

2023年度 卒業論文

LHC-ALICE 実験 FoCal 検出器のための
電荷増幅器の開発と測定

2024年3月22日

奈良女子大学
理学部数物科学科物理学コース

20310355 高村 舞

概要

LHC-ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 実験は、欧州共同原子核研究機構 (CERN) にある世界最大のハドロン衝突加速器 LHC(Large Hadron Collider) を用いた実験である。初期宇宙に存在したとされる高温・高密度下における「クォークグルーオンプラズマ (QGP)」を人工的に生成し、その解明を目指している。ALICE 実験では FoCal(Forward Calorimeter) 検出器が導入される予定が進んでいる。FoCal は FoCal-E と FoCal-H で構成され、FoCal-E は前方方向の直接光子を測定するための検出器である。FoCal-E 検出器は放射線による被曝により、性能に影響が出るのではないかと懸念されている。そこで本研究では、Si センサーの性能が、中性子被曝の前後でどのように変化したかを評価する。評価方法として、被曝した Si センサーと無被曝のセンサーを用意し、LED 光に対する応答を測定する。Si センサーからの微小な信号電流を測定するため、電荷敏感増幅器の製作し、それを用いて LED 光による信号をオシロスコープを用いて測定した。

目次

第1章	序論	2
1.1	クォーク・グルーオン・プラズマ	2
1.2	LHC-ALICE 実験	2
1.3	FoCal 検出器	3
1.3.1	FoCal-E	4
1.4	本研究の目的	4
第2章	半導体検出器	5
2.1	半導体	5
2.2	n型半導体	5
2.3	p型半導体	5
2.4	pn接合	5
2.5	Si半導体検出器	6
第3章	電荷増幅器の製作	7
3.1	原理	7
3.2	回路構成	7
3.2.1	電荷敏感増幅器 (CSA, Charge Sensitive Amplifier)	7
3.2.2	電荷敏感増幅器の動作確認	8
3.2.3	フォロワー回路	8
3.2.4	使用したオペアンプ	10
3.2.5	製作した回路	11
3.3	セットアップ	11
3.4	動作確認結果	12
第4章	LEDを用いたSiセンサーの応答測定	13
4.1	セットアップ	13
4.2	測定に用いた装置	14
4.3	結果	15
第5章	まとめ	16
	謝辞	17
	参考文献	17

第1章 序論

1.1 クォーク・グルーオン・プラズマ

クォークグルーオンプラズマ (Quark-Gluon Plasma, QGP) は宇宙誕生直後存在したとされる超高温・高密度下でクォークとグルーオンがハドロンの閉じ込めから解放された状態である。

QGP を生成するためには、高エネルギーの重イオン衝突が利用される。衝突により原子核内のパートン (クォークやグルーオン) が散乱を繰り返し、次第に熱平衡に達して QGP が形成される。しかし、系は膨張しエネルギー密度が急激に低下するため、温度も下がり、最終的にハドロン化が進行し、ハドロンは相互作用を終えた後飛び去っていく。[1]

QGP には重イオンという非平衡状態から QGP という熱平衡状態に遷移する時間 (熱化時間) が $1\text{fm}/c$ 程度と考えられておりこの時間が短すぎることで、衝突させる重イオンの中にその原因となる状態 (カラーガラス凝縮) があるかもしれない、など未解決な事象がある。図 1.1 は宇宙の歴史における QGP の位置を表している。QGP の解明が宇宙初期状態の理解につながると期待されている。[2]

