

筑波大学 理工学群 物理学類
卒業論文

高い時間分解能を持つ AC-LGAD 検出器の
增幅率および時間分解能の研究

令和 6 年 1 月

学籍番号 202012130

著者氏名 堀越一生

指導教員 廣瀬茂輝

卒業論文 2023 年度（令和 5 年度）

高い時間分解能を持つ AC-LGAD 検出器の 増幅率および時間分解能の研究

202012130 堀越 一生
指導教員 廣瀬 茂輝

論文要旨

標準理論を超える物理現象や新粒子を発見するために、加速器実験は高輝度化と高エネルギー化を繰り返しながら発展してきた。高輝度化によって 1 バンチあたりの衝突数が増加すると、衝突で生成される粒子数が増える。生成された荷電粒子の飛跡を測定するために使われるシリコン製の荷電飛跡検出器は、電極サイズを小さくすることで高い位置分解能を実現する。それに加えて、検出器に高い時間分解能を持つことで粒子の飛跡に時間情報を追加することができる。それによって、高輝度化に伴うパイルアップによって困難とされる、衝突点と飛跡の結びつけが可能になる。

Low-Gain-Avalanche-Diode(LGAD) 検出器は、p 型シリコン半導体をベースにしたシリコン半導体検出器で、pn 接合を作るために形成された表面の n⁺ 層の直下に、増幅層としてアクセプター濃度が高い p⁺ 層をドープした構造になっている。検出器に逆電圧をかけると、高濃度の p⁺ 層によって、局所的に高電場領域を作り出すことができる。検出器内で生成された電子正孔対が、高電場による電子雪崩によって増幅されることで、立ち上がりが速くタイミングが揃った信号を出力することができ、そのため良い時間分解能で荷電粒子を検出できる。中でも AC-LGAD 検出器は、増幅層を読み出し電極ごとに分割しないで一様に形成し、酸化膜を介して電極に誘起された信号を検出する。このような構造から、隣接チャンネルへの信号のクロストークが問題であったが、不純物濃度と酸化膜の厚さを最適化することで抑制した AC-LGAD 検出器では、30 ps の時間分解能が確認されている。

LGAD 検出器は増幅した信号を出力できるため、Application-Specific-Integrated-Circuit(ASIC) 内のアンプの増幅率を小さく設定することができ、ASIC の消費電力の削減や発熱を抑えることが可能になる。そのため、LGAD 検出器の増幅率を求ることで、ASIC 内のアンプの開発に貢献することができる。

AC-LGAD 検出器の時間分解能は、信号の大きさの違いによるタイムウォーク σ_{tw} の影響、回路にのるノイズによる影響（ジッター σ_j ）、荷電粒子がセンサー内に落とすエネルギーの非一様性の影響（ランダウノイズ σ_L ）の 3 つが大きく寄与する。タイムウォークは信号波高に対して 50 % の位置にで閾値を設定する（constant fraction 方式）を使用することで、その影響を抑制できる。

本研究では、AC-LGAD 検出器の ASIC の開発に向けた基礎特性の理解として、最も良い時間分解能を実現する増幅率を決定することと、今後の AC-LGAD 検出器の時間分解能の向上をはかるために、特に増幅率が高い場合に時間分解能が悪化する原因について理解することを目的とする。

まず最初に、増幅層がなく増幅機構を持たない P-Intrinsic-N (PIN) ダイオードと、増幅層がある Avalanche-Photo-Diode (APD) を作成した。これらのサンプルに対し、同じ強度の赤外線パルスレーザーを入射して、信号の大きさと時間分解能を測定する。AC-LGAD 検出器と同じ構造を持つ APD と PIN の信号の大きさの比を取ることで、LGAD 検出器の増幅率が求められる。このような測定から増幅率がおよそ 20~35 倍のときに、最も良い時間分解能およそ 10 ps を得られることがわかった。

