

2025 年度 卒業論文

高速 LED ドライバ回路の製作 および特性評価

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学 EP
所属 南野・Bronner 研究室

学籍番号 2264092

北島 碧

2026 年 2 月 12 日

要旨

現在、大強度陽子加速器施設(J-PARC)で生成されたニュートリノを岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデ検出器に飛ばし、ニュートリノ振動を精密に測定する T2K(Tokai to Kamioka)実験が行われている。T2K 実験ではビーム標的の下流に前置ニュートリノ検出器群が設置されており、その1つである WAGASCI 検出器は、水をニュートリノ標的とした反応断面積を測定することにより、ニュートリノ振動の解析における統計誤差の低減を目的としている。

WAGASCI 検出器のデータ収集系では、異なる Detector InterFace(DIF)に繋がったチャンネル間で時間の同期が取れていない問題が発生している。この DIF 間におけるタイミングジッタを解消するには、各 DIF に接続されている MPPC に対して、共通の光源からの光を同時に入射させ、イベント毎に DIF 間の時間補正を行う必要がある。この時、発光速度が高速であり、再現性が高い光源を用いることで時間分解能の評価の精度向上が見込める。

本研究では、WAGASCI 検出器における DIF 間のタイミングジッタを 1ns 程度まで低減させることを目的に、高速 LED ドライバ回路の製作を行い、その有効性を検証した。

目次

第1章 WAGASCI 検出器	1
1.1 構成.....	1
1.2 エレクトロニクス.....	2
1.2.1 構成.....	2
1.2.2 要求される時間分解能の精度	3
1.2.3 MPPC.....	4
第2章 高速LED ドライバ回路の製作	6
2.1 目的.....	6
2.2 ドライバ回路.....	6
2.2.1 LED 発光の仕組み	7
2.2.2 トランジスタ	7
2.2.3 LED 素子.....	8
2.2.4 その他素子の役割と特徴.....	8
2.3 回路シミュレーション	9
第3章 測定系	12
3.1 測定機器	12
3.2 測定方法	16
3.3 解析.....	17
第4章 結果と考察	18
4.1 LED パルスの信号波形.....	18
4.2 時間分解能の評価.....	19
4.3 立ち上がり時間の評価	20
第5章 結論	22
謝辞	23
参考文献	24

第1章

WAGASCI 検出器

WAGASCI 検出器群は T2K 実験における前置検出器群の 1 つであり、振動前のニュートリノを観測するために茨城県東海村の J-PARC に設置されている。

1.1 構成

WAGASCI 検出器群は、WAGASCI、Proton Module、Wall-MRD、Baby-MIND の 4 つの検出器で構成されている。外観の様子を図 1.1 に示す。また、WAGASCI と Wall-MRD についての概要を記す。



図 1.1 WAGASCI 検出器群の外観 [1]

WAGASCI

WAGASCI(Water Grid And SCIntillator)は水を標的としたニュートリノ検出器であり、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子のヒット時間の情報を記録している。3次元格子状のシンチレータ検出器で、標的部は水とプラスチックが組み合わさって構成されており、水タンクの内部に配置されている。荷電粒子がシンチレータを通過する際に発生する光の信号を波長変換ファイバと半導体光検出器 MPPC で読みだしている。なお、ビーム上流と下流で合計 2 台設置されている。

Wall-MRD

Wall-MRD(Muon Range Detector)は鉄とプラスチックシンチレータが組み合わさった構造の検出器であり、ビーム方向に対して横方向に散乱したミュオンの検出とその運動量の測定を目的としている。シンチレータに波長変換ファイバが波状に埋め込まれており、両端の MPPC でシンチレーション光を読みだしている。Wall-MRD は Proton Module の両サイドに 2 台設置されており、WAGASCI から約 50cm 離れた場所にある。

1.2 エレクトロニクス

1.2.1 構成

WAGASCI と Wall-MRD のエレクトロニクスの配置図を図 1.2 に示す。

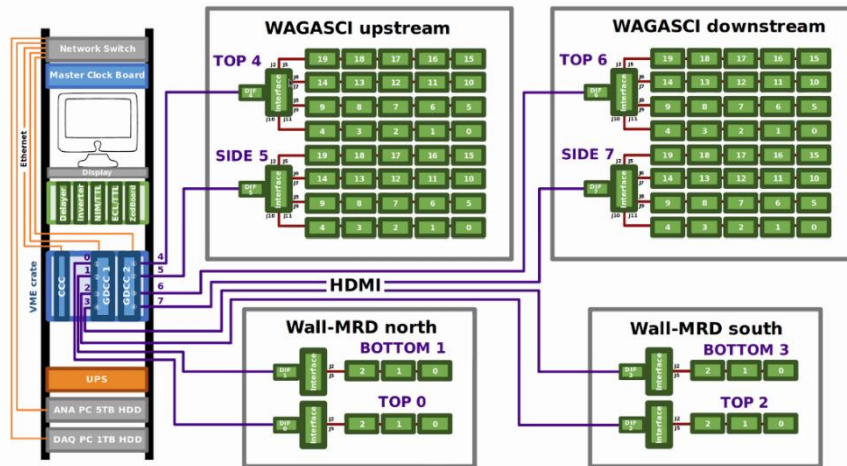


図 1.2 WAGASCI と Wall-MRD のエレクトロニクス配置図 [2]

WAGASCI には TOP、SIDE それぞれに 1 枚のインターフェース(IF)から ASU(Active Sensor Unit)が 20 枚ずつ、合計 40 枚接続されている。さらに各 ASU には MPPC が 32 チャンネルずつ接続されており、TOP、SIDE 含めて 1 台の WAGASCI に合計 1,280 チャンネルの MPPC が接続されている。

一方、Wall-MRD には TOP、BOTTOM それぞれに 1 枚の IF から ASU が 3 枚ずつ、合計 6 枚接続されている。さらに ASU 3 枚に MPPC が 80 チャンネル接続されており、TOP、BOTTOM 含めて 1 台の Wall-MRD に合計 160 チャンネルの MPPC が接続されている。

表 1 に WAGASCI および Wall-MRD 1 台に搭載されている DIF、IF、ASU、MPPC のチャンネル数をまとめる。

表1 WAGASCI、Wall-MRD の構成

	WAGASCI	Wall-MRD
DIF および IF の枚数	2 枚	2 枚
ASU の枚数	40 枚	6 枚
MPPC のチャンネル数	1,280	160

各 DIF は GDCC(Global Data Concentrator Card)に接続されており、出力されたデジタル信号がこの GDCC を通過して DAQ PC に記録される。トリガ信号とクロック信号は、CCC(Clock and Control Card)から GDCC、DIF、IF を経由して ASU に送られる。