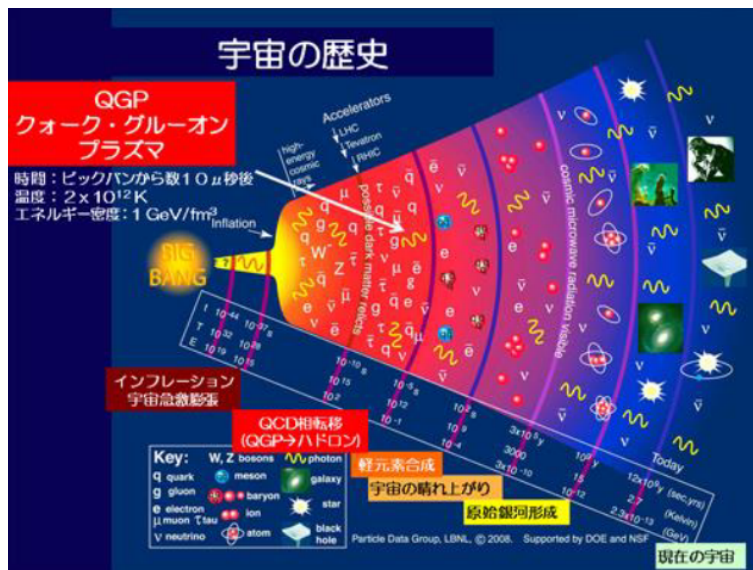


図 1.1: 宇宙の歴史

1.2 LHC-ALICE 実験

LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は欧州共同原子核研究機構 (CERN) によって建設された世界最大のハドロン衝突型加速器であり、全周は約 27km に及ぶ。衝突核種は陽子+陽子、鉛+鉛、陽子+鉛で、衝突エネルギーは 2.76TeV (鉛+鉛) である。その中で行われている ALICE 実験は唯

一重イオン衝突に特化した実験で QGP の生成・解明を目的としている。図 1.2 は ALICE 測定器の全体像を示す。中央ラピディティ領域を覆う検出器と、前方領域を覆う検出器から構成されている。

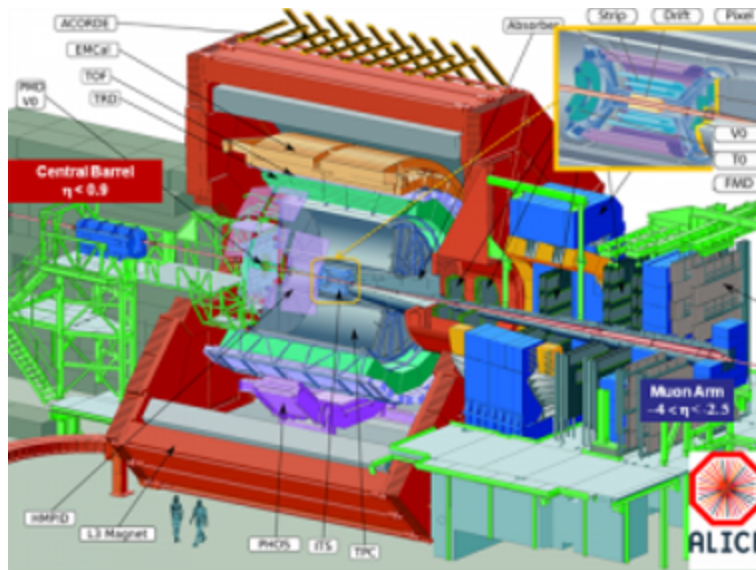


図 1.2: ALICE 測定器の全体像。中央ラピディティ領域を検出器と、前方検出器から構成される。

1.3 FoCal 検出器

FoCal (Forward Calorimeter) は 2029 年に開始される Run4 でのデータ収集を目指し、現在開発が進んでいる新しい検出器である (図 1.3)。衝突点から 7m 前方の位置に設置され、直接光子を測定するための電磁カロリメータ FOCAL-E と、ハドロンシャワーを測定するハドロンカロリメータ FOCAL-H で構成される。

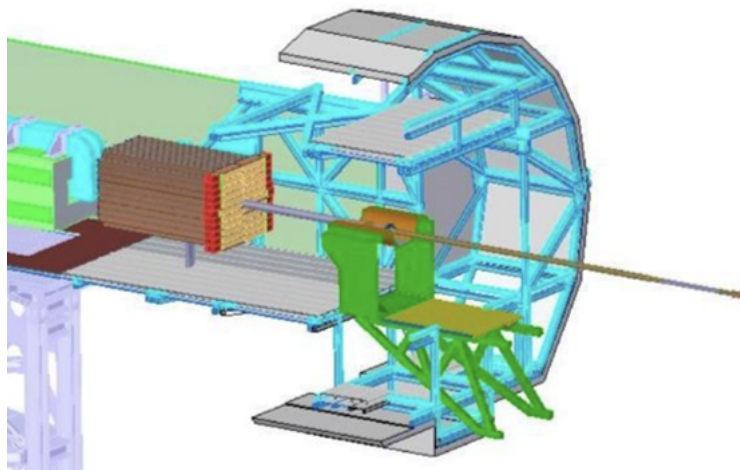


図 1.3: FoCal 検出器。衝突点から 7m 前方の位置に設置されている。

1.3.1 FoCal-E

FoCal-E(Foward Electromagnetic Calorimeter) は Si 検出層と W 吸収層が 20 層ずつ並んでいる。検出層 (Si) は、エネルギー測定を行う LGL(LOW Granularity Layer) と高い位置分解能を持つ HGL(High Granularity Layer) の 2 種類あり、吸収層 (W) で入射した粒子を電磁シャワーにしている。図 1.4 上の図は LGL と HGL の模式図であり、下の図は 1 モジュールの模式図である。W 層の厚みは 1 層あたり 3.5mm。これは W の放射長 = 3.5mm に等しい。また、LGL のセンサーは 1 セル 10mmx10mm、HGL のセンサーは 29umx26um である。[3]

