分割がエネルギー分解能の向上に有効であるかを検証した。なお、ストリップの 2 分割の概要については [7] に詳しく書かれている。

ストリップを 2 分割する方法を採用して試作された DSSD「800p-32-2」の基本的な仕様は表 (3.1) に示した通りである。

ストリップを分割すると、片面にあるストリップ全てを素子の 1 辺から読み出すことが出来なくなってしまう。これを避けるために、図 3.6 のようにアルミ電極だけを引きのばし、同一の辺からでも読み出しができるようにデザインされている。引き延ばした電極の幅は、10 μm である。

2 分割した DSSD「800p-32-2」は測定温度 20 °C、バイアス電圧が 100 V のときにリーク電流はストリップ 1 本あたり 160 pA であり、電気容量は全体で 240 pF をもつ (図 3.7)。式 (2.2) を適用した容量の見積もりでは 230 pF となり実測値とほぼ一致している。32×2 本のストリップがあるので、1 ストリップあたりの BodyCapacitance

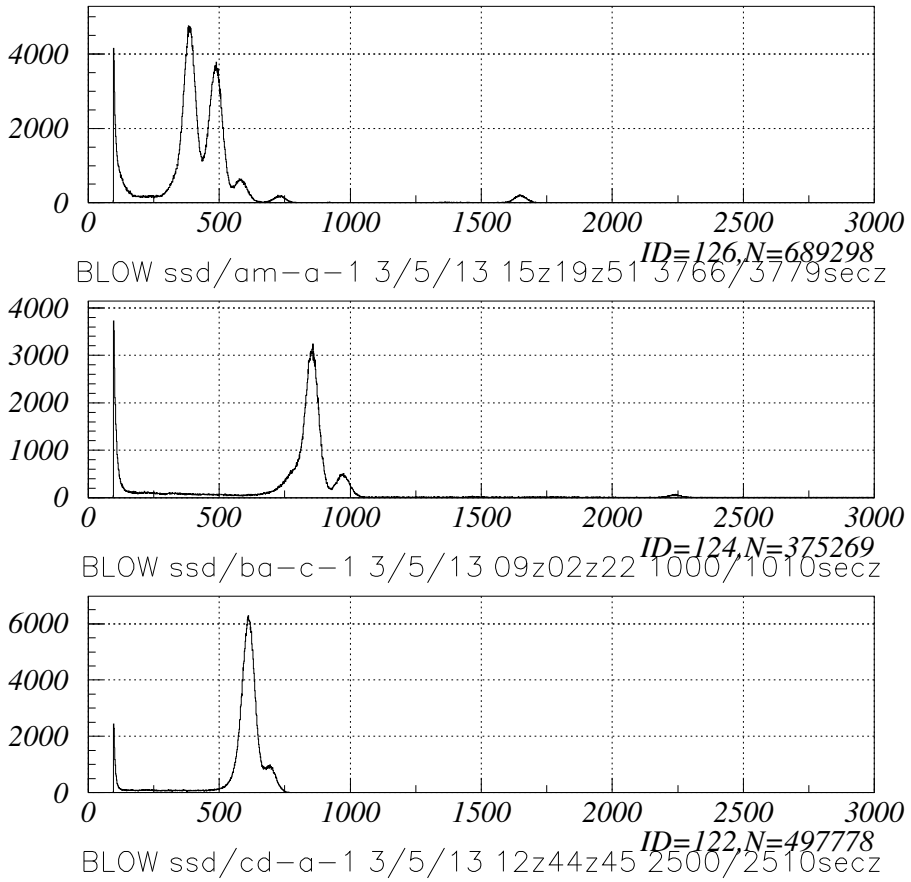


図 3.4: DSSD で得られた X 線スペクトル。上から順に ^{241}Am、^{133}Ba、^{109}Cd。

は全体の容量値を 64 で割った 3.6 pF となる。

両となりのストリップとの間に形成される inter strip capacitence は、100 V で p 側のストリップ 1 本あたり 1.3 pF であることが測定されている。これは、ストリップを分割していないこと以外は同じ仕様である DSSD「800p-32」の、ほぼ半分の測定値である。

電気容量が検出器の面積 (ストリップの面積) に比例していることからコンデンサを仮定した場合と矛盾しない結果であり、また原理どおりにストリップ 1 本あたりの容量を半減させられることが測定により明らかとなった。

つづいてこの DSSD に X 線を照射して、単体プリアンプ、shaping amp などを使い 1 チャンネルでのエネルギー分解能を実際に測定した (図 3.8)。測定温度は 20 °C で、X 線源には ^{241}Am、^{133}Ba、^{109}Cd、^{57}Co を使っている。また、計測セットアップの詳細は図 (3.3) と同様である。

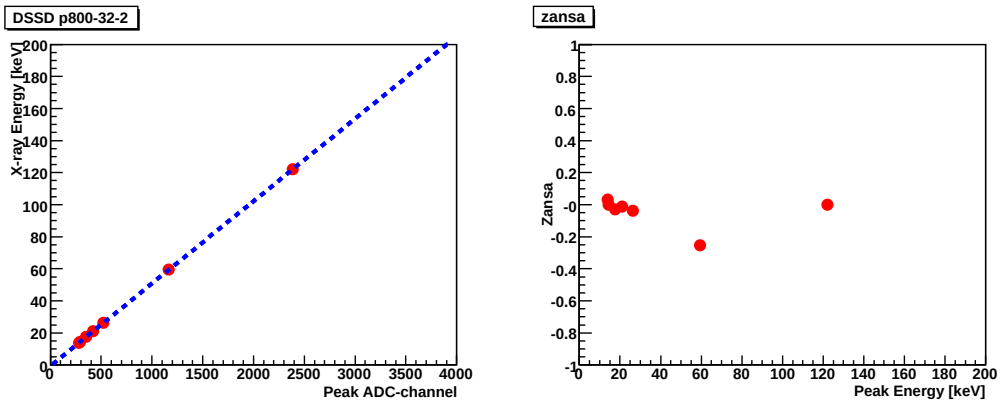


図 3.5: (左)ADC-channel と X 線エネルギーの対応。(右) 変換後の差。

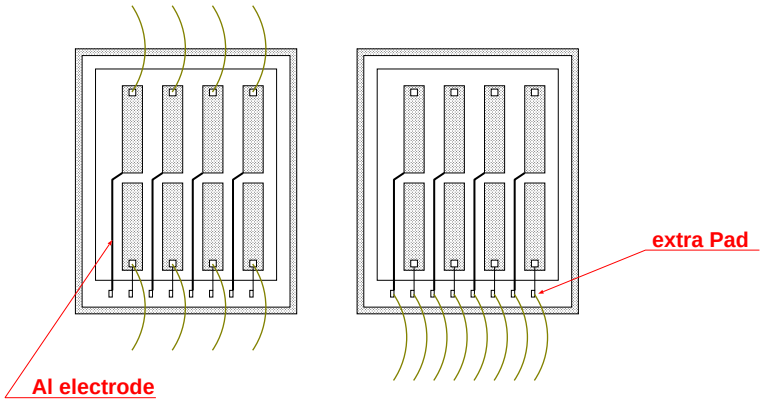
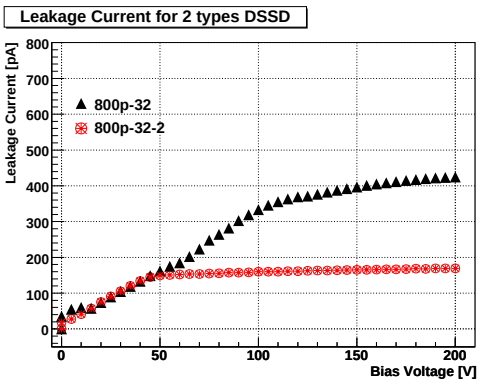


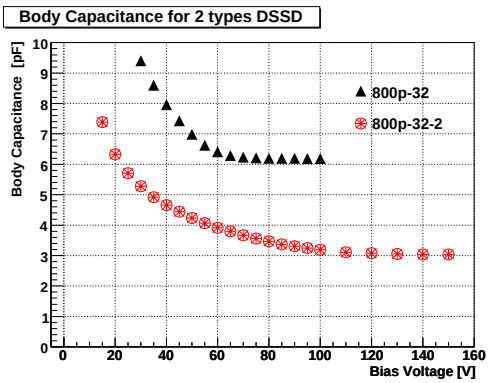
図 3.6: 2 分割 DSSD の模式図。(左) ストリップ上のパッドを使った両辺からの読み出しと、(右) 別のパッドを使い 1 辺から読み出した場合。

「800p-32」ではエネルギー分解能の平均値が 1.89 keV であるのに対して、ストリップを分割した「800p-32-2」では平均で 1.68 keV が得られている。読み出しノイズなどを考慮して式 ()10 % 以上も良くなっている。この結果により、今後 DSSD のエネルギー分解能を向上させるには、ストリップを 2 分割して検出器容量を半減させるという方法を選ぶことができるようになった。

DSSD の多チャンネル同時計測ではシステムを組み上げる際に、どこかのストリップが読み出し回路と接続されていないことがあるが、2 分割した DSSD ならばこのような場合でも素子の半分にあたる領域は信号を読み出すことができる。「800p-32-2」は小型の DSSD を 4 つ並べたような構造をもつため、不良チャンネルが検出領域全体におよぼす影響がすくない。ただし、ストリップを分割すると読み出しチャンネルは増えてしまうのが問題となるため、両面ではなく片面のみ分割するなど、今後はストリップの形状を組み合わせた DSSD の試作を行なうことも考慮しなければならない。

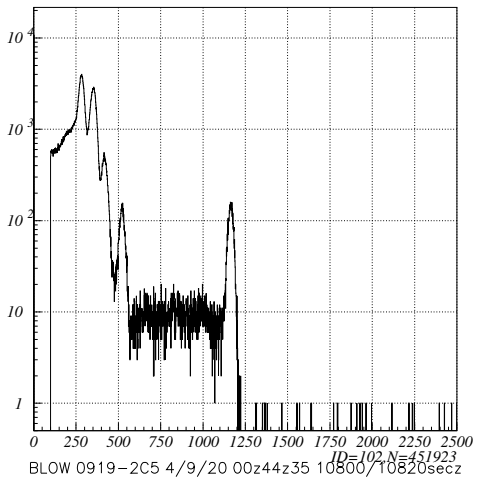


(a) リーク電流

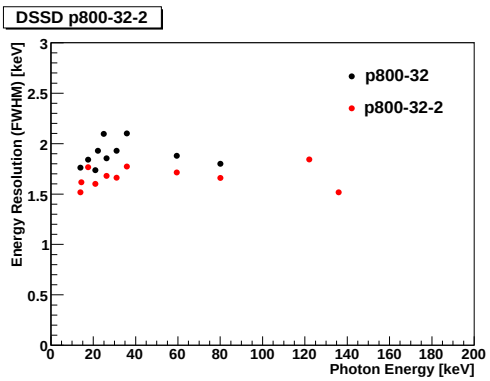


(b)Body-capacitance

図 3.7: 2 分割 DSSD の基礎特性。それぞれ、小型 DSSD との比較。



(a) 取得したスペクトルの例 (^{241}Am)



(b) エネルギー分解の比較能

図 3.8: X 線計測によって得たエネルギー分解能。測定温度は共に 20 °C

なお、2 分割 DSSD「800p-32-2」と信号読み出し用 LSI：VA32TA を組み合わせた多チャンネル同時計測は、現在その実証試験を行なっているところである。データ取得システムである VA-DAQ の不調や種々の雑音源の除去、オペレーション時の事故などで進行が遅れているが、システムの準備が整いしだい再開され、分割ストリップの有効性がさらに実証されていくと見込まれる。

3.4 大面積のDSSD

これまで2.5 cmのDSSDを扱ってきたが、導体多層コンプトン望遠鏡には面積の大きいイメージセンサーを用いることが提案されており、構成品となるDSSDには5 cm×5 cmの素子サイズが要求されている。衛星計画についての提案[NeXT提案書]を受け、我々はDSSDをこれまでの2.5 cm四方から5 cm四方へと拡大させはじめている。今回はその途中段階として、素子サイズを4 cm×4 cm ：面積比で約2.3倍に拡大させたDSSDを試作した。今後の大面積化に向けた予備試験という位置づけで、今回この4 cmDSSDの性能評価をおこなった。

3.4.1 Leakage Current、Capacitance

4 cmDSSDの仕様は小型DSSD「400p-64」とほぼ同じで、素子が大きくなったことに伴い、ストリップの長さと本数が増している。基本仕様を表3.2にまとめた。

表 3.2: 大面積DSSDの基本設計

DSSD	400p-96
素子厚さ	300 μm
バルク	n型半導体
ストリップ数 (p・n各)	96本
ストリップの長さ	3.8 cm
ストリップピッチ	400 μm
ストリップギャップ	100 μm