1.2.2 要求される時間分解能の精度

WAGASCI、Wall-MRD で用いられるデータ収集システムの概略図を図 1.3 に示す。

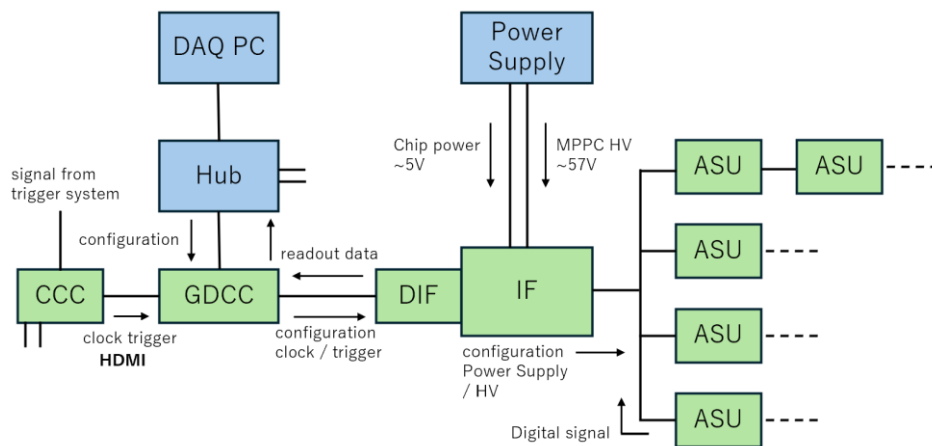


図 1.3 データ収集システムの概略図 [3]

各検出器では、GDCC1 枚に DIF、IF が 2 枚ずつ接続されているが、この DIF 間に時間情報のずれ、すなわちタイミングジッタが存在する。WAGASCI、Wall-MRD の両方にミューオンのヒットが記録された場合、各検出器でのヒット時間の差から荷電粒子の運動方向を特定する必要がある。よって、検出器にはこのヒットの順序が十分に特定できる時間分解能が要求される。

WAGASCI と Wall-MRD の最も近い距離は約 50cm であり、まず WAGASCI にヒットが記録された場合、ミューオンが光速で移動しているとするとき $\frac{0.5}{3.0 \times 10^8} = 1.67 \times 10^{-9} \text{s}$ つまり 1.67ns 後に Wall-MRD にヒットが記録される。一方で Wall-MRD のシンチレータとニュートリノの反応によって生成されたミューオンが WAGASCI にヒットし記録された場合、その記録の約 1.67ns 前に Wall-MRD にヒットが記録されている。

ヒット記録の時間差の分布を考えると、 $\pm 1.67\text{ns}$ 付近にピークが発生する。ここで、正規分布においてピークの標準偏差がともに 1.67ns 以下であれば、 1σ の範囲が各領域内になるため約 68% の精度でヒットの時間差を正しく判別できる。

WAGASCI と Wall-MRD は空間的な幅を持ち、検出器内でヒットする位置によってミュオンの飛程も異なるために一概にピーク幅を決めることはできないが、概算として約 1ns 程度の時間分解能が要求される。

1.2.3 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)は Si-PM(Silicon Photomultiplier)と呼ばれるデバイスの 1 種で、ガイガーモード APD をマルチピクセル化したタイプの光子計測デバイスである。浜松ホトニクス社が開発したものであり、WAGASCI においてシンチレータ光を観測するために使用されている。また、磁場の影響を受けない、衝撃に強いなどの特徴をもつ。APD、ガイガーモード、MPPC の構造について記す。

APD

APD(アバランシェフォトダイオード)は、逆電圧を印加することにより光電流が倍増される高速・高感度のフォトダイオードである。PIN フォトダイオードと比較して高い S/N が得られ、光波距離計やシンチレータを用いた微弱光検出など幅広い用途で利用されている。

動作原理は、入射光によって生成された電子・正孔対が強電界領域で加速され、結晶格子との衝突によって更にキャリアを増幅させる雪崩現象である。半導体内部に大きな逆バイアスを印加することで強電界を発生させ、衝突電離を引き起こす。生成されたキャリアは電界を受けて加速し、雪だるま式に増加する。よって、微弱光でも大きな電流となって取り出せるため、高感度での検出が可能になる。APD はある大きさ以上の逆電圧を印加すると光入射によって素子固有に飽和出力を発生させるが、この作動する電圧を降伏電圧と呼ぶ。

降伏電圧以上の電圧で APD を動作させる状態をガイガーモードと呼ぶ。1 フォトンの検出時においても放電現象により大きな出力が得られる特徴があり、ガイガー放電が始まると素子内部の電界が保たれる間は放電が継続する。

MPPC の構造

MPPC の構造を図 1.4 に示す。

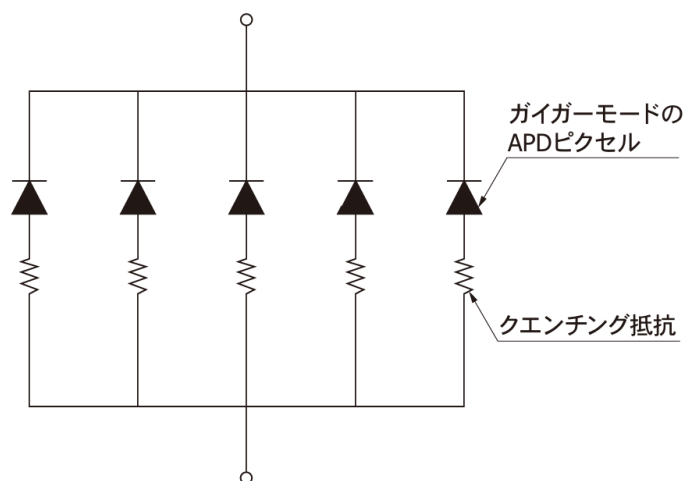


図 1.4 MPPC の構造図 [4]

MPPC はゲイガーモード APD とクエンチング抵抗を組み合わせたものを基本単位である 1 ピクセルとし、多数のピクセルを 2 次元に電気的接続した構造をもつ。クエンチング抵抗には、ゲイガー放電による出力電流がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を起こして APD のアバランシェ増幅を停止させる役割がある。

第2章

高速 LED ドライバ回路の製作

2.1 目的

WAGASCI 検出器における DIF 間のタイミングジッタを解消するためには、各 DIF に接続されている MPPC に対して、共通の光源からの光を同時に入射させ、イベント毎に DIF 間の時間補正を行う測定系を構築することが重要である。この時、光源自体の発光タイミングの揺らぎが大きい場合、検出器のエレクトロニクス由来の時間分解能を正確に評価することが困難となる。そのため、光源の発光速度が高速であり、再現性が高い光源を用いることで時間分解能の評価の精度向上が見込める。

本研究では、WAGASCI 検出器における DIF 間のタイミングジッタを約 1ns 程度に低減させるための基準光源として、青色 LED やトランジスタなど複数の素子を用いた高速 LED ドライバ回路の製作を行い、その有効性を検証することを目的とする。