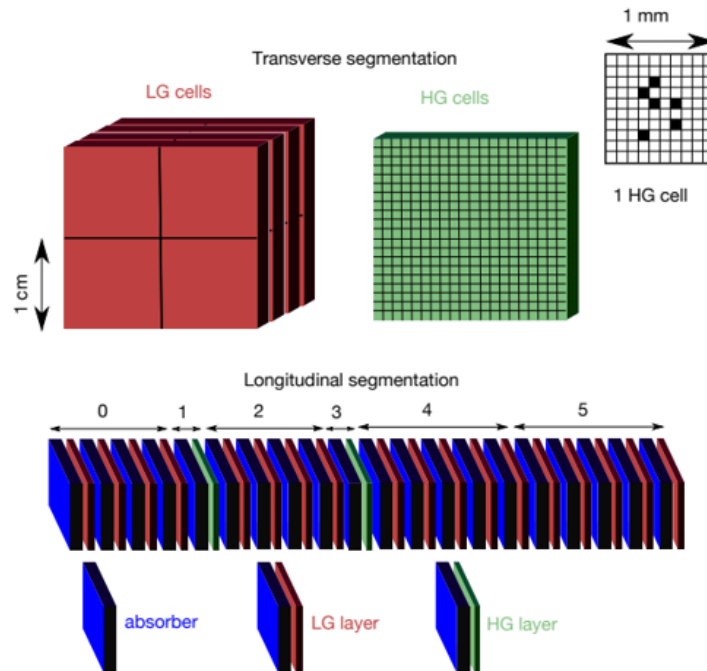


図 1.4: FoCal-E

1.4 本研究の目的

FoCal 検出器は放射線の影響により性能が変化してしまうのではないかと考えられている。そこで FoCal 検出器で使用されている Si センサーの性能が中性子被曝の前後でどのように変化するかを評価するために、中性子被曝した Si センサーと被曝していない Si センサーに LED を照射してどのような違いが現れるのかを確認する。この測定を行うため、Si センサーからの微小な電流信号を積算して電圧値に変換する電荷増幅器を製作する。

第2章 半導体検出器

2.1 半導体

半導体とは導体と絶縁体の中間の性質を持つ物質であり、導体に比べれば少ない量の電流を流すことができる。バンド理論によると、半導体には有限のバンドギャップがあるが、ギャップ幅が短いので、比較的容易に電動帯に電子が遷移し、電流が生じる。この半ば電流を流す性質をうまく使うことによって、電流を制御し、電子機器に活用している。代表的な半導体としてシリコン (Si) がある。電気を通したり通さなかったりすることで電流制御を可能にしている。

2.2 n型半導体

自由電子を移動させて電気を通す半導体である。シリコン (Si) にリン (P) やヒ素 (As) などの不純物を添加して作り、自由電子は負電荷を持つため、電圧を印加することで正側に移動して電気が流れるという仕組みである。

2.3 p型半導体

正孔（ホール）への電子の移動を利用して電気を通す半導体である。主に利用する不純物は、ホウ素 (B) やインジウム (In) で、正孔がある状態で電圧を印加すると、電子は正側へ動き、隣の電子が正孔に移動して電気が流れるという仕組みである。

2.4 pn接合

n型半導体とp型半導体を組み合わせたものをpn接合という。pn接合ができるとn型半導体の自由電子がp型半導体の方向へ、p型の正孔がn型の方向へ移動する。キャリアは接合面で結合し相殺され、お互いのキャリアが消滅した接合面付近は「空乏層」と呼ばれる。空乏層がある状態でp型側に正電圧を印加すると、自由電子と正孔は接触面へ向かい、次第に空乏層が縮小し、電流が流れる。一方、負電圧を印加すると空乏層が広がる。更に電圧を高めると、全体が空乏層となる。この状態を全空乏という。pn接合を使う半導体素子をpn接合ダイオードといい、基本的にダイオードはpn接合ダイオードを指す。

2.5 Si 半導体検出器

Si センサーとは、シリコンダイオードを用いた検出器のことである。半導体検出器では逆向きに電圧をかけて空乏層を広げ検出効率を上げている。空乏層に粒子が入射するとホール・電子対ができ、逆方向電圧がかけられているので、電子は n 型、ホールは p 型に引き寄せられる。両端の電極にキャリアが到達するとパルスが発生するので空乏層を通った荷電粒子を検出することができる。このパルスの大きさは荷電粒子が空乏層内で落としたエネルギー、すなわち空乏層内で電子ホール対を生成するために必要なエネルギー 3.6eV に比例するのでパルスの大きさが分かればエネルギー測定も可能になる。[4] [5]