基礎的な特性として、他のDSSDと同様にリーク電流と検出器の容量を測定した。測定温度20 °C、バイアス電圧100 Vにおいて、Body CapacitanceとInter Strip Capacitanceは1ストリップあたり、それぞれ4.6 pF、5.3 pFとなっている。Inter Strip Capacitanceの増加が大きいが、400p-64の特性とくらべて約1.5倍程度の値となっており、これは素子面積の拡大にともなった増加量と判断できる。

また同じ条件においてストリップ1本あたりのリーク電流は680 pAとなった。小型DSSDよりも単位面積あたりの電流が30%程度大きい。低温下では十分にリーク電流の影響をなくすことができているため特に問題とはならないと考える。

3.4.2 X線応答

基礎的な性能には問題ないことが確認されたので、実際にX線計測を行ないその応答を確認した。まず、単体プリアンプ(CP580H)を使用して1チャンネルでの

計測をおこなった。n 側ストリップはすべて銅テープに接続させそこからバイアス電圧+100 V を掛けている。p 側は読み出すストリップ (No.#30) 以外はすべてグラウンドに接続した。X 線源には ^{241}Am、^{133}Ba、^{109}Co を使い、DSSD 遮蔽用のアルミケースの外から照射している。計測セットアップのブロック図を図 3.9 に示す。

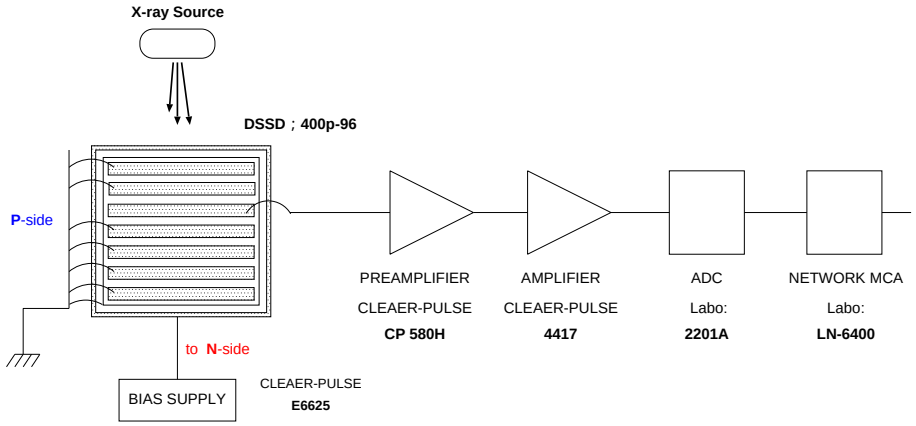


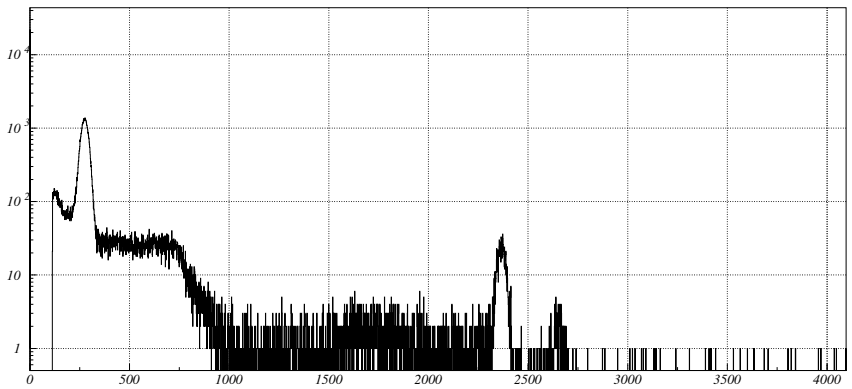
図 3.9: X 線計測セットアップのブロック図

測定温度 20 °C で取得した ^{57}Co の X 線スペクトルを図 3.10 に示した。122 keV のピークをガウシアンでフィッティングして得られた分解能は 2.54 keV である。一方、リーク電流と容量からノイズ電荷を計算すると、2 章より、$\mathrm{ENC_{amp}}$=136(e$^-$)、$\mathrm{ENC_{lc}}$=157(e$^-$)、$\mathrm{ENC_{bias}}$=42(e$^-$)、となる。これよりエネルギー分解能は 1.89 keV と見積もるられる。実測されたエネルギー分解能はこれよりも悪いが、室温 (20 °C) ではリーク電流が非常に大きいことにより、回路内に存在する抵抗などで、計算には含まれていないノイズが多くなり分解能を劣化させているものと考えられる。

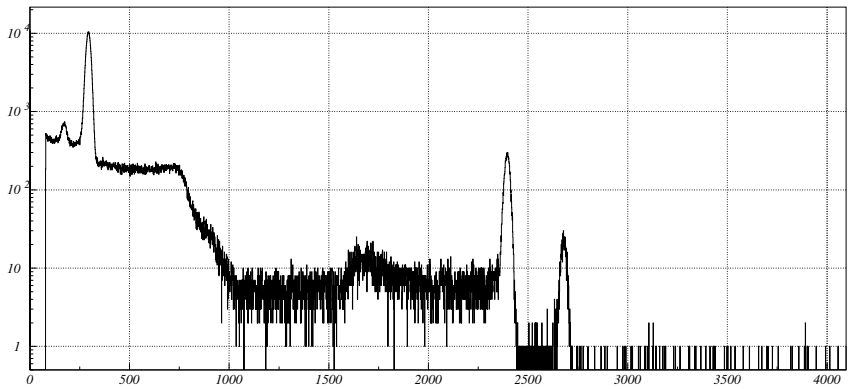
つづいて測定温度を 0 °C に設定し、同様の測定をおこなった。20 °C の時とくらべて全体のカウント数が多いが、これは今回の測定では以前よりも強い線源が使えるようになったためである。実際の測定時間は半分になっている。

20 °C、0 °C それぞれのスペクトルを比べると温度を下げたことで、明らかな分解能の向上がみられる。122 keV に対する分解能は、1.44 keV を得た。0 °C でのリーク電流はストリップ 1 本あたり 80 pA であることが測定されており、リーク電流の減少が大きく影響したと考えられる。ノイズを計算して確認すると、$\mathrm{ENC_{lc}}$=54(e$^-$) であり 20 °C での 1/3 にまで減少していることからもそれは明らかである。エネルギー分解能を見積もると 1.40 keV となり、実測値と良く一致している。

図 3.11 では、いくつかの X 線エネルギーに対するエネルギー分解能を求め、20 °C と、0 °C の分布を比較した。0 °C でのエネルギー分解能は平均で 1.5 keV であり、別の p 側ストリップ 4 本 (No.#10、#50、#70、#90) でも同様の測定をおこなった結果、同程度の分解能がえられている。面積の拡大にともなった容量性ノイズの増加による分解能の劣化が心配されていたが、20 °C から 0 °C でおこなった評価では、面積の拡大によるリーク電流増加の影響も大きいことがわかった。



(a) 20 °C



(b) 0 °C

図 3.10: 4 cmDSSD で取得した ^{57}Co の X 線スペクトル (p-strip#P30)

0 °C でのスペクトル (図 3.10(b)) をさらにくわしく見ると、^{57}Co の 14.4 keV よりもさらに低エネルギー側にピークが得られている。これは、非常に鋭ピークをもっていることのほか、他のストリップで計測した時でも得られており、ノイズである可能性は否定される。約 50 keV までの低エネルギー側を拡大したスペクトルを図 3.12 に示す。この図には、^{57}Co だけでなく、^{241}Am と ^{133}Ba のスペクトルも重ねて表示させている。どの X 線源の場合にも、約 170ADC-channel にピークが存在しており、エネルギー値に変換すると 10 keV 未満となる。これは、計測に用いないストリップをまとめて配線するために使用した銅テープからの蛍光 X 線 (8 keV 程度) であると判断された。さらに、^{57}Co 線源を照射した場合には、^{57}Co の蛍光 X 線 (7 keV 程度) も確認できる (赤、黒のスペクトル)。しかし同じ Co の

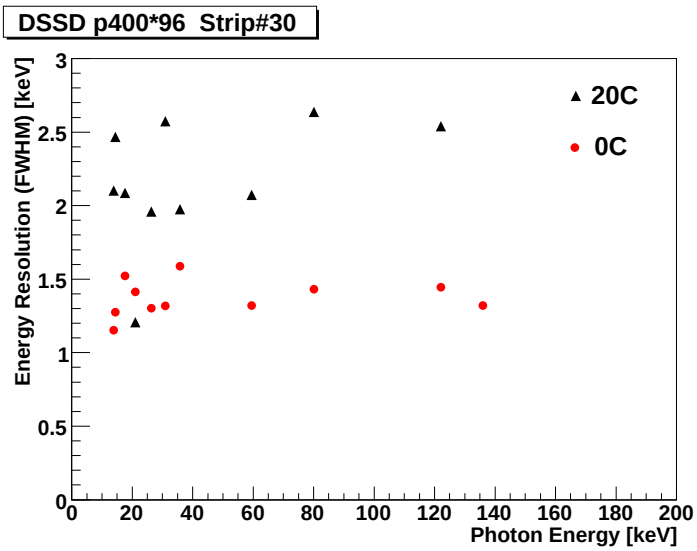


図 3.11: 20 °C と 0 °C でのエネルギー分解能

X 線源を使用した場合であっても、これら 2 つからなる低エネルギーピークのカウント数には明らかな差がみられるが、これは X 線源の形状による差であることがわかった。黒のスペクトルを得たときは、線源についたアルミの窓の側から X 線が照射されており、このアルミ窓で蛍光 X 線が吸収されてしまったと考えられる。蛍光 X 線のくわしいエネルギー値を表 3.3 に示しておく。

表 3.3: 蛍光 X 線のエネルギー [?]

蛍光 X 線	^{57}Co	Cu
$K_{\alpha 2}$	6.9153 keV	8027.8 keV
$K_{\alpha 1}$	6.9303 keV	8047.8 keV
$K_{\beta 1}$	7.6494 keV	8905.3 keV

この程度まで低いエネルギーの X 線を確実にとらえていることは、コンプトン散乱を再構成する必要のある「コンプトン望遠鏡」の実現にとって非常に有益なことである。シリコン結晶内でコンプトン散乱を起こした場合、大抵の場合は前方に散乱される確立が高く、散乱によってシリコン結晶内で失うエネルギーは数 keV 程度とわずかでしかない (図 3.13)[中本]。4 cm 四方という大型の検出器であっても、その検出限界は数 keV ほどの低いエネルギーであるという今回の結果は、大面積 DSSD の性能の良さを表す何よりの指標である。

今回、DSSD の素子サイズを 4 cm 四方に拡大させた。この大面積の DSSD 単体

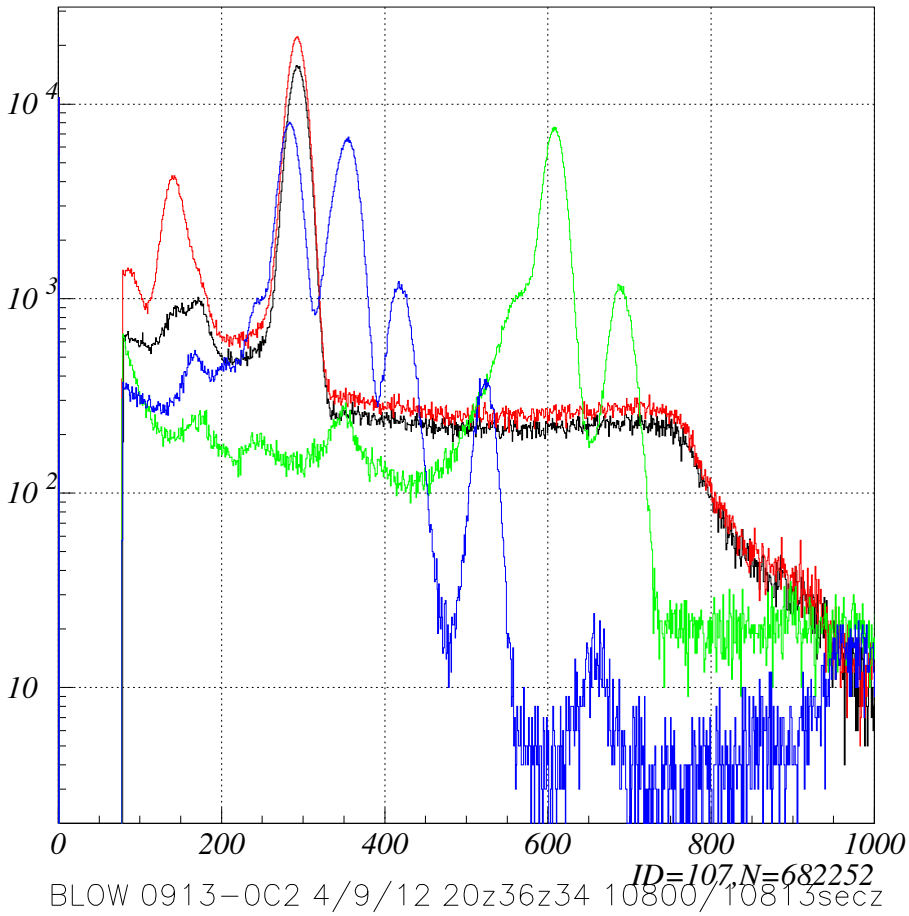


図 3.12: 約 50 keV までを拡大したスペクトル。(黒、赤):^{57}Co、(青):^{241}Am、(緑):^{133}Ba。すべてに共通して Cu の蛍光 X 線に相当するピークが約 170ch に見える。