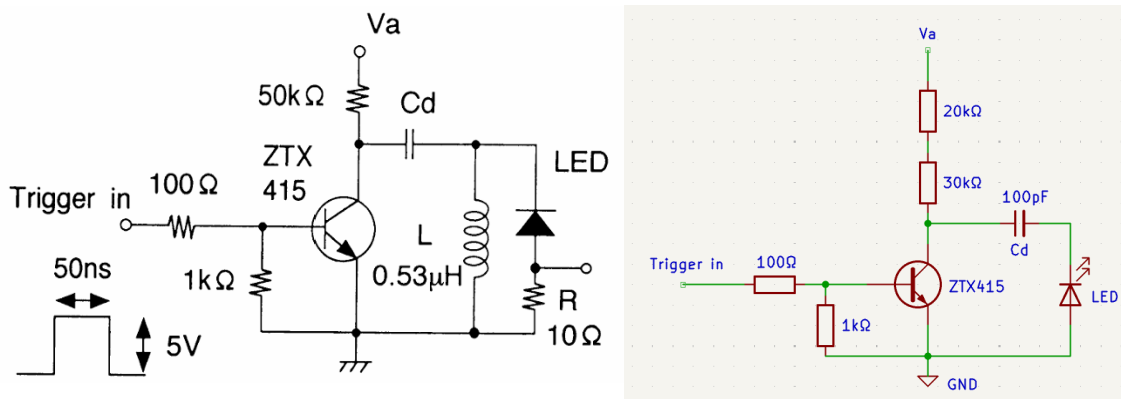
具体的には、製作したドライバ回路を光源として 2 つの MPPC による測定を行い、観測時刻の差 ΔT を算出することで、DIF 間のタイミングジッタを 1ns 程度のスケールで評価可能な測定系を構築できているかを検証する。

さらにドライバ回路内のコンデンサへの印加電圧 V_a の値を 75V~200V まで変化させた場合の ΔT 分布、信号の立ち上がり時間についての分布を作成し、評価する。

高速かつ再現性の高い光源としては、パルスレーザー光なども挙げられるが、これは高価である。一方、本研究で製作するドライバ回路は、安価に作成できるという利点が高い。

2.2 ドライバ回路

本研究において文献[5]より参考にした回路図と、実際に製作したドライバ回路の回路図を図 2.1 に示す。



(a) 文献[5]における参考回路図

(b) 製作したドライバ回路の回路図

図 2.1 回路図

ここで Trigger in は、外部から TTL パルスを入力する信号入力端子を表しており、パルスジェネレータより信号を入力する。TTL パルスとは、レベル 0~5V で表現された矩形波 (ON/OFF 信号) のことである。

図 a は文献[1]から引用した回路図であり、図 b は今回製作したドライバ回路の回路図である。コンデンサは定格電圧 500V の静電容量 100pF のものを使用した。

以下、ドライバ回路のコンデンサへの印加電圧を V_a 、コンデンサの静電容量を C_d と呼ぶ。

2.2.1 LED 発光の仕組み

図 a での回路における動作として、 V_a によって C_d に電荷が充電される。その後、Trigger in による入力信号が図真ん中に位置するトランジスタのベースに入力されると、トランジスタが ON 状態に入り、コレクタ-エミッタ間が導通する。その際に C_d に充電されていた電荷がトランジスタ内を通り LED の順方向に流れ、瞬間的に発光する。

本研究では、このようなコンデンサ放電を利用したドライバ回路を製作し、LED 発光の高速化および安定化を図った。

特徴的な素子やその役割などは次項に記す。

2.2.2 トランジスタ

トランジスタは電界効果トランジスタ (FET) とバイポーラトランジスタ (BJT) の 2 種類が存在する。FET は、ゲートにかかる電圧でドレイン-ソース間の電流を制御する素子で、BJT は、ベースに流れる電流でコレクタ-エミッタ間の電流を制御する素子である。

本研究では、BJT のアバランシェトランジスタ ZTX415 を使用した。コレクタ-ベース間

に高電圧を印加し、Trigger in の信号が入力されるとアバランシェ効果が起こり、トランジスタが高速で ON 状態となる。なお、このトランジスタのベース-エミッタ間は約 0.7V で ON 状態となり導通する。データシート [8] より、ベース-エミッタ間に 6V 以上、コレクタ-ベース間に 260V 以上の電圧が印加される場合は壊れる可能性があるので注意して扱った。トランジスタ ZTX415 は NPN 型のトランジスタである。構造を図 2.2 に示す。

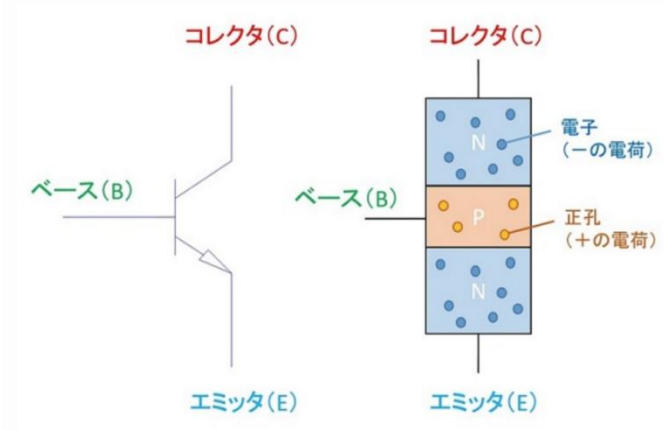


図 2.2 NPN 型トランジスタの構造 [6]

BJT はベースに小さなベース電流が流れると、その数十～数百倍のコレクタ電流が流れる特徴を持っている。また、ベース電流 I_b とコレクタ電流 I_c の比率のことを直流電流増幅率 h_{FE} と呼び、 $h_{FE} = \frac{I_b}{I_c}$ と表す。[7]

2.2.3 LED 素子

LED には、LED が発光するために最低限必要な電圧である順電圧が存在する。順電圧は LED の色によって異なり、赤色で 1.8V～2.2V、青色で 2.8V～3.3V 程度となっている。

LED の発光速度は内部のキャリアの再結合にかかる時間や材料のバンドギャップに依存することが知られている。一般に、短波長であるほどキャリアライフタイムが短く、より早い発光速度が得られる可能性が高いので、本研究では青色 LED(LK-3BL)を用いた。

2.2.4 その他素子の役割と特徴

図 a に使用されている素子の役割と特徴を記す。

・ 100Ω 抵抗

データシート [8] 上に明確な最大ベース電流値は記載されていないが、TTL パルスを直接ベースに入力することは避けた方が安全とされていた。よって、ベース電流を制限し、トランジスタを保護するためにこの 100Ω 抵抗を用いている。