赤外線パルスレーザーの場合は、センサー内で一様に電子正孔対を生成するため、タイムウォークおよびランダウノイズの影響が少ない状況で時間分解能を測定できる。また、ノイズを微小時間あたりの波高の変化量で割ることによって、ジッターを求めることができる。そのため、ノイズに加えて、微小時間あたりの波高の変化量を求めるために、信号の立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S の測定をしてジッターを求めた。レーザー測定から求めた時間分解能と、計算から求めたジッターとの比較から、ジッターのみでは説明できない時間分解能の悪化が見られることがわかった。

以上の結果から、AC-LGAD 検出器の時間分解能は、タイムウォーク σ_{tw} 、ジッター σ_j 、ランダウノイズ σL に加わる要因があり、特に増幅率が大きい時にその効果が顕著であることを明らかにした。その要因について理解を深めることが、今後の AC-LGAD 検出器のさらなる時間分解能向上の鍵となる。

目次

第 1 章	背景	1
1.1	新粒子の探索	1
1.2	大型加速器実験	1
1.3	内部飛跡検出器	2
1.4	LGAD 検出器	4
第 2 章	LGAD 検出器の原理	7
2.1	LGAD 検出器の構造	7
2.2	雪崩増幅	8
2.3	飽和ドリフト速度	8
2.4	時間分解能	8
2.4.1	タイムウォーク	9
2.4.2	ジッター	9
2.4.3	ランダウノイズ	10
2.4.4	過剰ノイズ	10
2.5	電流電圧特性	11
第 3 章	LGAD 検出器の増幅率	13
3.1	使用サンプル	13
3.1.1	APD と PIN	13
3.1.2	酸化膜とアルミニウムの除去	13
3.2	測定方法と使用装置	14
3.2.1	レーザーの性能	14
3.2.2	センサーとアンプボード	15
3.2.3	レーザー測定のセットアップ	15
3.2.4	サンプルの電流電圧特性	16
3.3	解析方法	17
3.3.1	波形の解析	17
3.3.2	信号の大きさと時間分解能	18
3.3.3	増幅率	19
3.4	測定結果	19
3.4.1	信号の大きさ	19
3.4.2	時間分解能	19
3.4.3	増幅率	21
第 4 章	時間分解能の評価	23
4.1	立ち上がり時間	23
4.1.1	解析方法	23

4.1.2	立ち上がり時間の測定結果	23
4.1.3	波高差の測定結果	24
4.2	ノイズ	25
4.2.1	解析方法	25
4.2.2	ノイズの測定結果	26
4.3	ジッター	26
4.4	時間分解能を悪化させる要素の考察	28
4.4.1	波形と解析方法	28
4.4.2	結果	29
第 5 章	結論	31
第 6 章	謝辞	33
参考文献		35

図目次

1.1	Large Hadron Colider (LHC) の鳥瞰図 [1]	2
1.2	HL-LHC の衝突点の様子 [2]	2
1.3	位置情報と時間情報による飛跡の再構成の様子	3
1.4	飛跡の再構成のシミュレーション [3]	3
1.5	LGAD 検出器の構造	4
1.6	レーザーで測定した時間分解能（ジッター） [5]	5
2.1	DC-LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器の構造	7
2.2	電子雪崩におけるエネルギー-band 図 [7]	8
2.3	Si 中のドリフト速度の電界依存性 [7]	9
2.4	タイムウォークの影響	9
2.5	ジッターの影響	10
2.6	ランダウノイズの影響	10
2.7	過剰ノイズ係数の増幅率依存性 [8]	11
2.8	Pad 型の AC-LGAD 検出器の電流電圧特性	12
3.1	LGAD 検出器の表面図	13
3.2	APD の LGAD 検出器 増幅層有り	13
3.3	PIN の LGAD 検出器 増幅層無し	13
3.4	PIN の表面の剥離後の様子	14
3.5	APD の表面の剥離後の様子	14
3.6	赤外線パルスレーザー本体	14
3.7	KEK16 チャンネルアンプボード	15
3.8	アンプボードにセンサーを設置した様子	15
3.9	センサーに高電圧を印加させる様子	15
3.10	レーザー測定のセットアップ	16
3.11	レーザーの入射位置と焦点の調節	16
3.12	レーザーの焦点の様子	16
3.13	AC-LGAD 検出器の電流電圧特性	17
3.14	オシロスコープの出力とデータの取得方法	18
3.15	波高と到達時間の 2 次元ヒストグラム	18
3.16	図 3.15 から各軸を射影したヒストグラム	19
3.17	AC-LGAD 検出器の信号の大きさの電圧依存性	20
3.18	AC-LGAD 検出器の時間分解能 σ_t の電圧依存性	20
3.19	AC-LGAD 検出器の増幅率と時間分解能の電圧依存性	21
4.1	立ち上がり時間の解析方法	24
4.2	AC-LGAD 検出器の立ち上がり時間の電圧依存性	24