でおこなった性能評価では、エネルギー分解能が約 1.4 keV(0 °C) であることが明らかとなった。また大面積素子でありながら、Cu の K_α 線 (約 8 keV) を捉えることができるほどの低いエネルギー範囲まで有効な感度をもつことも明らかとなった。このことは非常に優れた性能であるといえるが、コンプトン望遠鏡の実現に向けた要請からするともう少し向上させる必要がある。今後 5 cm 四方へともうひとまわり拡大すればさらに分解能の劣化が起きることは確実である。リーク電流の増加は、低温にすることでその影響を十分に減らすことが可能である。面積の拡大にともなう検出器容量の増加に対しては、先にのべた、ストリップを分割する方法を組み合わせることにより、大面積化と分解能の維持の両立が可能であると考える。これらの結果は、DSSD の X 線計測における性能の高さを示すとともに、今回の 2.5 cm から 4 cm への素子面積の拡大が問題無くおこなわれたことに

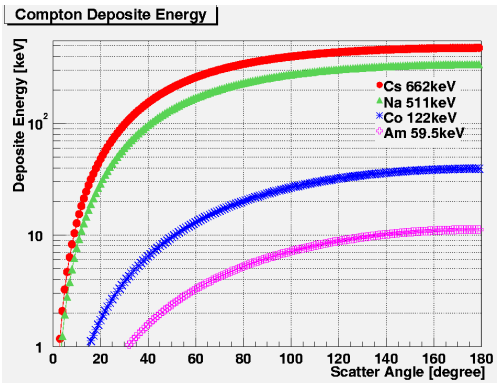


図 3.13: 散乱角度に対する反跳電子の持つエネルギー。[11]

より、目標とされる 5 cm 四方への素子サイズ拡大が十分に可能であることを示すものである。

第4章　片面二次元ストリップ型放射線イメージセンサー

現在我々は、ガンマ線衛星 GLAST 用のシリコン検出器開発をはじめ、これまでに述べた DSSD 開発などの実績を生かし、X 線用の片面プロセス 2 次元センサーの新規開発を進めている。両面構造の検出器へと発展させた DSSD から、片面構造にもどる最大の理由は、片面製造プロセスを採用することにより DSSD にくらべて製造時における大幅な歩留まり向上をめざし、さらに、センサー組み上げ時などのハンドリング性能の向上、製造コストの削減などを見込むことができるからである。半導体イメージセンサーには、他にも CCD やピクセル検出器などがあるが、われわれの考える片面検出器はシリコンストリップ検出器の要素を採り入れている点でこれらとは異なるものであり、素子の設計も新規に必要である。

優れた X 線エネルギー分解能や速い読み出し能力といった DSSD のもつ利点を継承し、これに片面素子の扱い易さや片面製造プロセス採用の利点を合わせた X 線検出器にすることが、我々の片面センサー開発における方向性である。今回、このようなコンセプトにもとづいて設計した試作素子ができあがった。検出器としての基礎的な特性や光子に対する応答などについて性能評価を行ない、片面の X 線イメージセンサーとしての可能性を探った。

4.1　試作素子の構造

試作素子の写真を図 4.1 に、基本的な仕様としてサイズやチャンネル数などを表 4.1 に示した。試作した素子の大きさは、外形が 8.5 mm×8.5 mm で DSSD にくらべて小型である。ストリップ構造であるため、ピクセルに比べて読み出しチャンネル数を大幅に減らすことができ、全ストリップで同時計測をおこなう時でも速い読み出し速度が期待できる。

DSSD やフォトダイオードといった半導体検出器は、n 型または真性半導体バルクの片面に p^+ を、反対の面に n^+ を配置させており、対となる面の厚さ方向にダイオード構造が形成されている。これに対して試作した素子は片面構造の検出器を考えているので、p^+ と n^+ の両方と、そこからの信号を読み出すための電極を含めたすべてを片面側のみに配置している (図 4.3)。また、ダイオード構造は素子

表 4.1: 試作素子の仕様

	試作素子「2D-SSD」
素子サイズ	8.5 mm×8.5 mm
素子厚さ	300 μm
有感領域	6.2 mm×6.2 mm
バルク	n 型半導体
ストリップ数	p -strip 32 本、n -strip 32 本
ストリップピッチ	200 μm
ストリップサイズ	p^+ ストリップ：幅 20 μm p^+「枝」部分：幅 8 μm n^+ 構造部：ϕ 20 μm
ピクセル数	約 1000 ピクセル相当

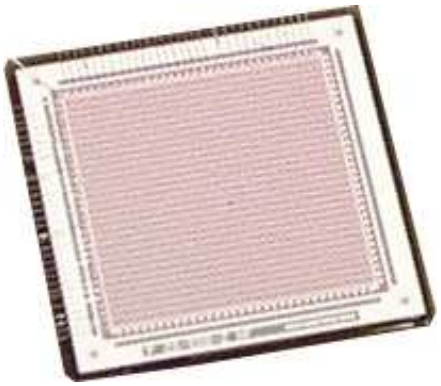


図 4.1: 試作素子

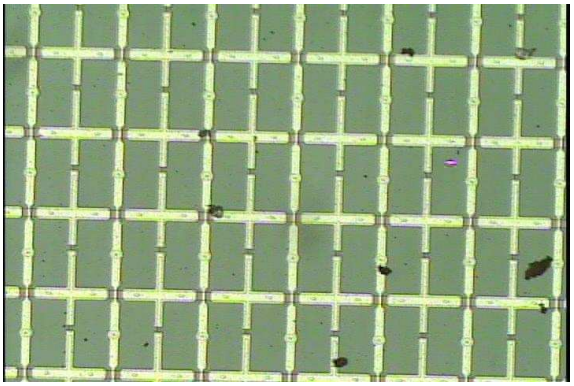


図 4.2: 素子表面の拡大写真

の面内に形成されることが予想される。有感領域となる部分の周囲には p^+ のガードリングがあり、その外側にワイヤーボンディング用のパッドが作られている。

今回の試作では 2 種類の素子を試作した。これらは p 側ストリップ「枝」の部分でアルミ電極にデザインの違いがある。一方は、アルミ電極がとなりの p^+ ストリップに over-hang しているタイプ A(図 4.4(a)) で、もう一方はそうなっていないタイプ B(図 4.4(b)) である。

over-hang しているタイプ A では、n^+ が p^+ とアルミ電極によって完全に囲まれるような状態になるため、n 側ストリップ間でのアイソレーションが良くなることが期待される。しかし、アルミ電極がとなりの p^+ ストリップ「枝」の部分と大きなコンデンサを形成することになるため、p 側ストリップ間でのアイソレーションは悪くなってしまうはずである。

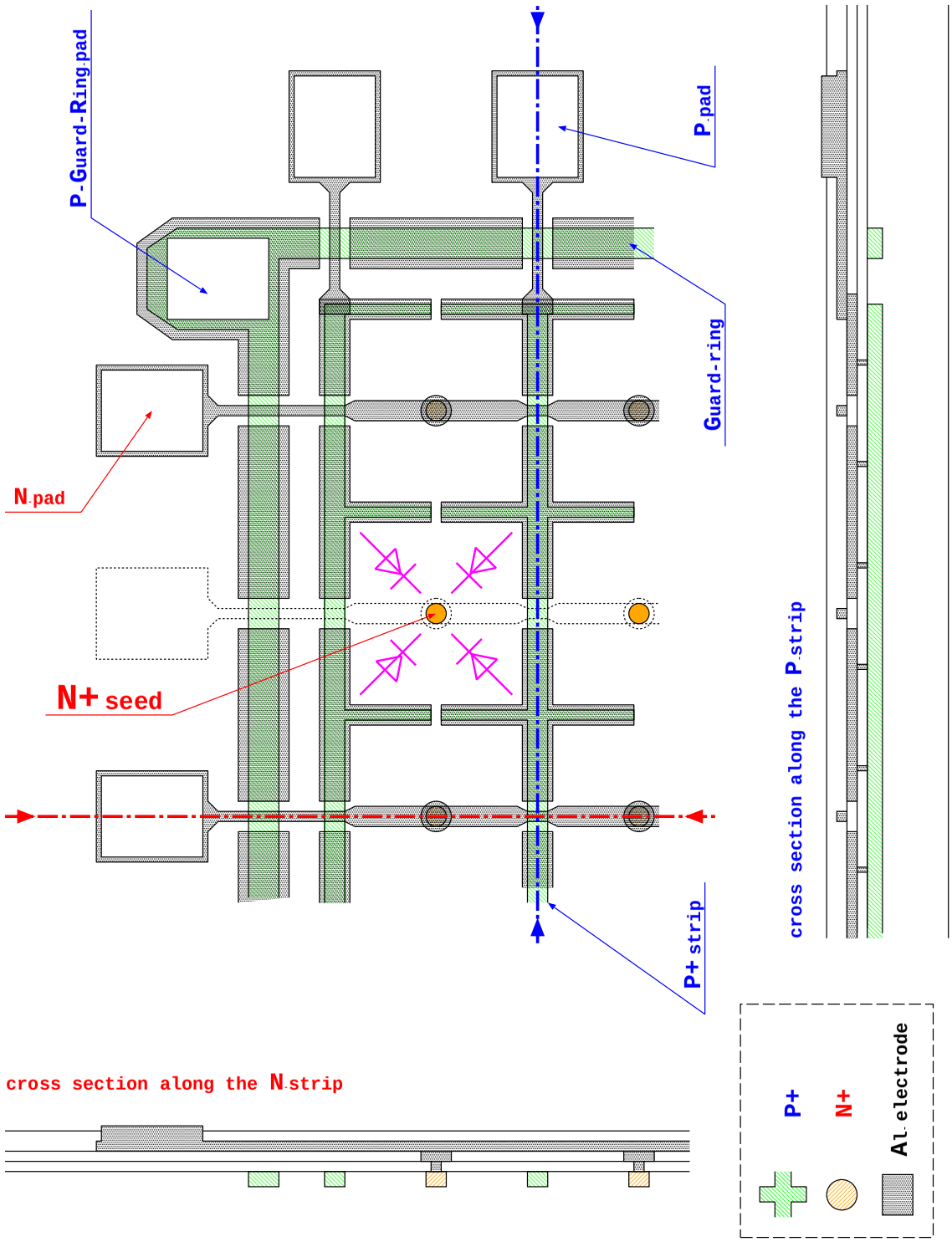


図 4.3: 電極構造の模式図と、その断面の様子

これとは逆にタイプ B では、DSSD などでも分解能のよいことがわかっている p^+ ストリップでのアイソレーションの良さが優先できると期待される。

現在までのところ、各種の性能評価をおこなった結果、この両者には特に明確な性能の差は見られていない。よってこの章ではタイプ A の場合についての評価結果を記す。

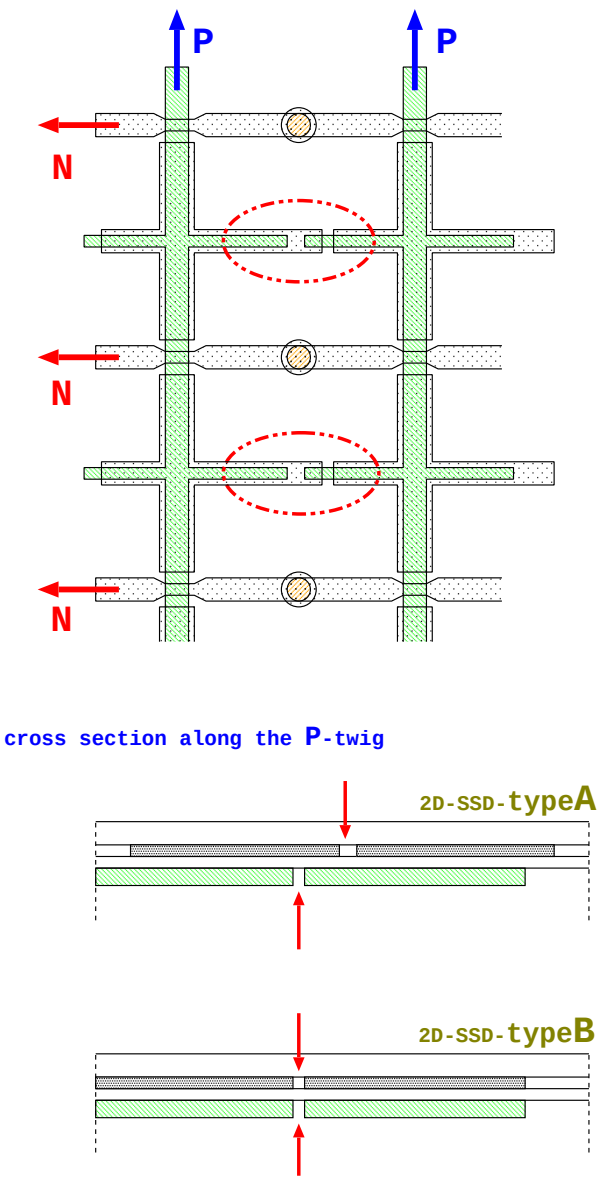


図 4.4: p^+「枝」の部分での構造の違い (断面図)