- ・ 1kΩ抵抗

TTL パルスの入力が無い時にベースの電圧を確実に 0 として、トランジスタを OFF 状態にする役割がある。この抵抗をプルダウン抵抗と呼ぶ。

- ・ 10Ω抵抗

この抵抗にかかる電圧を測定することで LED 周辺の電圧や電流の情報が取得できる。しかしこの素子の有無は、本研究での測定に影響を与えないのでドライバ回路から外した。

- ・ インダクタ

インダクタには電流の変化を妨げる性質があり、トランジスタが OFF 状態になると電流が急減し、 $\frac{dI}{dt} < 0$ で逆電圧が生じる。その結果、LED のカソード側が一瞬+方向となり、逆電流が生じる。その逆電流が LED 内部のキャリアを掃き出すことで発光の停止を速める現象が起き、それを負のオーバーシュートと呼ぶ。今回製作したドライバ回路は信号の立ち上がり時間に着目しているためインダクタは取り付けなかった。

2.3 回路シミュレーション

実際にドライバ回路を製作する前に、LTspice を用いて回路シミュレーションを行った。目的として、LED にかかる電圧が順電圧を超えるために必要な V_a の値を見積もることや、 C_d や V_a の変化が信号の立ち上がり時間 $rise_time$ にどのような影響を与えるかを調べるがあった。

$C_d=100\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ の際のシミュレーション波形を図 2.3 に示す。

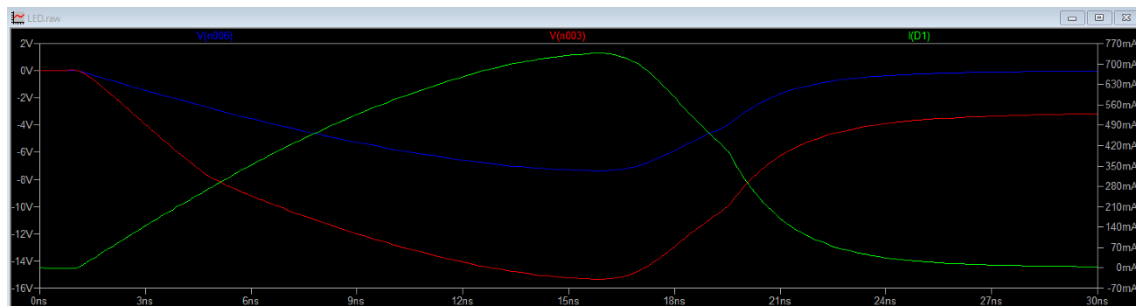


図 2.3 $C_d=100\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ のシミュレーション波形

緑が LED に流れる電流、赤と青の差が LED の両端にかかる電圧を示している。横軸は時間(ns)、縦軸は電圧(V)と電流(mA)である。この場合 LED の両端にかかる電位差を抜き出すと約 8V であり、LED 発光に必要な順電圧 3.3V を超えていることが確かめられた。

また C_d と V_a を変化させた場合の rise_time をシミュレーション上で数値として算出し、比較を行った。 rise_time は波形の最大値の 20%~90% に到達するまでにかかる時間とし、解析対象の波形は LED に流れる電流とした。 rise_time の定義は第 3 章 3.3 節で後述する。

$C_d=100\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ の場合と $C_d=10\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ の場合のシミュレーション波形の比較画像を図 2.4 および図 2.5 に示す。さらに C_d 、 V_a 、 rise_time の関係を表 2 にまとめる。

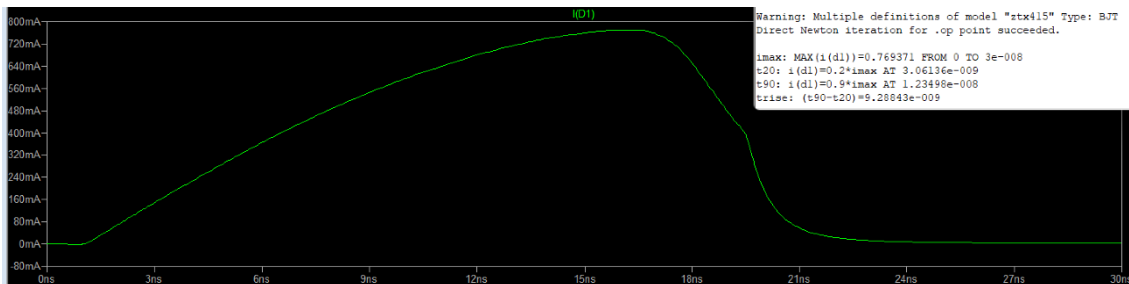


図 2.4 $C_d=100\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ のシミュレーション波形と rise_time の結果

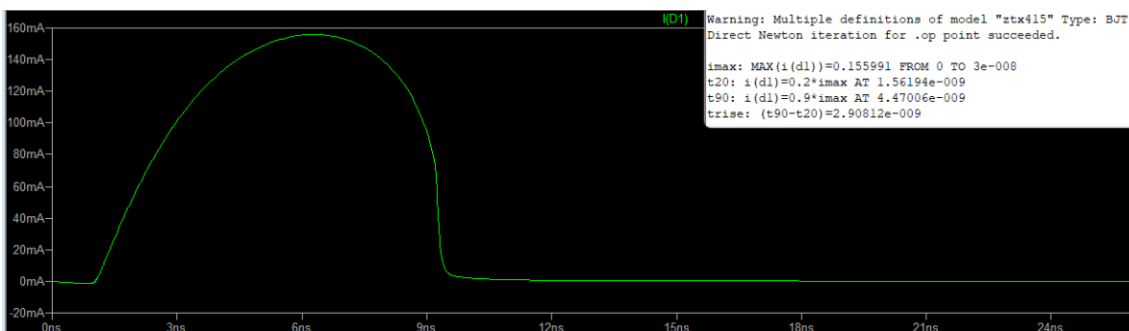


図 2.5 $C_d=10\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ のシミュレーション波形と rise_time の結果

図 2.4 および図 2.5 の右上部分に rise_time が秒単位で示されている。

表 2. C_d 、 V_a 、 rise_time の関係

$C_d[\text{pF}]$	$V_a[\text{V}]$	$\text{rise_time}[\text{ns}]$
100	75	8.06
100	100	9.29
100	125	10.35
10	75	2.51
10	100	2.91
10	125	3.23

表 2 より、 C_d が小さく、かつ V_a が低い条件において `rise_time` が短くなる傾向が示唆される。これらのシミュレーション結果が実際の実験結果と一致するかを検証する。

第3章

測定系

3.1 測定機器

本研究で使用した測定機器を図 3.1～図 3.7 に示す。具体的な接続方法や設定は次節で記述する。

・パルスジェネレータ

ドライバ回路内のトランジスタのベースに信号を入力するために、KEYSIGHT 社の 3390 50MHz ARBITRARY WAVEFORM GENERATOR を使用した。