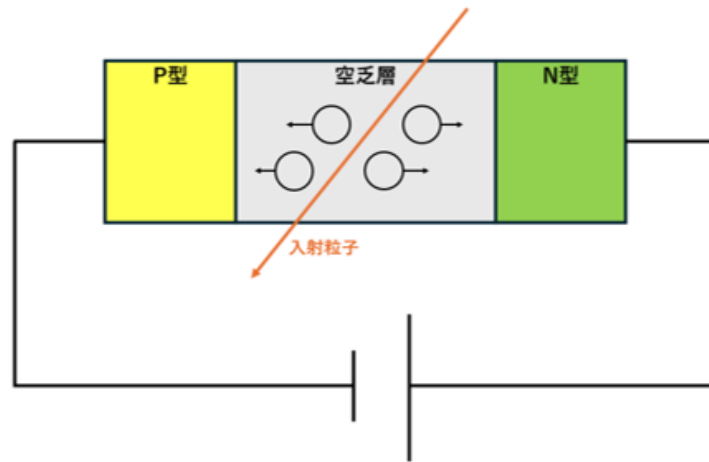


図 2.1: Si 半導体検出器の原理

第3章 電荷増幅器の製作

3.1 原理

Si センサーを荷電粒子が通過したときの信号は、電流パルスとして出力される。この電流の積分値 (= 電荷量) が、粒子が Si センサー中で落としたエネルギーに相当する。電流パルスは小さく測定が難しいので、パルスを積分した電荷量を測定する。以降、Si センサーからの電荷量を測定するために開発した回路について説明する。

3.2 回路構成

製作した電荷増幅器の全体像は図 3.1 の通り。増幅回路は 2 つの部分で構成されている。電荷敏感増幅器、フォロワ回路。フォロワ回路はさらに以下の 2 つの部分に分けられる。Pole-Zero 回路、非反転増幅回路。次節では、それぞれについて説明する。

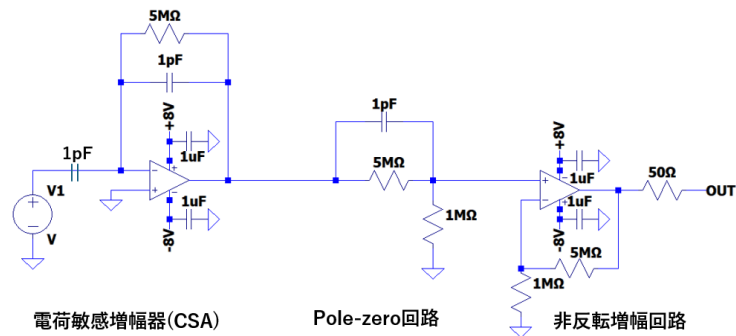


図 3.1: 電荷増幅器

3.2.1 電荷敏感増幅器 (CSA, Charge Sensitive Amplifier)

電荷敏感増幅器はセンサーからの微小な電流信号を積分して測定可能な電圧値に変換する役割を持つ。時定数は抵抗とコンデンサーの積で決まり、今回は $5\text{Meg } \Omega$ の抵抗と 1pF のコンデンサーを使用したので時定数は 5usec である。[6]

$$1\text{pF} \times 5\text{Meg} = 5\text{usec}$$

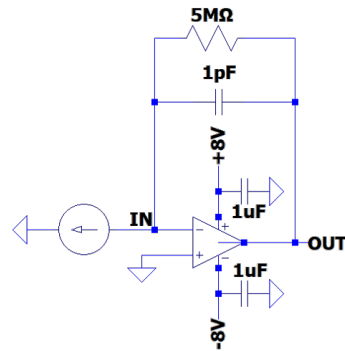


図 3.2: 電荷敏感増幅器

3.2.2 電荷敏感増幅器の動作確認

電荷敏感増幅器の回路を製作し、動作確認を行った。黄色が入力波形、水色が出力波形である。時定数は $5\mu\text{s}$ なので予想通りの波形が確認できた。しかし受け手側 (オシロスコープ) のインピーダンスが $1\text{M}\Omega$ と高くなっているのでインピーダンスを下げるためにフォロワー回路を製作する。