4.2 基礎特性

まず、試作素子のもつ検出器としての基礎的な特性であるリーク電流と検出器容量の測定を行った。測定の際は全てのストリップにバイアスをかけておこなう必要がある。評価測定をしやすいように素子を基板などに接着し、全てのストリップとガードリングにはワイヤーボンディングによる配線を施した。

4.2.1 Leakage Current

素子から漏れ出しているリーク電流は、電気回路系雑音の主な要因となる。電流の測定は電極構造に問題がないかを確認するためにも必要である。計測器は、Keithly Model 617 を使用した。

まず、p ストリップと n ストリップ間の電流を測定した。ガードリングはグラウンドに接続し、バイアス電圧は n ストリップ側から掛けている。素子の耐圧など基本的な性能が明らかでないため、電圧は 0.5 V ずつあげて 30 秒静置し、ブレイクダウンなどを起こさないよう安定性を確認しながら行なっている。測定の結果、リーク電流のバイアス電圧依存性は図 4.5 のように得られた。測定温度 20 °C、バイアス電圧が 40 V のとき全体で 1.6 nA 程度が典型的な値であり、1 ストリップあたりでは 50 pA のリーク電流が流れていることになる。

図 4.6、4.7 は、恒温槽により測定温度を 20、10、0 °C と変化させたものである。p-n ストリップ間のリーク電流および、n ストリップとガードリング間のリーク電流を測定してその温度依存性を確認した。

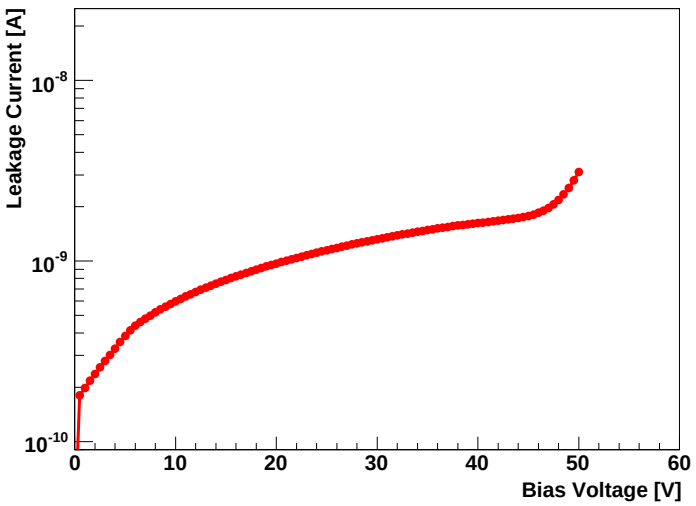


図 4.5: リーク電流の測定結果

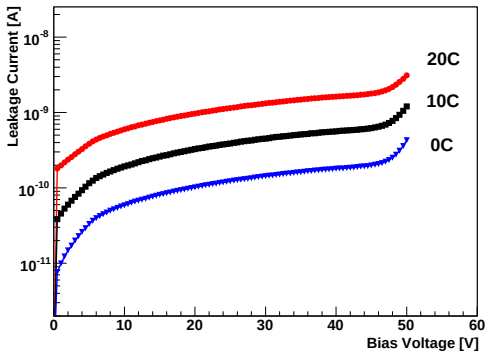


図 4.6: リーク電流の温度依存性

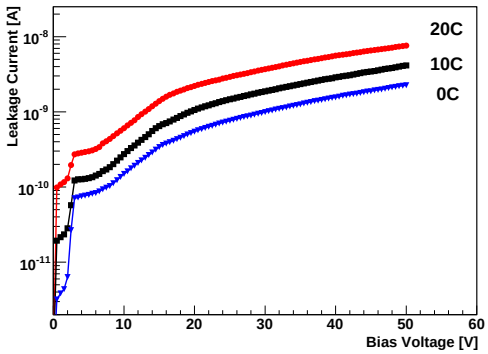


図 4.7: ガードリングのリーク電流

一般的なシリコン半導体素子と同様に、温度を下げることでリーク電流を十分に減らすことができている。しかしながら、測定温度とは関係なくバイアス電圧が 50 V をこえたあたりからリーク電流の値が急増している。タイプ A と B のそれぞれ複数の素子についても同様の結果が得られており、50 V が素子の耐圧であると判断できる。おなじウェーハーから作られた DSSD は 100 V 以上の耐圧があることが確認されているため同じ程度の耐圧を期待していたが、実際には今回の試作素子はこれよりも低い。

片面の電極構造であるために、n 側のアルミ電極が p^+ ストリップの上部で交差している箇所がいくつも存在する。これらの部分には絶縁処理がされているが、電位差の作る強い電場によって、絶縁層の SiO_2 膜の耐圧が壊れてしまうためにリーク電流が生じている可能性がある。

耐圧が低いことの理由としてもうひとつ考えられるのが、ガードリングとボンディングパッドの配置である。今回の測定ではガードリングを流れる電流が非常に大きいことがわかる。これはもともとガードリングが、これよりも外側で発生するリーク電流を吸収し内部にあるストリップに外からリーク電流が流れ込むのを防ぐとともに、ストリップ周辺の電界を一様に整えるための構造だからである。その一方で、ストリップの信号が通るボンディングパッドはガードリングよりも外側に作られている。試作素子のガードリングは p^+ 型であり、この上を n 側ストリップの電極が通る配置になっている。バイアス電圧が 50V 以上では、本来なら p^+ 型のガードリングに流れていた電流が n 側ストリップへ流れ出し、電流値が急激に増加していると考えることもできる。

大きなリーク電流が流れた場合には赤外光が発せられるので、これを赤外線に感度のある CCD カメラなどで確認することも可能である [14] が、今回はその場所の特定には至っていない。

4.2.2 Capacitance

試作素子は、片面のみに p^+ と n^+ を配置しているため非常に複雑な電極構造になっている。素子の電気容量を測定することにより、空乏化した層の深さが測定できる。また、2.2.4 などでも述べたように、雑音特性の面から考えて検出器の電気容量は小さいほうがよい。実際に測定を行ない確認をおこなった。なお計測器は、Hewlett-Packard 製 HP4284A を使っている。

測定温度 20 °C において、30 秒おきにバイアス電圧を 0.5 V ずつ増やして掛けている。リーク電流の測定結果により、50 V 以上のバイアス電圧をかけるべきではないと判断されたので、50 V を上限にして測定を行なった。ガードリングを除く p^+32 本と n^+32 本をまとめた、p-n 間の容量を測定している。図 4.8 に各バイアス電圧において測定された容量値を示す。

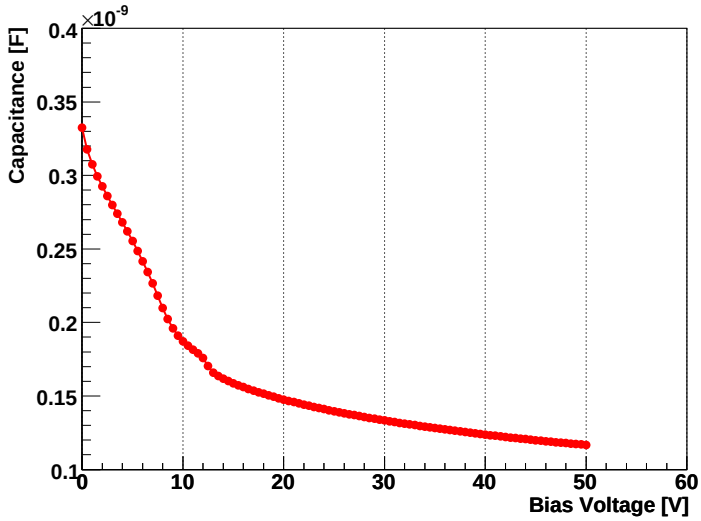


図 4.8: 検出器容量の測定結果。C-V カーブ。

バイアス電圧の増加に応じて、容量の測定値が減少していく様子が確認できる。このことは、一般的な半導体検出器での振るまいと同様であり、ダイオード構造によってある程度の空乏層が形成されていることの証拠となる。容量値の減少にあまり変化がなくなりはじめる 40 V では、p・n の全ストリップ間で約 100 pF 程度の容量値となっている。ストリップ 1 本あたりに換算すると 3.2 pF となる。平面状の検出器 (フォトダイオードなど) や DSSD の場合には、式 (2.2) により検出器がもつ容量の良い見積もりが可能であった。しかし今回試作した素子は、従来の半導体検出器のような表と裏が対になった p-n 接合ではないので、単純なコンデンサを仮定しただけの容量の見積もりでは、不十分であると考えられる。

続いて、C-V カーブから空乏層の拡がりかたを考察する。図 (4.8) をみると、10 V 前後にカーブの歪みが存在している。これは測定を行なったどの素子でもこの構造が見えているため、空乏層がどのように発達しているかが表れたものであると考えられる。PD などの場合は空乏層は単純に p^+ から n^+ への一方向に発達していくため、C-V カーブも単純な変化をする。一方の試作素子では、p^+ から n^+ の方向と深さ方向に空乏層が拡がると考えられるため、2 つのカーブが重なったような構造をもつ。その理由として以下のように空乏化がすすむためだと考えた。またこれに合わせて、空乏化が進んでいく様子を図 4.9、4.10 に示した。

1. まずは p+から n バルクへ向かって空乏化がすすみはじめる。このとき p^+ どうしは「枝」の部分で距離が非常に近いため数 V でとなりの空乏層とつながり、電気的な分離が完了する。その後も n^+ へ向かって空乏化が進むので、これが最初の数 V にみられる容量の減少となる。

2. 空乏層が n^+ に達しはじめ、p^+-n^+ 間の距離と、面方向の空乏層幅がほぼ同じになるため、容量の減少が落ち着きはじめる。

3. バイアス電圧が約 12 V を越えたところで空乏層が n^+ を覆い、n^+ どうし、また n バルクとの分離がおきる。それにより容量値の急激な減少が見られる。ただし、n^+ の構造は、素子全体から考えるとごく一部でしかないため、容量の減少はすぐに止まる。

4. n^+ の分離が完了したあとは、空乏層は徐々にバルクの深さ方向へ拡がっていき、容量値も減少をつづける。

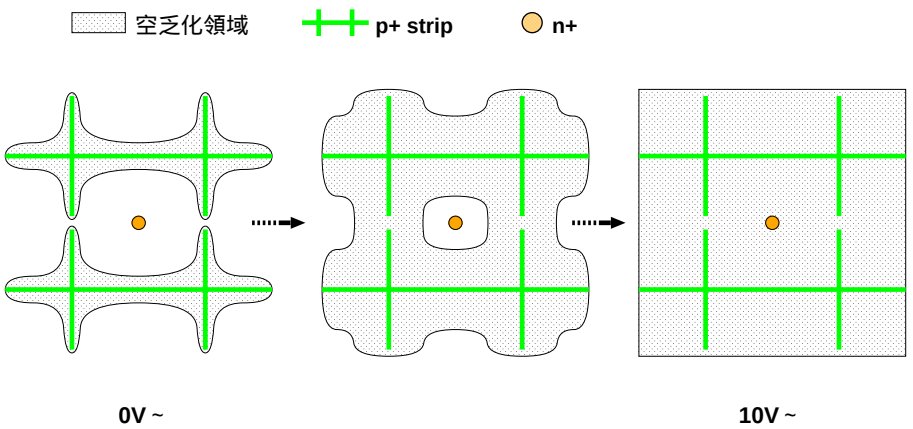


図 4.9: 空乏層が素子の表面付近をひろがっていく様子 (想像図)