出力端子が 2 つあり、Sync はトリガの信号波形を確認するためにオシロスコプの ch1 に接続した。Output はトランジスタのベースに信号を入力するためにドライバ回路の基盤上の LEMO 端子と接続した。



図 3.1 パルスジェネレータ

・ドライバ回路

製作したドライバ回路の実物を示す。このドライバ回路と暗箱内の LED 基板は LEMO 端子を介して接続されている。

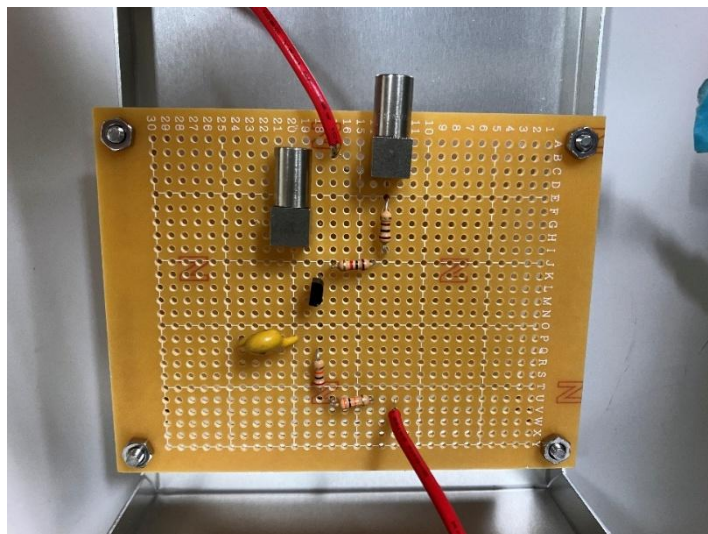


図 3.2 実物のドライバ回路

- ・コンデンサ充電用高電圧源

ドライバ回路内のコンデンサに電圧を加えるために KIKUSUI 社の REGULATED DC POWER SUPPLY PMX250-0.25A を使用した。本電圧源は 0V~250V の範囲で出力電圧を操作可能であり、本研究ではこの電圧を V_a と呼んでいる。



図 3.3 コンデンサ充電用高電圧源

・暗箱内セットアップ

暗箱内のLED から MPPC1 および MPPC2 までの距離は約 15cm である。

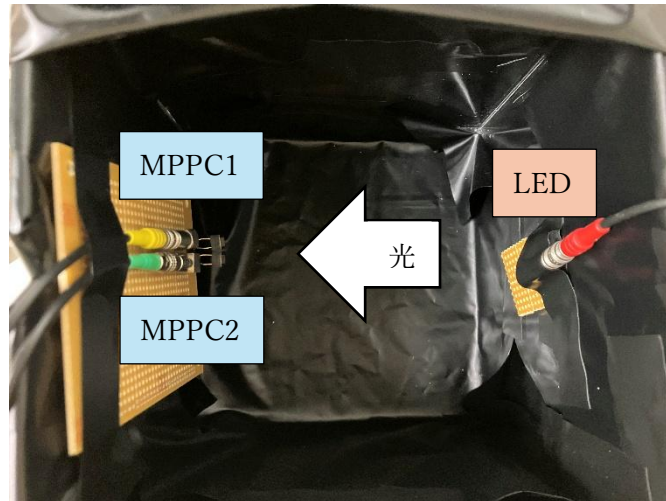


図 3.4 暗箱内セットアップ

・MPPC 読み出し基板

MPPC からの信号を読み出すために使用した MPPC 読み出し基板の外観を示す。基板は MPPC に印加する電圧の供給および、MPPC の出力信号の取得のために使用した。また、本研究では、同じ構成の MPPC 読み出し基板を 2 枚用いて、2 つの MPPC からの信号を測定した。

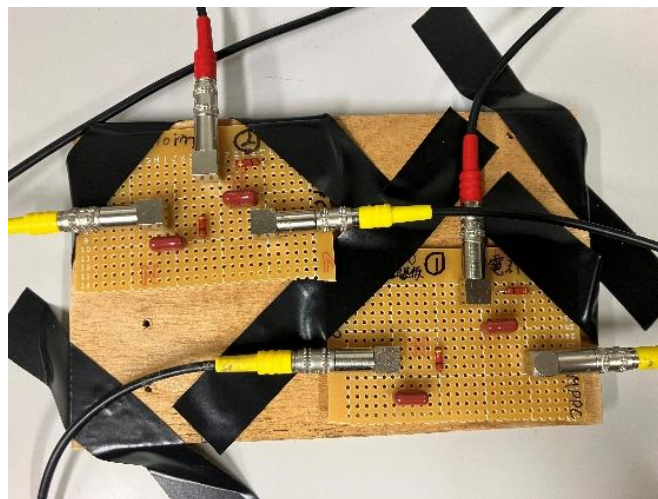


図 3.5 MPPC 読み出し基板

- ・ MPPC 読み出し基板用の高電圧源

MPPC を動作させるための電圧源として、Matsusada 社の P4L80-1 を使用した。



図 3.6 MPPC 読み出し基板用の高電圧源

- ・ オシロスコープ

トリガ信号および MPPC の出力波形を観測するために KEYSIGHT 社の DSOX3034T を使用した。本装置を用いて、各測定条件における信号波形の取得およびデータ保存を行った。取得した信号波形データは、DAQ PC に転送し、後述する解析に用いた。