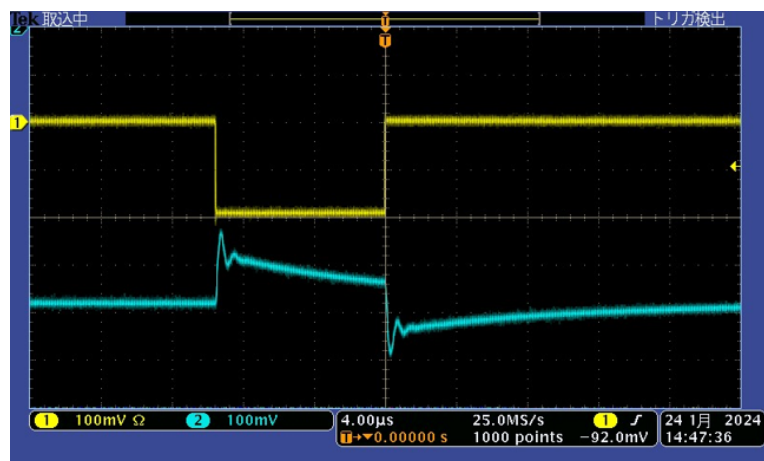


図 3.3: 電荷敏感増幅器の動作確認

3.2.3 フォロワー回路

csa 部分だけでは出力インピーダンスが高くなってしまうので、出力インピーダンスを下げるためにフォロワー回路を製作した。フォロワー回路部分は図 3.4 の通りである。

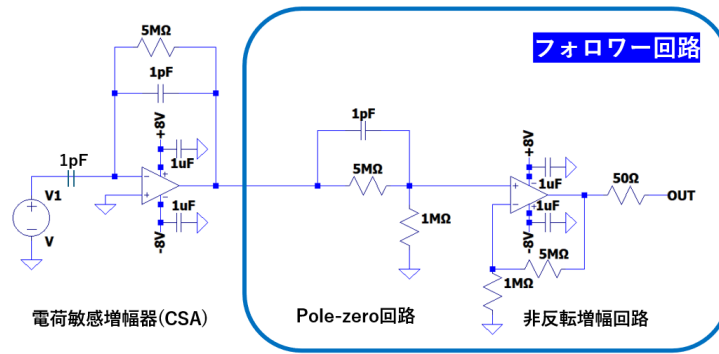


図 3.4: フォロワー回路

Pole-zero 回路

時定数を変更するための回路である。今回時定数を変更する必要はないのでコンデンサーと抵抗の値は csa と同じにしている。

$$e^{-\frac{t}{CR}} \frac{CR}{CR+Z_1} = e^{-\frac{t}{CR+Z_1}}$$

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{out} = R_1 \cdot I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

今回は、 $V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in} = \frac{1}{1+5} V_{in} = \frac{1}{6} V_{in}$ より、出力電圧が入力電圧に対して $\frac{1}{6}$ になる。

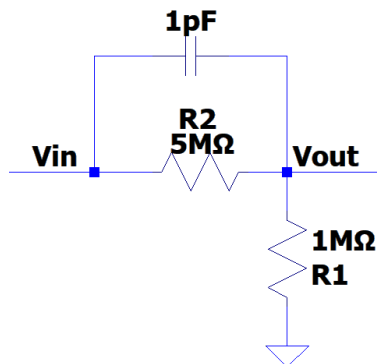


図 3.5: pole-zero 回路

非反転増幅回路

電圧を増幅させる役割。オペアンプの+端子と-端子では電位差が生じないようにしている。
($V_1 = V_2$)

$$I_1 = \frac{V_2}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

$$V_{out} = (R_1 + R_2) \cdot I_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

今回、 $V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 = \frac{1 + 5}{1} V_1 = 6V_1$ より、出力電圧は入力電圧に対して 6 倍になる。

フォロワー回路で電圧値を増幅することが目的ではないので、Pole-zero 回路と組み合わせて電圧値を元に戻している。

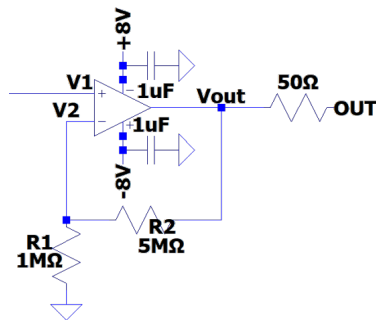


図 3.6: 非反転増幅回路

3.2.4 使用したオペアンプ

オペアンプは TEXAS INSTRUMENTS 社の LM6142 を使用した。入力バイアス電流が小さいため出力に影響を与える誤差が小さくなり、扱いやすいのが特徴である。