C-V カーブ (図 4.8) によると、耐圧としたバイアス電圧 50 V の時点でもゆるやかではあるが容量の減少が続いており、素子が完全には空乏化していないことをあらわしている。これについては、素子の耐圧を上げて高バイアスをかけることで改善されるはずである。

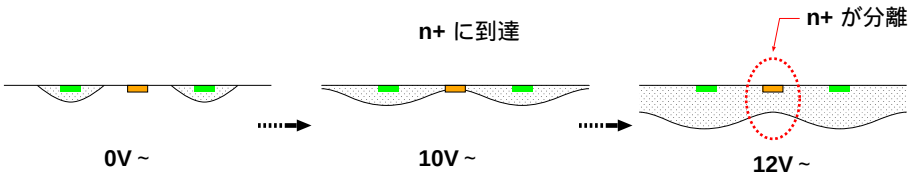


図 4.10: 素子の断面を空乏層がひろがっていく様子。(想像図)

4.3 X 線応答

以上までにおこなった基礎特性の評価から、素子の内部には有感領域となる空乏層が拡がり、信号電荷を収集するためのバイアス電圧をかけられることが明らかとなった。これはつまり放射線を検出する能力をもつということであるので、X 線源をもちいて試作素子の X 線応答についての検証をおこなった。

試作素子は p^+ と n^+ にそれぞれ 32 チャンネルづつの信号出力をもっているが、今回の評価では 1 チャンネルでの応答を評価する。

X 線の測定を行なったセットアップは、図 4.11 に示すブロック図のように構成した。なおこれらの機器は、DSSD の 1 チャンネル読み出しに使用したものと基本的に同等なものである。

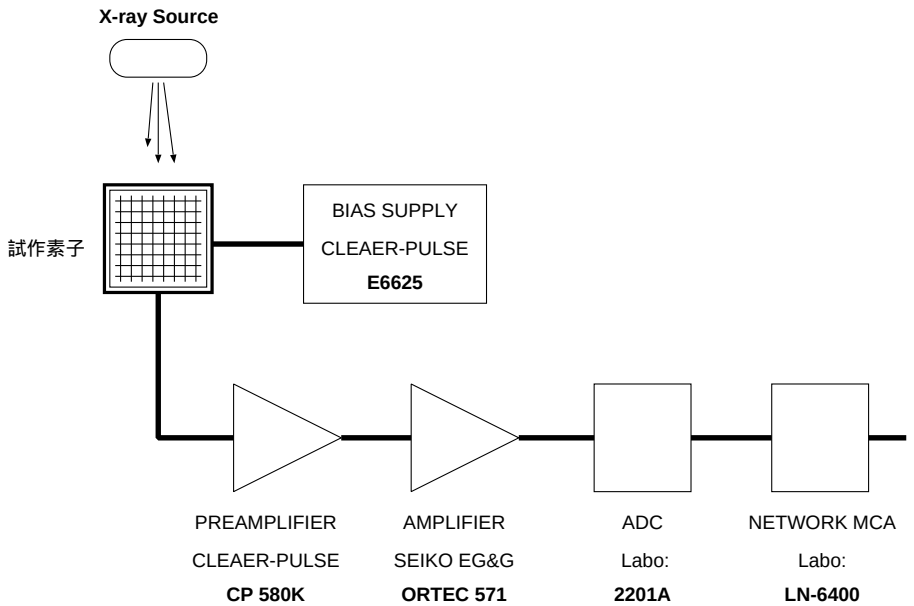


図 4.11: X 線計測を行なったセットアップのブロック図

素子とプリアンプとの接続は図 4.12 に回路図を示した。p^+ 側から読み出す場合と n^+ 側からの場合との差をなくすため、回路の構成は可能な限り対称になるよう

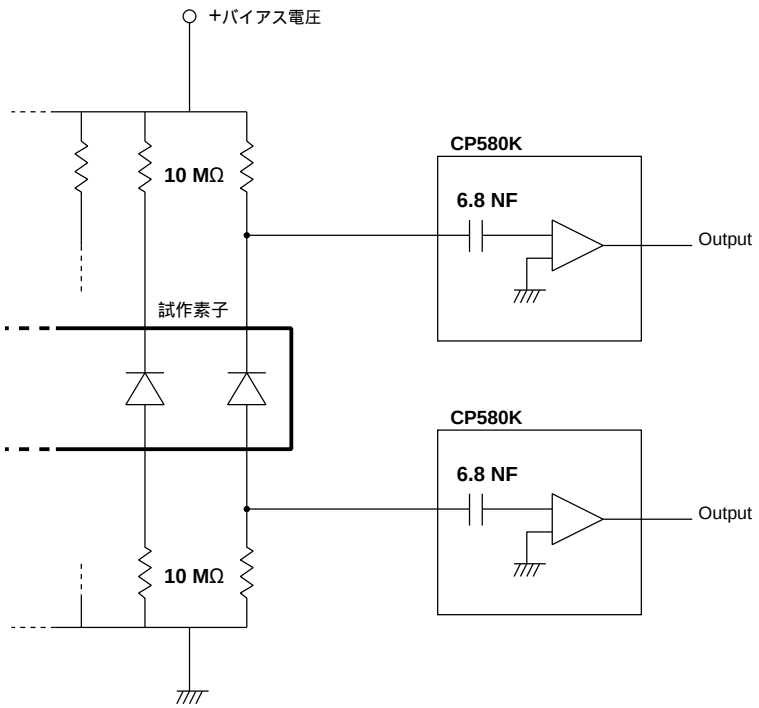


図 4.12: 素子と計測器の接続回路図

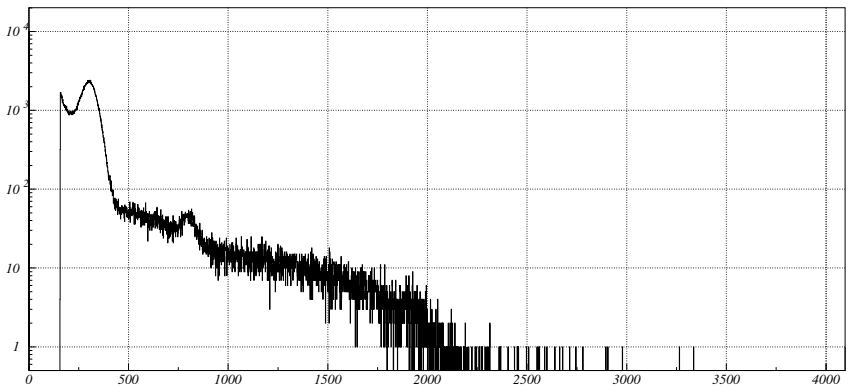
にしてある。バイアス電圧は n^+ 側から掛け、p^+ をグラウンドにした。各ストリップへは、一部では数ストリップをまとめて、10 MΩ による抵抗分割をしてバイアス電圧をかけている。プリアンプ : CP580K との接続は、入力にカップリングコンデンサ (6.8 NF) が内蔵されているため、AC 結合となる。また、回路図には p^+ と n^+ の両方にアンプがあるが、実際にはどちらか一方を選んで付け変えており p・n 同時計測は行なっていない。

以上のようにセットアップを組み、X 線源 : ^{133}Ba の計測を行なった。バイアス電圧は、素子の耐圧を考慮し、安全に測定が行なえると考えられる 40 V に設定した。測定温度 20 °C で取得したスペクトルを図 4.13 に示す。

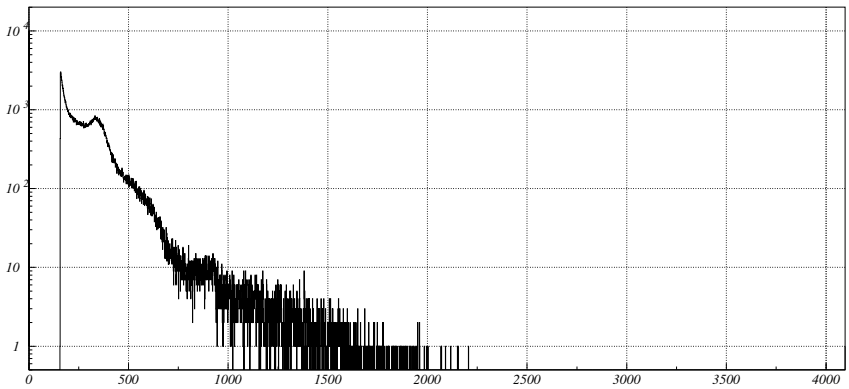
p ストリップによる計測では、Ba から出る X 線 : 32 keV、81 keV に相当する 2 つのピークが確認できる。これらのピーク位置から計算すると、Ba の 276 keV、303 keV などのコンプトンエッジは、2000 ADC-channel 前後に存在することになり、得られたスペクトルとも矛盾しない。

一方の n ストリップでは、32 keV に相当するピークが確認できる程度である。これ以上の X 線に対する検出精度は見たとおり良いとはいえず、他にもあるエネルギーの高い X 線によるコンプトンイベントも十分に検出できていないことがわかる。

また、それぞれの測定時間、X 線源の位置は同じであるにも関わらず、ピーク



(a) p ストリップ (#P22) での計測



(b) n ストリップ (#N22) での計測

図 4.13: 試作素子で取得した Ba の X 線スペクトル。20 °C

のイベント数および全イベント数に大きな差がある。n 側ストリップでは、p 側ストリップの約 30 % 程度しかない。p^+ と n^+ の両方のシグナルによって 2 次元の位置情報を得ようとする検出器にとって、検出効率に差が生じることは問題となる。今後の試作では、これを解決していかなければならない。これほど検出効率に差が生じる原因は、p^+、n^+ の各ストリップ周辺における空乏層の拡がり具合が異なるためだと考えられる。

今回の X 線応答についての評価から、試作素子は X 線検出を行なえる能力をもつことが証明された。また、p^+ と n^+ では検出効率に差があることが明らかとなり、このことから空乏層の状態に問題があることもわかってきた。次節では、その原因をさぐるために素子内部でどのように空乏層が分布しているかを検証して

いく。

4.4 空乏層の状態

p 型半導体と n 型半導体を金属学的に接合させると、その境界部にはキャリアのほとんど存在しない空乏層と呼ばれる領域がひろがる。半導体検出器にとって、この空乏層こそが検出器としての感度をもつ部分であり、その厚さや一様性は最も重要な性質のひとつである。4.2.2 で行なった検出器容量の測定や前節 4.3 での X 線計測から、p-n 接合によってある程度の空乏層が存在していることは証明された。しかし、その厚さや一様性といった空乏層の状態については詳しい情報が得られていない。シリコン半導体内部にひろがる空乏層の厚さについての情報を得るには、波長を適切に選んだ光を照射して検出器からの出力信号を得るという方法があり、今回この方法を用いて試作素子の空乏層がどのように分布しているか検証を行なった。

4.4.1 測定の原理

まずその原理について説明する。空乏層は素子の内部に存在する電荷キャリアの無い領域であるため、目で見て確認することはできない。そこで、光子や β 線といった粒子が物質の内部に侵入することができるという性質を利用する。物質内部に侵入した粒子は厚さ方向のさまざまな位置で確率的に相互作用を起こす。このとき、空乏層で相互作用すればその電荷は電場によって集められて信号となるが、それ以外の不感領域で反応した場合は信号とはならない。このことに加えて、厚さ方向の全体で相互作用が起きている状況であれば、空乏層の厚さに応じた大きさの信号が得られるという原理である [参照・etc、住澤修論他](図 4.14)。

このような状況をつくり出すためには、照射する光を適切に選ぶ必要がある。その条件のひとつは、電子・ホール対を生成するのに十分なエネルをもった光であることである。シリコンのバンドギャップは 1.12 eV であるので、電子・ホール対を生成させてシグナルを得るにはこれよりも高いエネルギーが必要となる。そのため、1100 nm よりも短い波長をもった光であればよい。

ふたつめの条件は、素子の深くまで侵入して厚さ方向すべての位置で相互作用を起こすことができるように、吸収長が長いことである。ひとつめの条件から短い波長をえらぶ必要がある一方で、波長が短くなると光は物質の表面で吸収されやすくなってしまい、検出器の内部までとどかなくなる。シリコンに光を照射した場合の、光の波長と吸収長を図 4.15 に示す。可視光程度まで波長を短くするとほぼ表面で吸収されてしまうことがわかる。今回の検証では、シリコン素子の厚さである 300 μm 程度の吸収長をもつことが望ましい。