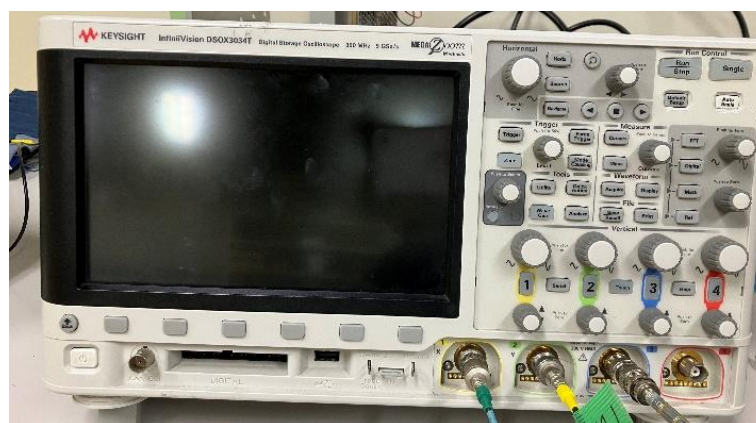


図 3.7 オシロスコープ

3.2 測定方法

実際に実験を行った際のセットアップの概略図を図 3.8 に示す。

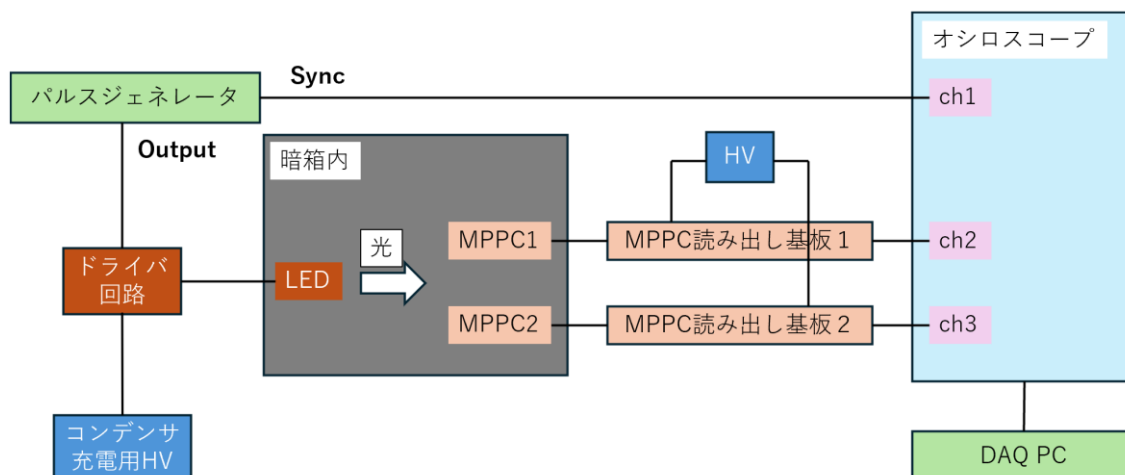


図 3.8 セットアップ概略図

パルスジェネレータからドライバ回路への入力信号は、パルス幅 50ns、振幅 5V、繰り返し周波数 1kHz の矩形波とし、ドライバ回路上の LEMO 端子に印加した。コンデンサ充電用の高電圧電源は最初 100V を印加して信号波形を確認し、その後 75V~200V まで変化させてデータを取得した。MPPC 読み出し基板用の高電圧電源は、MPPC のブレイクダウン電圧を考慮して 70V に設定した。この高電圧源は二股端子を用いて分岐させ、2 つの MPPC 読み出し基板に印加した。オシロスコープの ch1 には、パルスジェネレータの Sync 端子を接続し、トリガの信号波形確認用とした。ch2, ch3 には、それぞれ MPPC 読み出し基板 1, 2 の Out 端子を接続し、LED パルスに対する MPPC 出力波形を観測した。オシロスコープは DAQ 用 PC と接続し、Visual Studio Code 上で動作するプログラムを使用して、それぞれの測定条件において 10,000 イベントの信号波形データを取得した。

3.3 解析

実際にオシロスコープで観測した信号波形の一例を図に示す。

解析において、まず取得した信号波形の最大電圧を V_{\max} と定義した。次に、 V_{\max} の 20% に相当する電圧を V_{start} 、33%の電圧を V_{det} 、90%の電圧を V_{end} と定め、それぞれに対応する時刻を t_{start} 、 t_{det} 、 t_{end} と定めた。

さらに、2つの MPPC における t_{det} の時刻の差を ΔT 、 t_{start} から t_{end} までにかかる時間を rise_time つまり信号の立ち上がり時間と定めた。この定義の下で、 ΔT と rise_time のヒストグラムを作成した。