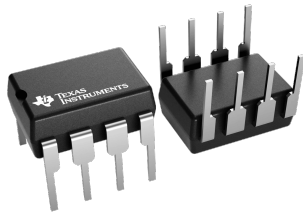


図 3.7: 使用したオペアンプ

項目	値
入力オフセット電圧	1.0[mV]
入力バイアス電流	250[nA]
同相入力範囲	0~5.0[V]
広利得帯域幅積	17[MHz]

図 3.8: LM6142 のデータ

3.2.5 製作した回路

製作した電荷増幅器が以下の通りである。

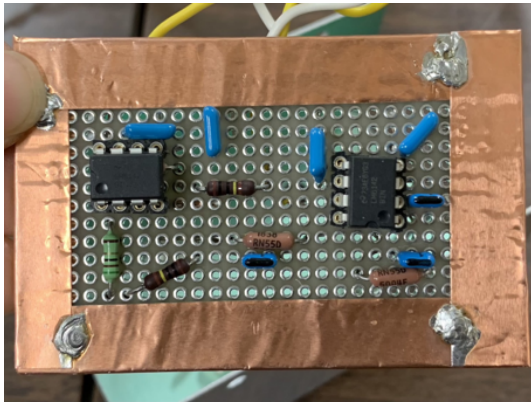


図 3.9: 電荷増幅器表

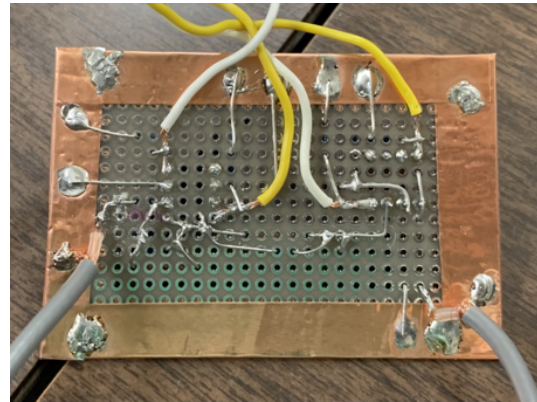


図 3.10: 電荷増幅器裏

3.3 セットアップ

以下のセットアップで出力を確認した。ClockGenerator で生成した矩形波 (方形波) を電荷増幅器に入力し、その出力を測定した。

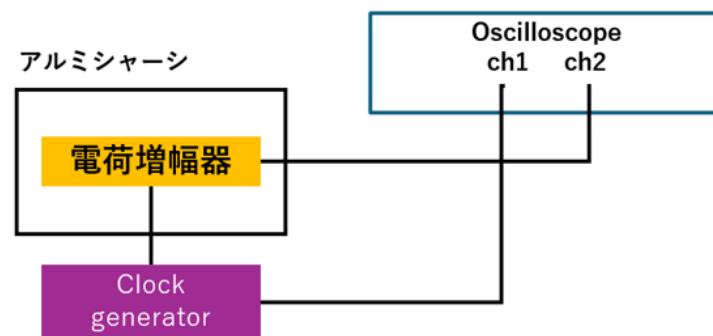


図 3.11: 電荷増幅器の出力確認セットアップ

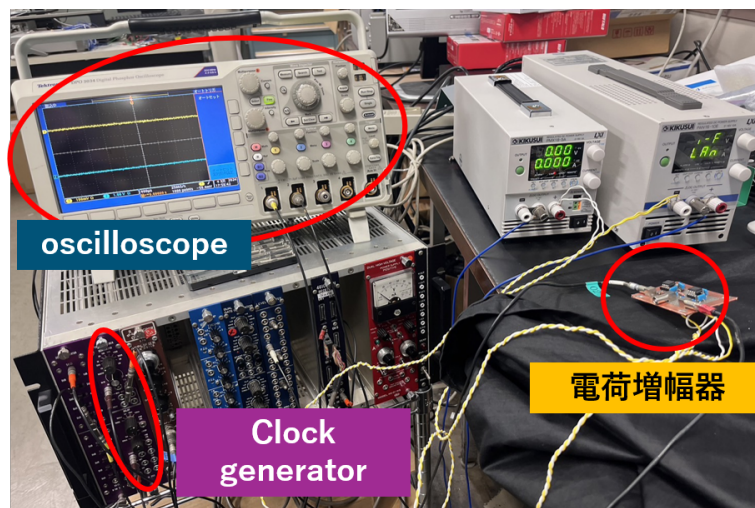


図 3.12: セットアップの様子

3.4 動作確認結果

出力結果は以下のようになった。黄色が入力波形、水色が電荷増幅器からの出力である。受け手側 (オシロスコープ) のインピーダンスは $50\ \Omega$ に設定している。時定数が $5\ \mu\text{sec}$ 、インピーダンス $50\ \Omega$ でうまく出力が確認できた。