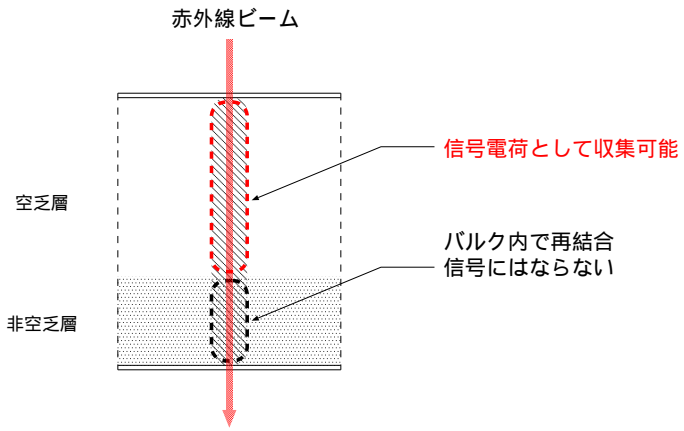


図 4.14: 赤外線で空乏層の厚さを測定する概念

これらふたつの条件から考えられる適切な光は、1050 nm ~ 1100 nm 程度の波長をもつ赤外線であることがわかる。

赤外線以外に、加速器を用いた粒子ビームやガンマ線を用いることでも同様の検証を行なえる。加速器は設備が一般的でないことや、ガンマ線の場合は照射位置を精度良く決められないうえにシリコン素子に対しては貫通力が大き過ぎるなどの理由があり、今回のようなシリコン素子の性能評価には向いていない。[14] でも行なわれたように、今回は赤外線を用いる方法を採用した。

4.4.2 計測セットアップ・計測方法

全体のセットアップは、自作したレーザーシステムに合わせて松浦 (広島大理) の卒業論文 [13] で使われたセットアップに変更を加えたものである。以下、各部分の詳細をのべる。

照射装置

顕微鏡をもちいた照射装置であるので、照射するビームのサイズを 2 次元の絞りによって自在に調整でき、照射位置の特定やビームの焦点あわせなどの確認も CCD カメラを使っておこなうことができる。レーザーダイオードからのビームは内部のレンズ系と対物レンズをとおり照射される。電気的な遮蔽のために試作素子はアルミボックスに入れ、フタに開けた窓からレーザーを照射している。照射位置の移動は手動でハンドルを回してステージを移動させるものであるため位置再現性は十分ではない。模式図を図 4.16 に示す

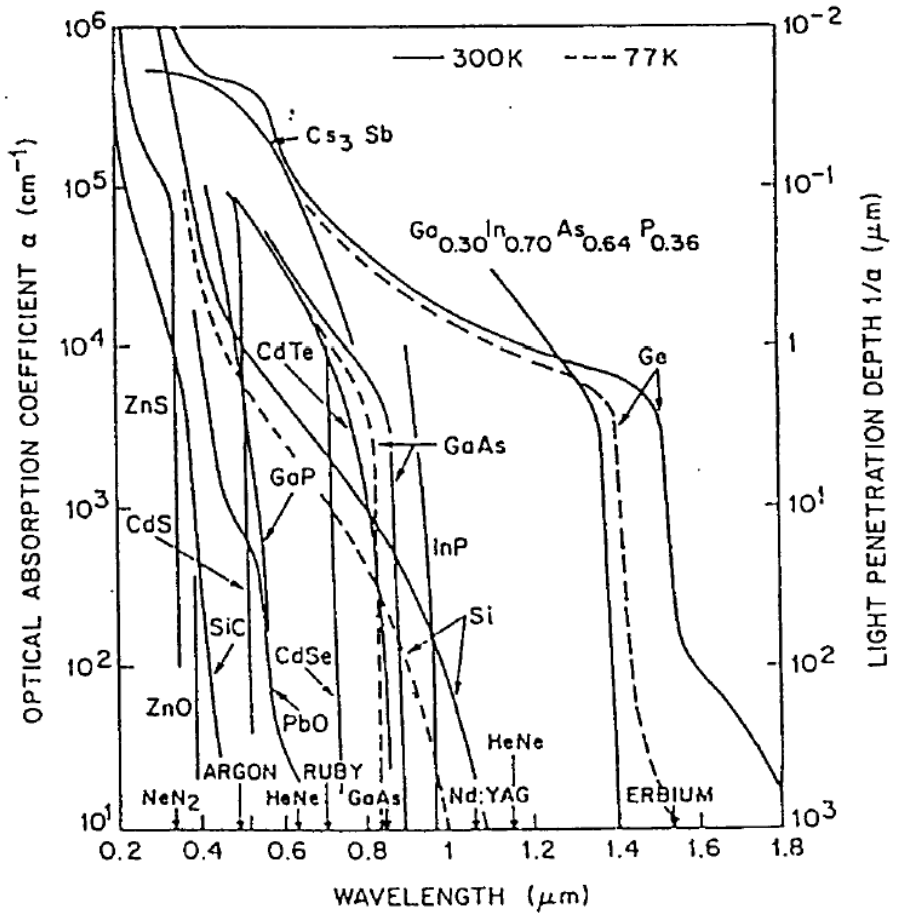


図 4.15: 光の波長と吸収長の関係.。Si 中で 300μm 程度の吸収長を得るには 1000 nm 前後の波長が必要になる。[14]

データ取得系

素子からの信号電荷を CSA で受け、shaping amp で増幅・整形させたものを AD 変換し MCA で波高値を取得するという流れでおこなう。回路のブロック図を 4.17 に示す。これらの各モジュールの詳細と素子周辺の回路などは、それぞれ図 (4.11)、図 (4.12) と同じである。

レーザーダイオード発光系

レーザーシステムの構成には、ROITHNER LASERTECHNIK 社のレーザーダイオード RLT1060-10MG(波長 ; 1063 nm) と、パルス発振用にファンクションジェ

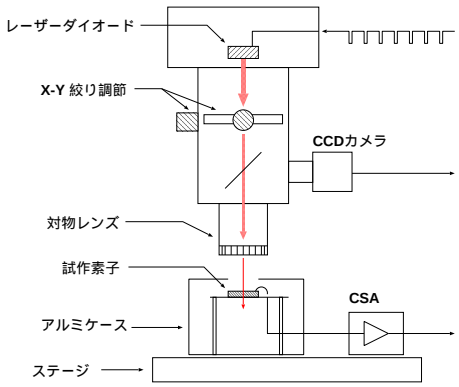


図 4.16: 赤外線照射用セットアップの模式図

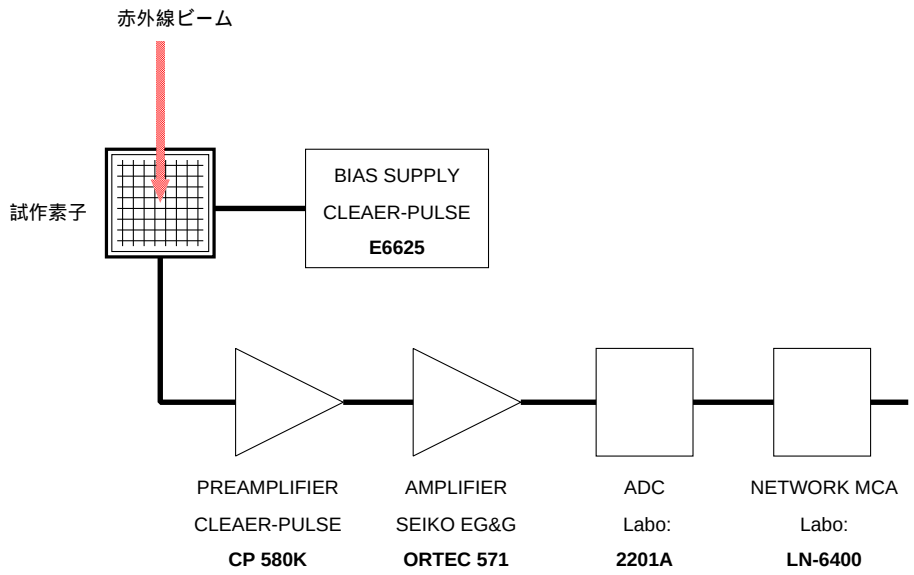


図 4.17: データ取得系のブロック図

ネレータ (Tektronix AFG310) をもちいて組み上げた。ファンクションジェネレータのパルス周期は 100 kHz に固定し、Pulse Duty を変えて発光時間の調節を行なう。クロックジェネレータをトリガに使い、10 Hz で出力させている。

レーザー光の照射方法

赤外線レーザーでスキャンする場所は次のように決めた。まず素子の受光面から 1 ピクセルに相当する領域をえらぶ。この領域はアルミ電極でさらに 4 つの区画に分割される形になっているが、それぞれほぼ同等な構造であるので 1 区画を選択しこの区画内をスキャンする。100 μm×100 μm のスキャン区画を 9 等分し、

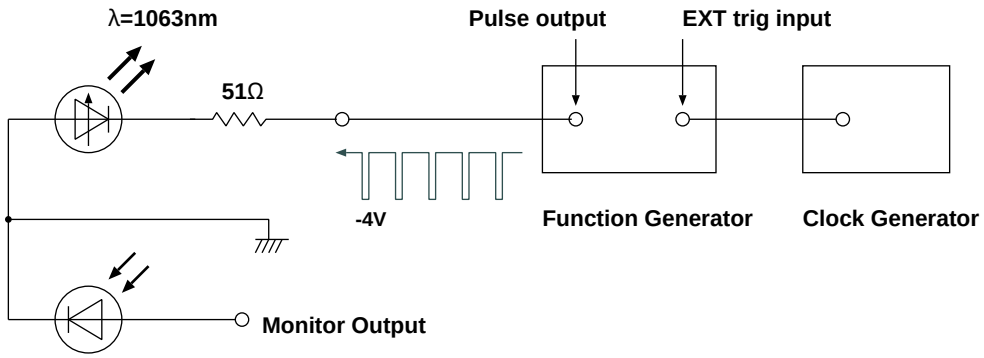


図 4.18: レーザー発光用セットアップのブロック図

それぞれの領域へおよそ 20 μm×20 μm に絞った赤外線レーザー光を入射させる (図 4.19)。このとき、素子の表面に焦点をあわせた。

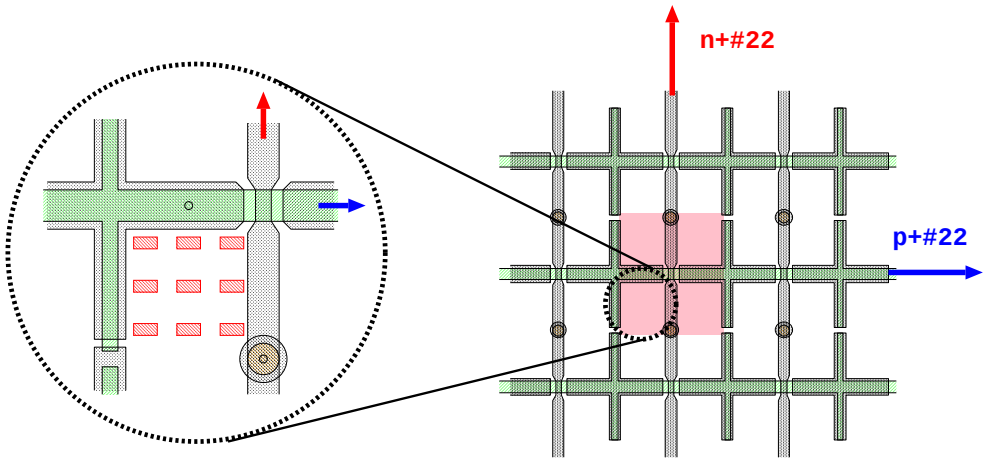


図 4.19: レーザーの照射位置

測定の際には、素子にかけるバイアス電圧を 0、2、5、10、20、30、40、50 V と変えてそれぞれ 200 秒間レーザーを照射して出力信号を得る。これを各位置でおこなうことで、場所とバイアス電圧の違いによる空乏層の拡がり方を確認できるはずである。

またpストリップとnストリップとでの違いを確認するために、pストリップからの読み出しと、nストリップ読み出しの両方の場合について測定を行なった。

赤外線レーザー出力の較正

実際に測定を行なう前に赤外線レーザーの較正を行なう必要がある。較正には試作素子と PIN フォトダイオードの両方をもちいている。

レーザー光はパルス状に出力されている。この 1 パルスでの発光時間を長くすればレーザー光の強度が上がるので、素子から大きな出力を得ることは簡単にできるが、X 線による出力とくらべて大き過ぎるのは良くない。バイアス電圧が低いとき、つまり空乏層が薄い状況でもノイズと区別できる信号出力が得られるレーザーの強度を、発光時間を変えることで設定をおこなった。

発光時間の違いによって、試作素子の信号出力 (パルスハイト) は図 4.20 のように変化する。n^+ からの出力は、バイアス電圧 40 V をかけた状態でも p^+ とくらべて 1/3 ほどのパルスハイトしかない。p、n 両方の兼ね合いから、発光時間を 3.5 μsec に設定した。