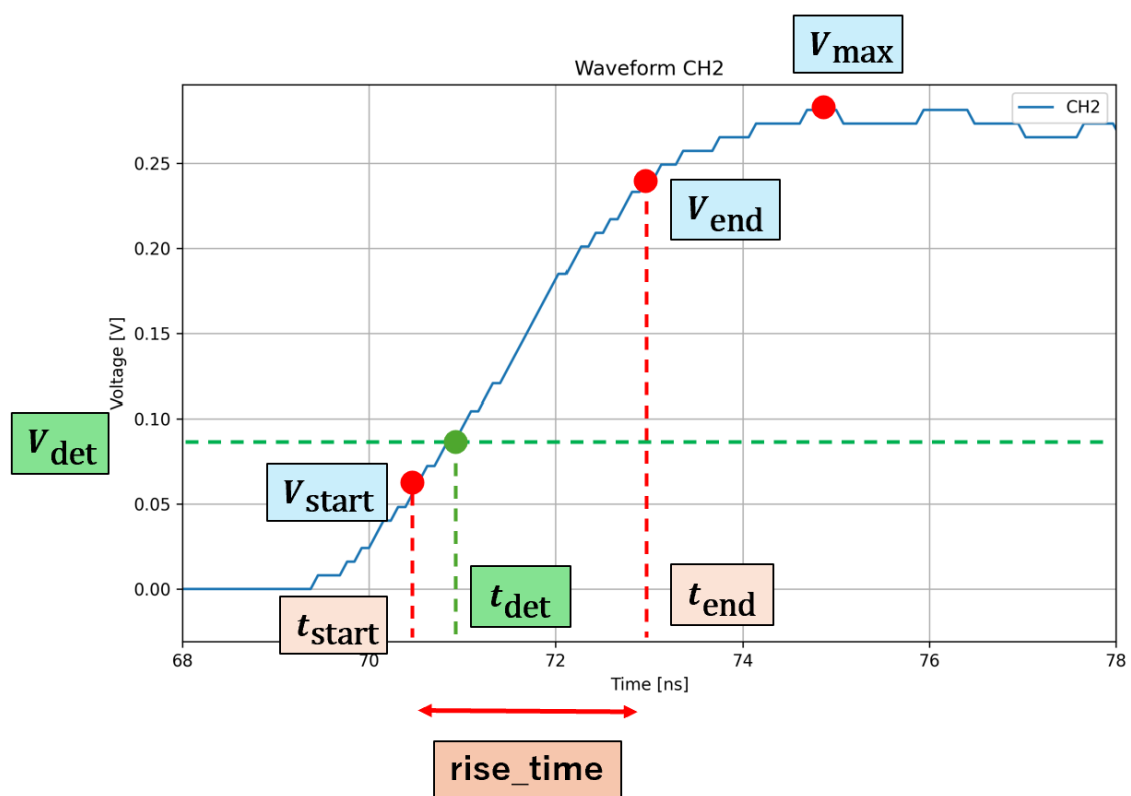


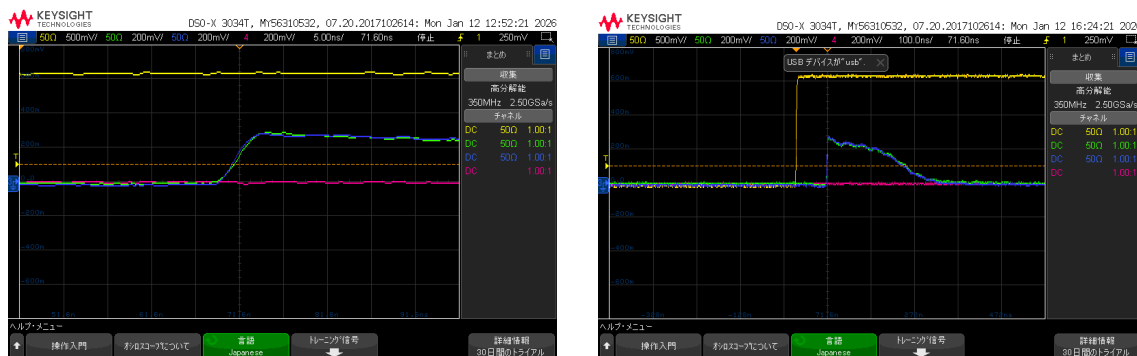
図 3.9 観測した信号波形の一例と各測定値の定義

第4章

結果と考察

4.1 LEDパルスの信号波形

$C_d=100\text{pF}$ 、 $V_a=100\text{V}$ の条件において、LEDパルスをオシロスコープ上で観測した信号波形を図4.1に示す。



(a) 信号の立ち上がりの信号波形

(b) 全体の信号波形

図4.1 オシロスコープ上での信号波形

図aは信号の立ち上がり時間に着目した信号波形であり、横軸は1メモリ5.00nsで表示している。図bは信号波形全体を表示しており、横軸1メモリ100nsである。

黄色で示したch1はパルスジェネレータのSync信号、緑および青で示したch2、ch3はそれぞれMPPC1とMPPC2の出力信号であり、ピンクで示したch4は未接続である。観測された信号波形から、信号の立ち上がりが急峻であり、MPPC1,2が安定して光を観測していることが読み取れる。

次節ではこの信号波形のデータを用いて時間分解能および立ち上がり時間の評価を行う。

4.2 時間分解能の評価

$V_a=125V$ における ΔT の分布を図 4.2 に示す。

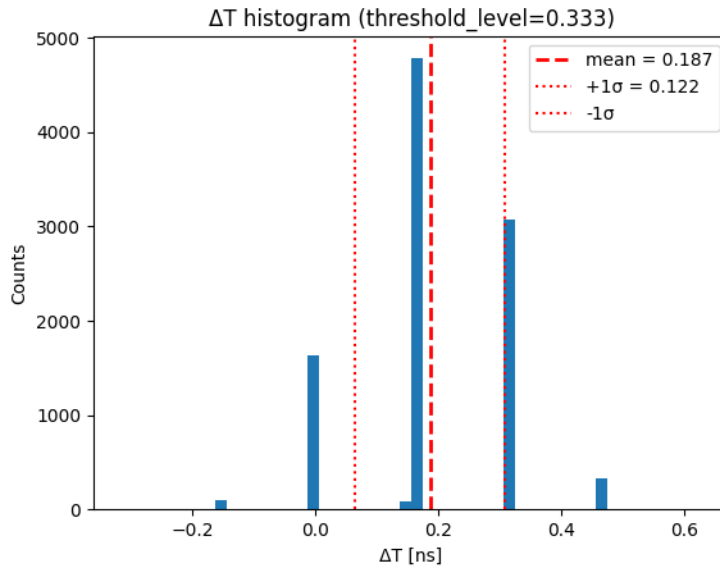


図 4.2 ΔT 分布 ($V_a=125V$)

図 4.2 は MPPC1 および MPPC2 の出力信号より、第 3 章 3.3 節で定義した方法に基づいて算出した ΔT のヒストグラムである。この分布の標準偏差 (1σ) は、 $V_a=125V$ において $0.122ns$ であった。

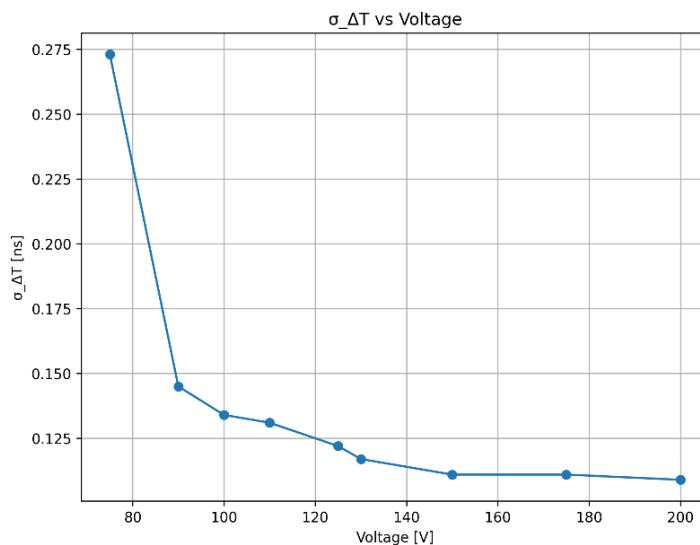
ΔT 分布の標準偏差 $\sigma_{\Delta T}$ は、各イベントの ΔT_i と平均値 $\overline{\Delta T}$ を用いて、

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}$$

である。

図 4.2 に示す ΔT 分布には、値の存在しない領域の隙間が見られる。これは、オシロスコープのサンプリングレートに依存する有限な時間分解能の影響によるものと考えられる。電圧は連続であるが、時間軸はサンプリング点により離散化されるため、得られる t_{det} は離散的な値を取り、結果として ΔT も離散的になると考えられる。

次に、 V_a を変化させた場合における ΔT の標準偏差 $\sigma_{\Delta T}$ の依存性を評価した結果を図 4.3 に示す。

図 4.3 V_a と $\sigma_{\Delta T}$ の関係

$V_a=140V$ 付近以降はほぼ横ばいであるが、 V_a を上げればそれに伴い $\sigma_{\Delta T}$ も小さくなる結果が得られた。今回は $V_a=200V$ で $\sigma_{\Delta T}$ の最良値 $0.109ns$ を得た。高電圧では、振幅が大きく、この信号の大きさに対してノイズや揺らぎの影響が相対的に小さくなり、しきい値付近の時間の揺らぎが減少したと考える。

なお、後述する `rise_time` の評価結果では、最速値の `rise_time` を与える条件と、最良の時間分解能を与える条件は一致しなかった。

4.3 立ち上がり時間の評価

$V_a=125V$ における `rise_time` の分布を図 4.4 に示す。

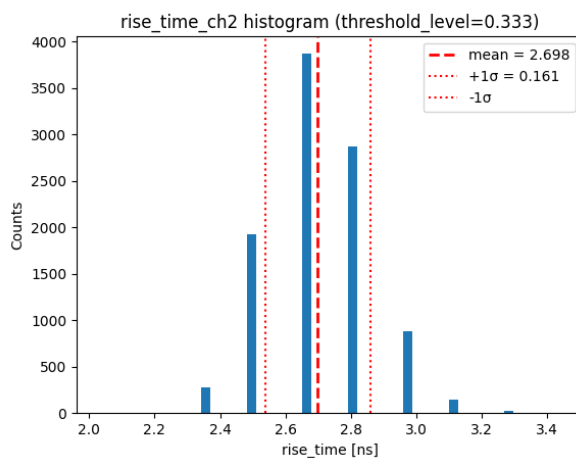
図 4.4 `rise_time` 分布 ($V_a=125V$)