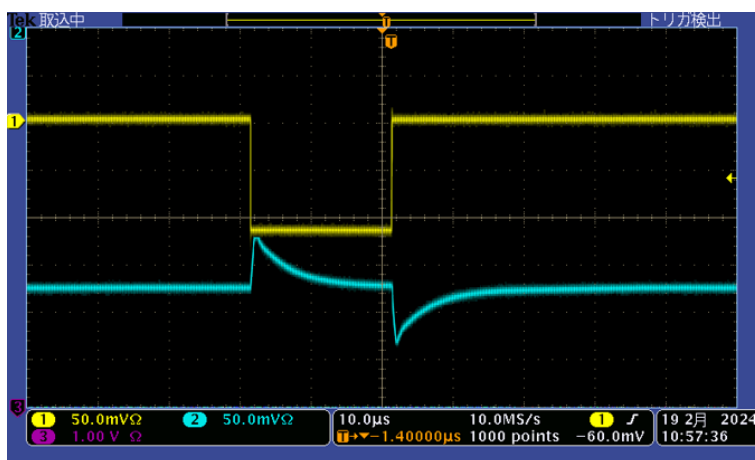


図 3.13: 出力結果

第4章 LEDを用いたSiセンサーの応答測定

4.1 セットアップ

測定は以下のセットアップで行った。中性子照射前の Si chip にピコアンメーターで逆バイアスをかけ、オシロスコープで出力を確認する。出力が確認できれば測定を行う。

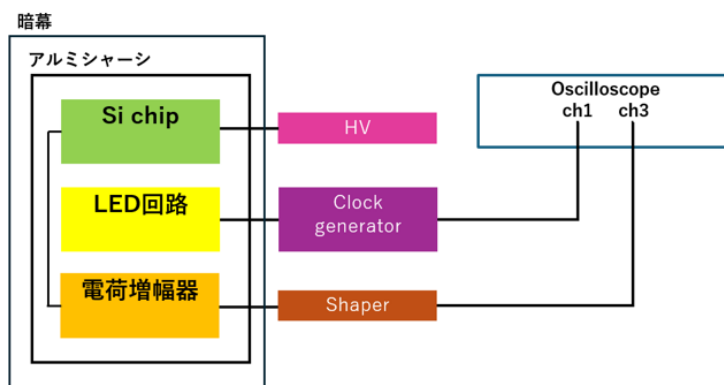


図 4.1: 全体のセットアップ

アルミシャーシ内

LED の光を Si chip で受け取り、電流信号を電圧信号に変換する。

HV

ピコアンメーターで Si chip に逆高電圧をかけ、空乏層を広げて検出効率を上げている。50V、電流リミットは 200nA に設定した。

Clock generator

LED 回路に TTL 信号を送る。

Shaper

電荷増幅器からの信号を増幅したり減衰時間を変化させて信号を見やすくする。

Oscilloscope

Clock generator に入力した信号を ch1、電荷増幅器からの出力信号を ch3 で測定した。

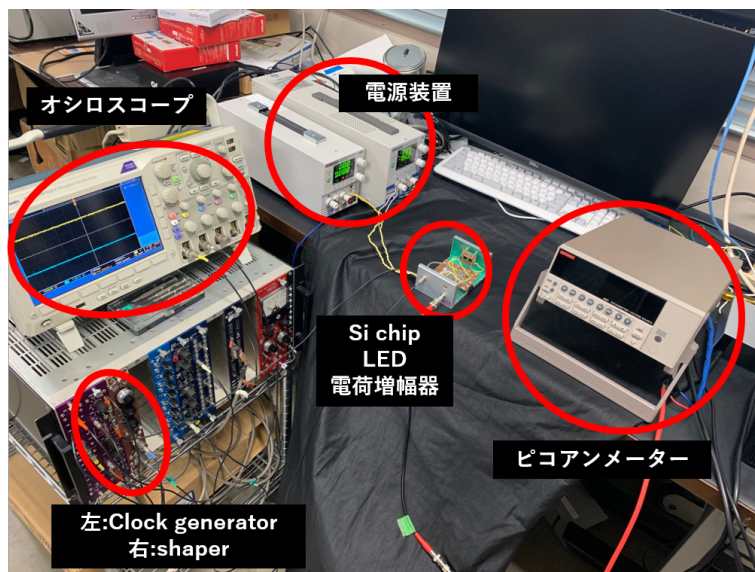


図 4.2: セットアップの様子

4.2 測定に用いた装置

n 型 Si chip(6 × 6mm)・LED・電荷増幅器 (図 4.3)、電源装置 (図 4.4)、Clock generator・shaper(図 4.7)、ピコアンメーター (図 4.6)、オシロスコープ (図 4.5)