このレーザー光を同一のセットアップで PIN フォトダイオードに照射させると、バイアス電圧 40 V のとき図 4.21 に示すようなパルスハイトの分布が得られる。これには同一条件で取得した ^{133}Ba の X 線スペクトルを重ねている。試作素子に対しておこなうのと同様に、バイアス電圧を変えて測定をおこない、パルスハイトの逆数とバイアス電圧の関係をグラフにすると図 4.22(a) のようになる。これは、検出器の容量値とバイアス電圧との関係 (図 4.22(b)) と対応しており、赤外線スキャンによって空乏層の情報が得られていることがわかる。

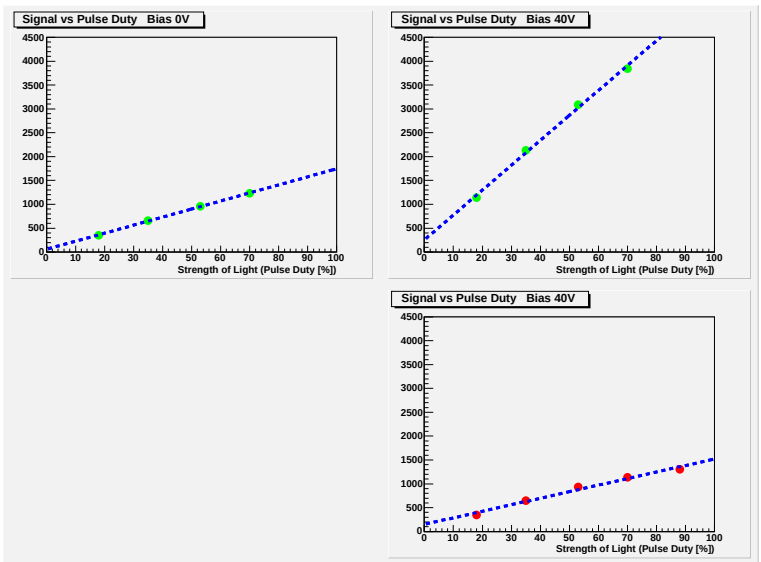


図 4.20: 発光時間とレーザー強度の関係

4.4.3 試作素子の赤外線スキャン結果

以上で述べた方法とセットアップにより、試作素子の赤外線スキャンを行なった。照射位置とその位置の番号を図 4.23 に示す。測定時の温度は、20 °C である。バイアス電圧は、0、2、5、10、20、30、40、50 V と変えている。

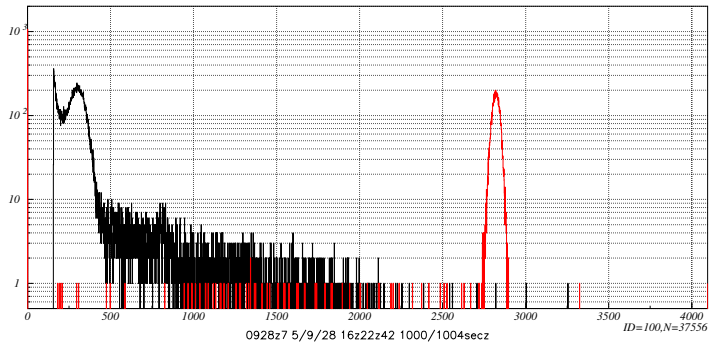
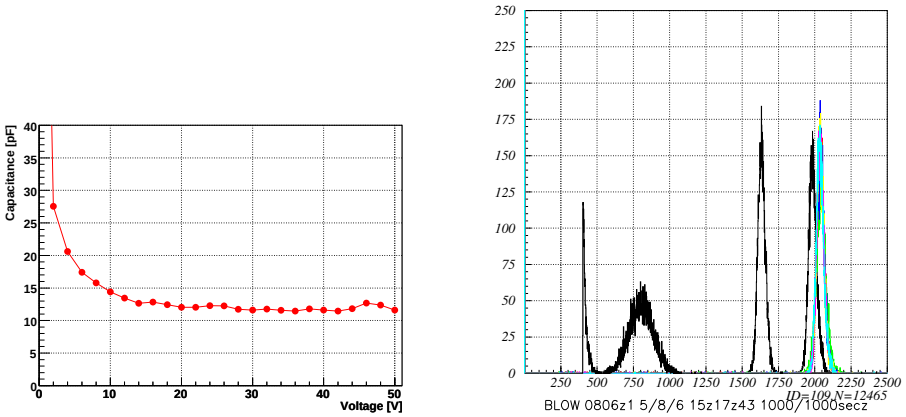


図 4.21: ^{133}Ba の X 線スペクトルとレーザー強度の比較。2750 ADC-ch のピークが赤外線レーザーによるもの。



(a) 検出器の容量　　(b) 赤外線照射時のパルスハイト

図 4.22: フォトダイオードの検出器容量とパルスハイトのバイアス電圧依存性

まず p^+ ストリップ (strip#P22) で読み出した場合について結果を述べていく。例として、図 4.24 に「1」の位置で得られたパルスハイトの分布を示した。図 4.25 には、それぞれの位置ごとに各バイアス電圧で得られたパルスハイト分布のピークチャンネルをプロットしている。

バイアス電圧がかかっていない状態でもフォトダイオードと同様に、ノイズと分離できるほどのシグナルが得られているが、これはキャリアの拡散が起こっているためだと考えられる。バイアス電圧をあげるにつれてパルスハイトが大きくなっているのがわかる。また、p^+ の形状から考えて、ストリップから離れるほどパルスハイトは小さくなると予想した。測定結果によると、p^+ ストリップ本体から離れると予想どおりにパルスハイトが小さくなっている。バイアス電圧に応じて空乏層が厚さを増しながら n^+ へ延びていく様子がうかがえる。また、p^+ の「枝」

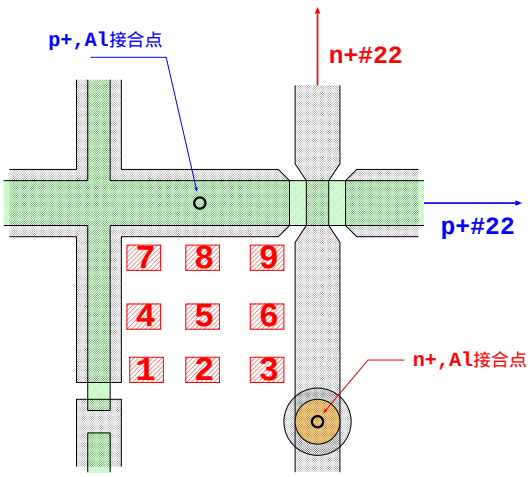


図 4.23: 照射位置とその番号

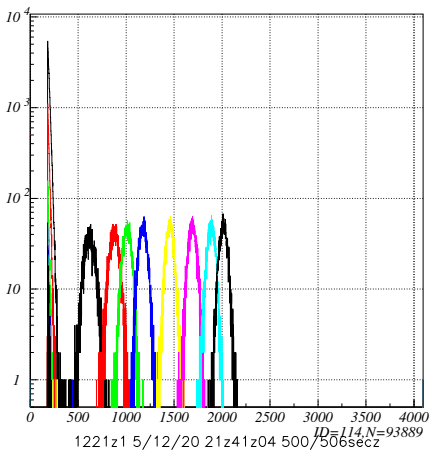


図 4.24: バイアス電圧の違いによるパルスハイトの差。位置「1」。

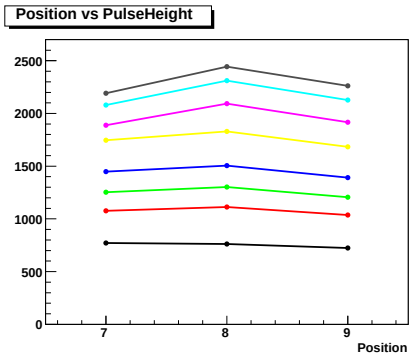
から遠ざかってもパルスハイトの変化は少なく、空乏層の拡がり方にはあまり影響していないといえる。

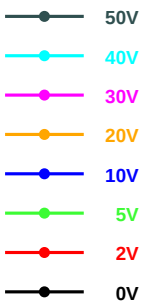
「7」の位置を基準にして 40 V でのパルスハイトの比較すると、「8」の位置ではパルスハイトが周囲よりも 11%も大きくでている。この位置はアルミ電極と p^+ ストリップの接合点に最も近い場所でもある。接合点の近くでは電荷の収集効率が良くなっていることや、深いとこまで空乏層が拡がっている可能性が示唆される。また、「1」「2」の位置で 10%、「3」の位置では 20%程度パルスハイトが小さくなっている。このことから n^+ 周辺では他よりも空乏層が薄いと考えられる。

つづいて、n^+ ストリップ (strip#N22) で読み出した結果を図 4.26 にしめす。グラフのスケールは、p 側 (図 4.25) と同じにしている。

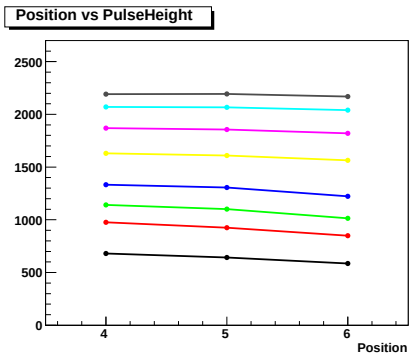
バイアス電圧は、30、40、50 V と変えている。これよりも低い電圧では赤外線レーザーによるシグナルとノイズとの分離が不可能であったため、データを取得していない。p^+ の場合とは対照的にバイアス電圧の違いによるパルスハイトの変化があまり見られない。30 V 以下でシグナルを分離できないのは、4.2.2 でのべたように、n^+ 周辺の空乏層の拡がり方がその原因として挙げられる。バイアス電圧が 10 V 程度になると p^+ からひろがってきた空乏層に覆われる。これによって n^+ どうしは分離されるが、空乏化していない領域とのギャップ (空乏化された領域) がせまいため容量が大きくノイズが多い [川崎修論 1995、阪大長島研]。30 V 程度ではそのギャップが拡がりノイズが減りはじめることでようやくシグナルが確認できるようになるためであると考えられる (図 4.27)。

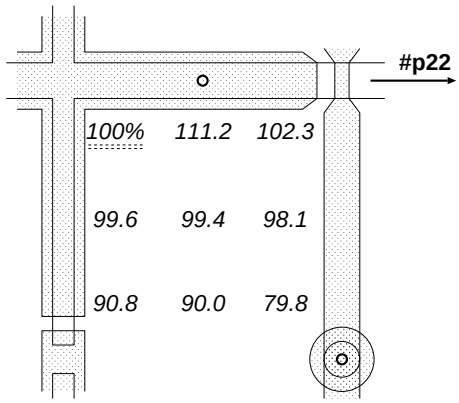
また、n^+ どうしが分離されたと考えられる 30 V 以上において、p^+ での場合と同じ位置へ照射してもパルスハイトが p^+ と n^+ とではまったく異なっていること



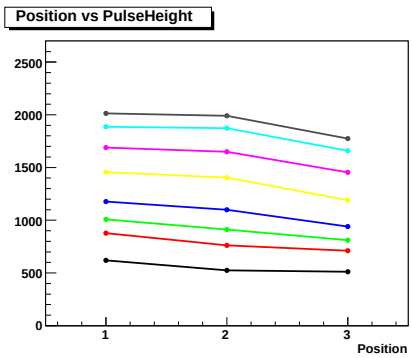


(a)7-8-9





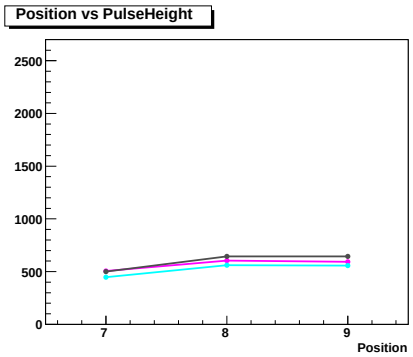
(b)4-5-6



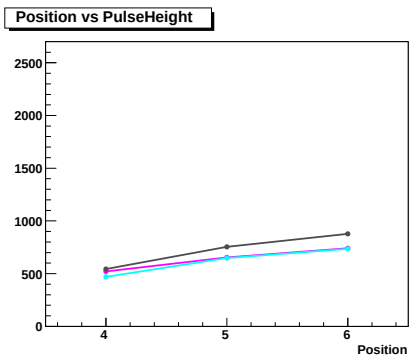
(c)1-2-3

図 4.25: P-strip 読み出しによる赤外線スキャンの結果。(左) 照射位置・バイアス電圧の違いによるパルスハイトの違い。(右中)「7」の位置を基準にしたパスルハイトの比 (バイアス電圧 40 V)