図 4.4 は MPPC1 の出力信号より、第 3 章 3.3 節で定義した方法に基づいて算出した `rise_time` のヒストグラムである。この分布の平均値は $V_a=125\text{V}$ において 2.698ns であった。

また、 V_a を変化させた場合における `rise_time` の依存性を評価した結果を図 4.5 に示す。

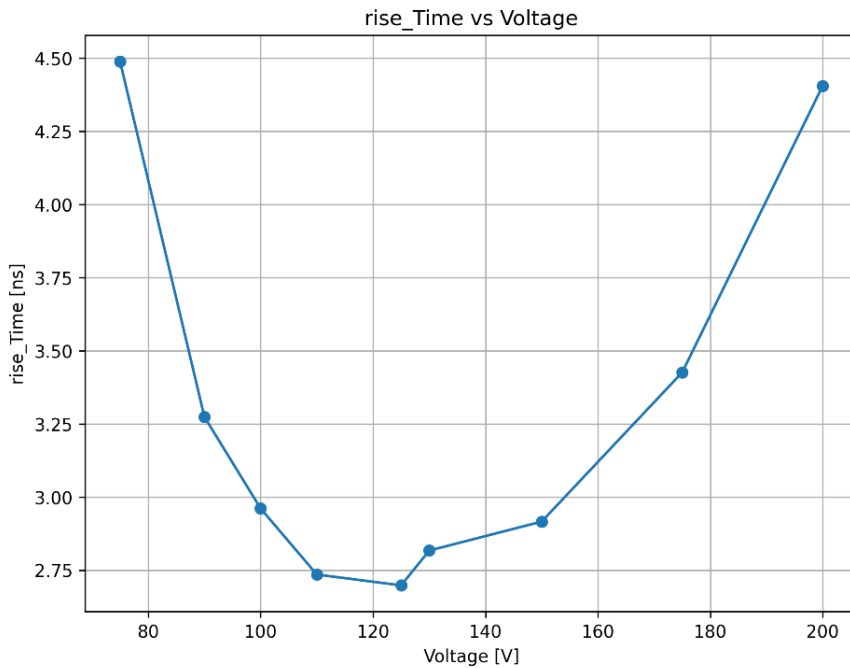


図 4.5 V_a と `rise_time` の関係

図 4.5 より `rise_time` は $V_a=125\text{V}$ で最速値を示し、それより低電圧および高電圧では `rise_time` が増加する結果となった。この結果は V_a を低下させるほど `rise_time` が短くなるという LTspice による回路動作シミュレーションの結果と一致しなかった。この原因の一つとして、LTspice では LED に流れる電流波形を解析の対象として `rise_time` を算出しているのに対して、本実験では MPPC により受光された信号波形を対象に解析を行っている点が挙げられる。また、シミュレーション上の回路モデルの LED と実際に使用した LED の型番の違いや、非理想性なども影響していると考えられる。

また、最速値の `rise_time` を与える条件と、最良の時間分解能を与える条件が一致しなかった原因としては、時間分解能が `rise_time` のみによって決定される量ではないことが考えられる。`rise_time` は主にドライバ回路や MPPC 出力回路の応答速度に依存する一方で、時間分解能は信号の振幅やしきい値の設定などの影響を強く受けるためにこの差異が生まれたと考える。

第5章

結論

本研究では、高速 LED ドライバ回路を製作し、2つの MPPC を用いて光の検出時間差の測定および評価を行った。その結果、製作したドライバ回路の下では $V_a=200V$ の条件で最良の時間分解能として $\sigma_{\Delta T}=0.109ns$ を得た。また、 $rise_time$ は $V_a=125V$ で最速値 $2.698ns$ を得た。測定した全ての条件において $rise_time$ は ns オーダーを達成しており、同じ条件で複数回の測定を行った結果、同様の結果を得たことから再現性も確認された。

以上より、WAGASCI 検出器の時間分解能評価に用いる光源として、製作したドライバ回路は、本研究の測定条件下において目的を満たしていると言える。

謝辞

本論文を作成するに当たり、ご指導・ご協力いただいた全ての方々に感謝申し上げます。

南野教授には、テーマの決定から実験器具や部品の手配、本論文の添削に至るまで終始丁寧にご指導いただきました。また、多くの研究相談の機会を設けてくださり心より感謝申し上げます。常に的確なアドバイスと方向性のヒントを示していただいたことで、私なりに考える力を身につけることができたと感じております。

また、研究室のメンバーにも恵まれ、研究活動以外でも体育館でのスポーツや夜ご飯、日常の雑談を通して充実した1年間を過ごすことができました。先輩方と話すたびに偉大さを痛感し、同期の仲間が努力している姿を見て、私も頑張らなくてはという気持ちになりました。

特に、共同で研究を進めていた城下君には感謝してもしきれません。常に主体的に次の研究の方針を考え、細部まで理解を進めようと努力する姿勢や高い行動力など本当に尊敬しています。大学院やこの先での活躍を私は確信しています。心から応援しています。

改めまして、本研究に関わってくださった全ての方々に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 安留健二, “WAGASCI-BabyMIND 検出器の初の物理シミュレーション(フルセットアップ)”, NuFact2019, August26-August31, (2019)
- [2] 平田大悟, “T2K 実験 WAGASCI 検出器の時間分解能評価に向けた試験環境の構築および評価”, 卒業論文, 横浜国立大学, (2024)
- [3] 山本健裕, “T2K 実験前置検出器 WAGASCI-BabyMIND によるニュートリノ原子核反応精密測定のためのニュートリノビームデータの取得と補正”, 修士論文, 大阪公立大学, (2024)
- [4] MPPC, “技術資料 / MPPC – Hamamatsu”, 浜松ホトニクス, (2024)
- [5] 荒木勉, “発光ダイオードを用いた超高速紫外線パルス光源の開発と応用”, J. Illum. Engng. Inst. Jpn, Vol.81 No.5 459, (1997)
- [6] “バイポーラトランジスタの構造と動作原理”, <https://electronic-circuit.com/transistor-construction-principle/>
- [7] 鈴木雅臣, “トランジスタ回路の設計”, CQ 出版社, (1991)
- [8] トランジスタ, “Diodes Inc. ZTX415”, データシート”, <https://octopart.com/ja/datasheet/diodes-inc/ZTX415>