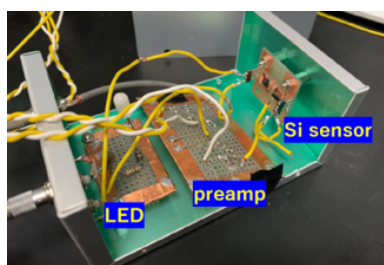


図 4.3: Si chip, 電荷増幅器, LED



図 4.4: 電源装置

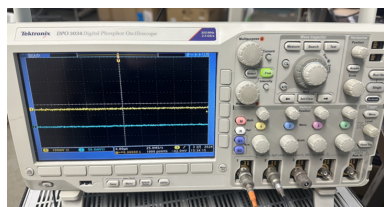


図 4.5: オシロスコープ



図 4.6: ピコアンメーター



図 4.7: Clock generator,shaper

4.3 結果

黄色がLEDに入力したTTL信号、赤色が電荷増幅器を通したSi chipからの出力である。センサーからの信号がオシロスコープで確認できた。しかしノイズが多くなっている。

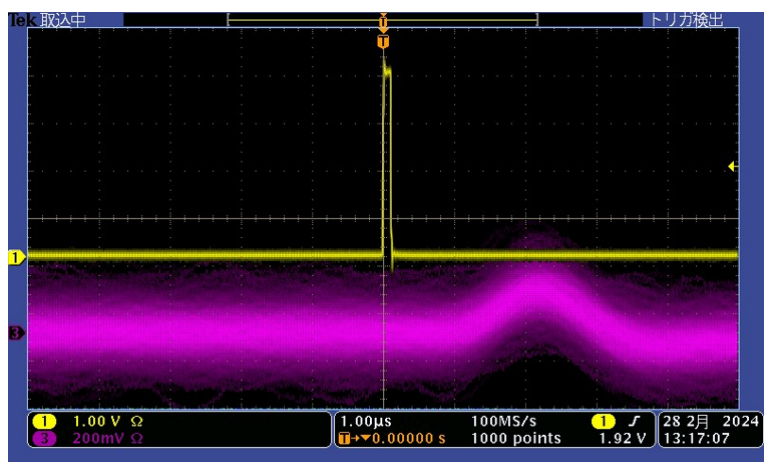


図 4.8: 出力結果

第5章 まとめ

電荷増幅器の製作に関してはインピーダンスコントロールに成功し、想定通りの波形が確認できた。Si chipからの信号読み出しはオシロスコープで確認できたが、出力波形が不安定なので今後電荷増幅器の修復を行う。また、データ解析の際に信号がノイズに埋もれないようにノイズを軽減するように回路を修正する。電荷増幅器の改善後、中性子被曝後のSi chipでも同様のセットアップを用いて信号を測定し中性子被曝前のSi chipと比較を行い、性能の変化を評価したいと考えている。

謝辞

本研究において、たくさんの方々にお世話になりました。特に指導教官である蜂谷先生には初めて触れる装置の使い方、物理学の知識、研究に取り組む意識に至るまでたくさんの事を教えていただきました。研究を行うことができるのか不安でしたが、進捗を都度聞いていただいたり、研究方針の相談に乗っていただくことでここまで至ることができました。また、宮林先生、下村先生には本研究へアドバイス下さり、ミーティングでの質問などでお世話になりました。そして、研究室の先輩方、同回生の皆様にも感謝申し上げます。最後に、これまで支えていただいた全ての皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 秋葉康之. クォーク・グルーオン・プラズマの物理 実験室で再現する宇宙の始まり. 2014.
- [2] 米・重イオン衝突型加速器「RHIC」で、4兆度の超高温状態を実現 - 原子は熔け「完全液体」となり、宇宙創成時のクォークスープを生み出す高温に一. 2010.
- [3] Technical Design Report 4 of the ALICE Forward Calorimeter (FoCal). 2024.
- [4] 犬飼泰地. LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ開発のための 汎用型電荷敏感増幅器の製作. 2022.
- [5] 坪山透. シリコンセンサーの基礎, <https://research.kek.jp/people/tsuboy/20090601-soukendai/soukendai-jisshuu.pdf>(参照:2024-09).
- [6] 依田浩志郎. 高エネルギー原子核実験用高周波対応とノイズ低減を実現するシリコンセンサ用の汎用前置増幅器の開発. 2023.