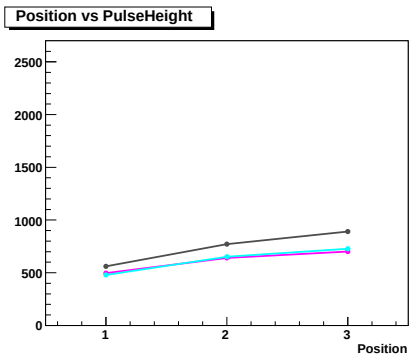
もわかる。これは n^+ が生成されたホールを収集しきれていないためである。試作素子の構造上、本来 n^+ へ収集されるべきのホールが、n バルクへ吸収されるということも起こり得る。そのために、4.3 のように n^+ 側では正確な X 線検出が行な



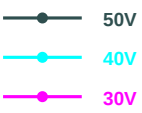
(a)7-8-9



(b)4-5-6



(c)1-2-3



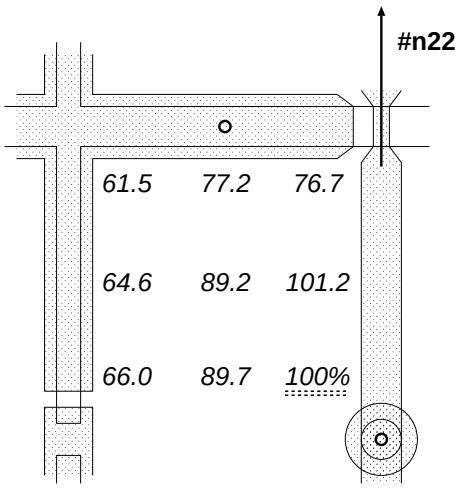


図 4.26: N-strip 読み出しによる赤外線スキャンの結果。(左) 照射位置・バイアス電圧の違いによるパルスハイトの違い。(右中)「3」の位置を基準にしたパスルハイトの比 (バイアス電圧 40 V)

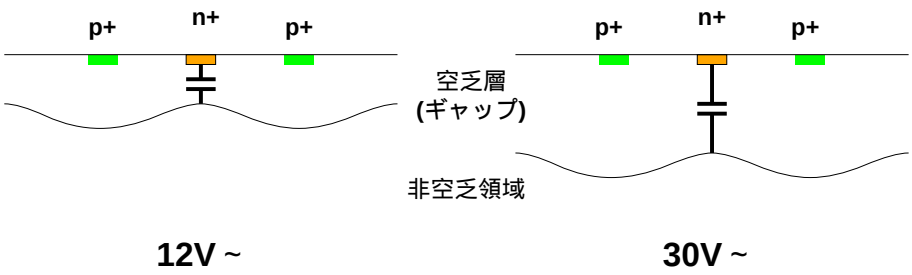


図 4.27: n^+ ストリップ下方にできる空乏層の様子。空乏層が薄い (ギャップが狭い) と大きな容量をもってしまう。

えなかったり、検出効率が p^+ 側と大きく異なること、n^+ の出力信号が非常に小さくなるなど、問題が起きているのだと考えられる。

n^+ で読み出した場合も、遠ざかるにつれてわずかにパルスハイトが小さくなっている。n^+ にもっとも近い「3」の位置を基準にして 40 V でのパルスハイトを比較したものを図 (4.26(右)) に示す。p^+ ストリップ「枝」の方向に離れると、40%程度もパルスハイトが小さくなっている。先に述べたように空乏層は存在していても電荷を収集できる領域が狭いことが理由になる。

また、n 側のアルミ電極に沿った方向で比較すると、p^+ の「枝」方向へ離れる場合よりもパルスハイトの低下は少ない。n 側のアルミ電極に向かって電荷が引きよせられることで収集効率が良くなっている可能性がある。

4.4.4 空乏領域の分布

これまでの評価によって空乏層について得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 10 V 前後で空乏層は n^+ に到達。50 V でも n^+ の周囲は層が薄い
- 場所によって空乏層厚に 10%の程度差がある。
- p^+ ストリップから離れるにつれて空乏層が薄くなる。
- ホールは p^+ に集まるが、電子が n^+ には集まらない地点がある。
- n^+ の周辺では急激に空乏層が薄くなる。

これらの結果から素子内部にひろがっている空乏層の状況を描くと、n ストリップに沿った断面において、空乏層は図 4.28 のような分布をしていると考えられる。

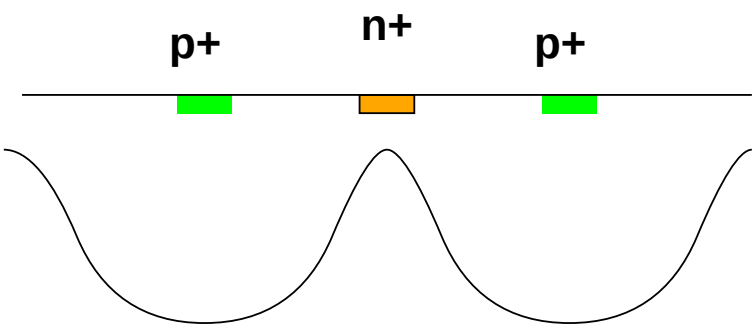


図 4.28: 評価結果から予想される空乏層の様子 (断面図)

4.5 今後の素子試作についての考察

片面から読み出し可能な X 線イメージセンサーの試作素子をつくり、検出器としての性能を評価した。それぞれの評価項目における詳細はこれまでに述べたとおりである。ここでは今回の評価結果と明らかになった問題点などから次の試作にむけた考察をおこなう。

素子全体のリーク電流は、20 °C で 1.6 nA、0 °C で 180 pA 程度である。温度を下げることでリーク電流を減らせることも確認でき、現状ではとくに課題となる項目ではない。

素子の耐圧が予想よりも低いため、高い電圧をかけられず完全に空乏化させることができていない。電極の重なった部分の絶縁に問題がある可能性が高く、再評価が必要である。この部分の絶縁層を厚くすることでも解決できるが、これはコストとの兼ね合いとなる。できるだけ単純な電極デザインを考えることで解決していくのが現在の開発の方針である。

検出器の容量は、バイアス電圧 40 V において全体で 100 pF 程度であることを確認した。空乏層が存在し、X 線検出器として ^{133}Ba の X 線スペクトルを取得することができた。撮像能力については、空乏層が一様でないことと n^+ の構造に問題があることで、完全とは言えない。n^+ の直下ではほとんど空乏層がないもしくは n^+ が電荷を集めていないと結論づけられたため、この領域にも感度を持たさせることが第一の課題になる。考えられる解決案として、現在の n 型半導体バルクを真性半導体バルクに変え、PIN 構造にすることが挙げられる。これによって p^+ と n^+ の両極で空乏層が拡がる条件がほぼ同じになり、不均一さの改善が期待できる。もしくはもっと単純に、p^+ と n^+ の構造を現状よりも大きくすることや形状を変更すること、また、n^+ 構造をずっと深くまでつくることは従来の両面構造に近づくため、n^+ での電荷収集効率を上げられる可能性は高く、これらの案も検討中である。p^+、n^+ 構造を大きくすることによる容量やリーク電流の増加に対処する必要もあるが、先に述べたように、まずは n^+ 周辺の不感領域をなくすことを考えていく。

今回試作した素子の性能評価によると、2 次元イメージセンサーとしてはまだ実用的なレベルに達しているとは言えない結果であったが、現状での課題が明らかとなり解決の方向性を得ることもできた。片面プロセスによる 2 次元センサーの開発は今回評価した素子が試作の第一段階であり、改善の余地は存分にあると考えられる。今回の評価結果をふまえて素子の設計を再度おこなうことで、空乏層厚や雑音特性など、片面イメージセンサーとしての性能の向上は十分に見込まれるものである。

第5章　まとめ

われわれの研究グループは、次世代の軟ガンマ線観測手法である多重コンプトン望遠鏡を実現させることを目的に、構成品となる計測システムの開発をすすめている。本研究では、半導体多層コンプトン望遠鏡の構成に不可欠な撮像型の検出器として、両面シリコンストリップ検出器：DSSD の開発と、片面から読み出し可能なシリコン検出器の新規開発をおこなった。その成果をまとめる。

- 検出器の持つエネルギー分解能を向上させるため、長さを 2 分割することでストリップ 1 本あたりの容量を低減させるという方法があり、この原理を採用して小型の DSSD を試作した。分割しない場合とくらべて検出器容量は原理どおりにほぼ半分になることが実測により確認された。20 °C において、14.4 keV から 122 keV の硬 X 線に対して平均で 1.7 keV のエネルギー分解能 (FWHM) となり、10%以上の性能向上を得た。今後の DSSD 製作において、素子サイズの拡大にともなう容量の増加に対処する方法のひとつとして、ストリップの分割が有効であることを実証した。

- 小型 DSSD のもつ X 線応答の線型性を、数種の X 線源を計測することにより再評価し、30 keV 以下の X 線に対して、2%以内で線形性が保たれていることを確認した。多チャンネル同時計測において低エネルギーの X 線に対する非線形な応答がみられたという報告に対しては、その原因が読み出し系にあるかどうかを判断できるほど計測値にズレは生じておらず許容範囲であると結論づけた。

- 半導体多層コンプトン望遠鏡の構成に必要となる 5 cm×5 cm DSSD の開発を進めた。その途中段階の試作として DSSD の素子サイズを 4 cm 四方に拡大させた。小型 DSSD とくらべてリーク電流が単位面積あたり 30%ほど増加しているが、低温下で十分に減らすことができるため現時点では問題とはならない。検出器容量はサイズの拡大にともなう程度の増加を確認し、0 °C において、平均で 1.5 keV のエネルギー分解能が得られることに加え、下限は 5 keV 程度まで検出できることを示した。DSSD の高い性能と、5 cm 四方への素子拡大が可能であることを実証した。

- 製造歩留まり、扱いやすさの向上、製造コストの削減などをめざし、片面プロセスを採用した X 線計測用の 2 次元センサーを新規に開発した。容量測定、

赤外線レーザー照射により空乏層の状態を明らかにしたことで、試作素子の表面電極、p^+、n^+ 構造の問題点を指摘し、性能向上のために、今後おこなう試作の方針を示した。電極構造の再設計とバルクタイプの変更により、耐圧の向上と不感層の低減を見込んでいる。位置検出能力は不完全ながらも、X 線計測によりスペクトルを取得し、撮像型の検出器としての有望性を確認した。

謝辞

本研究を行なうにあたり、シリコン半導体検出器について御指導いただきました大杉教授に心より感謝いたします。また同じ検出器について研究することができたことを大変光栄におもいます。助教授の深沢先生には、約 3×365 日お世話になりつづけたようにおもいます。ありがとうございました。おかげでなんとか研究をすすめることができました。

研究室のみなさん。みんながいたおかげでがんばれました。とくに 4 年生のがんばるすがたにはたいへん刺激をうけたようにおもいます。事務の石井さん、上原さん、荷物の配送や事務手続きなどお世話になりありがとうございました。

先輩、後輩、友達、家族、みなさん、この数年間、ずっと支えていただき、ありがとうございました。

06/02/10 澤本直之

参考文献

[1] NeXT 衛星計画提案書, NeXT 衛星ワーキンググループ, 2005

[2] ISAS：宇宙科学研究本部, 激動する宇宙を探る新しい窓 NeXT, http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.288/mission-03.html

[3] T.Kamae, et al., A new method to measure energy,direction, and polarization of gamma rays, Nucl. Inst. and Meth A 260 (1987) 254

[4] H.Tajima, et al., Low noise double-sided silicon strip detector for multiple-Compton gamma-ray telescope, SPIE, Vol.4851, 2002

[5] T.Takahashi, et al., Future hard x-ray and gamma-ray observations, ASP 251,pp.210-213, 2002

[6] T.Takahashi, et al., High-resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope, SPIE,2002

[7] 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」, 広島大学 学位修士論文, 2003

[8] 岡田祐「テルル化カドミウム半導体を用いた高速ガンマ線検出器とそのイメージングへの応用」, 東京大学 学位修士論文, 2002

[9] 三谷烈史「高分解能 CdTe アレイ検出器の開発と宇宙観測用ガンマ線イメージャーへの応用」, 東京大学 学位修士論文, 2003

[10] ideas VA32TA specification Version 0.92,

[11] 中本達也「修論」広島大学 学位修士論文, 2002

[12] 澤本直之 広島大学 卒業論文, 2003

[13] 松浦大介「APD+BGO プレートを用いた Anti 検出器の検証」, 広島大学 卒業論文, 2003

[14] 住澤一高「大面積シリコンストリップ検出器の試験用赤外線レーザーシステムの製作」, 大阪大学 学位修士論文, 1997

[15] 川崎健夫「大面積両面型シリコンストリップ検出器の研究」, 大阪大学 学位修士論文, 1995

[16] Glenn F.Knoll 木村逸郎 阪井英次 訳「放射線計測ハンドブック 第 2 版」, 日刊工業新聞社, 1991

[17] XCOM Photon Cross Section Database, http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html