4.3	AC-LGAD 検出器の波高の 60 %から 40 %の差の電圧依存性	25
4.4	ノイズの解析方法	25
4.5	AC-LGAD 検出器のノイズの電圧依存性	26
4.6	AC-LGAD 検出器のジッターの電圧依存性	27
4.7	AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターの増幅率依存性	27
4.8	AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターとその差の増幅率依存性	28
4.9	オシロスコープの出力の比較	28
4.10	190V と 198V の時の到達時間と波高の 2 次元ヒストグラム	29
4.11	AC-LGAD 検出器の過剰ノイズの電圧依存性	30
4.12	AC-LGAD 検出器の時間分解能、ジッター、波高の揺らぎによる効果の増幅率依存性	30

表目次

3.1	赤外線パルスレーザーの性能表	14
-----	----------------	----

第1章

背景

1.1 新粒子の探索

2012年 CERN でのヒッグス粒子の発見により、素粒子標準理論で予想される全ての素粒子が見つかった。しかし、初期宇宙では物質と同じ数の反物質が存在していたが、今の宇宙では物質優勢で反物質がほとんど存在しないことや、宇宙の構成要素の約 95 % を占める、電磁波と相互作用しないため観測することが難しいダークマターとダークエネルギーの正体についてや、重力を媒介する素粒子についてなど、標準理論では説明できない事象はさまざま存在する。そのため、素粒子物理学では、標準理論を超える新しい物理の発見・解明のための研究が進められており、このような事象を解明することが研究目標の一つである。

銀河の回転速度が中心からの距離によらずに一定であることや、重力レンズ効果からダークマターの質量も測定されているため、ダークマターやダークエネルギーの存在は確実視されているが、その正体について発見や解明はされていない。

このような標準理論を超える未知の粒子の存在を示唆する理論の 1 つとして、超対称性理論がある。この理論によると、既知の素粒子それぞれに、ボーズ粒子とフェルミ粒子の特徴（スピンの大きさ）を入れ替えた超対称性粒子が存在するとされており、この中にダークマターに該当する粒子があるのではないかと考えられている。これらの粒子は質量が大きいとされており、さまざまな高エネルギーの加速器実験で探索されている。

1.2 大型加速器実験

加速器実験では、加速させた高エネルギーの粒子同士を衝突させることで、新たな粒子を作り出すことや、粒子同士の相互作用を観測することができる。また、宇宙初期の状態を模倣することもできる。粒子の衝突点付近に検出器を設置することで、加速器によって生じたさまざまな粒子を観測することができる。検出器によって、粒子の飛跡や運動量、エネルギーを測定することができるため、測定結果から、生み出された粒子の性質やその粒子と他の物質との相互作用などを調べることができる。そのような測定を通して、大型加速器実験では新粒子や新物理の探索を行っている。

現在行われている世界最大の加速器実験が、大型ハドロン衝突型加速器（LHC）実験である。LHC は、図 1.1 にあるように 1 周約 27 km の加速器で、真空の管の中で光速近くまで加速させた陽子同士を衝突させることで、新粒子の探索を行っている。LHC 実験は、13.6 TeV という世界最大のエネルギーの陽子・陽子衝突を起こすことができるため、質量が重い粒子や高エネルギー領域での新たな物理法則の発見が期待されている。

加速器実験は、反応確率が小さい事象や質量が大きい粒子を発見するために、高輝度化と高エネルギー化を繰り返しながら発展してきた。LHC はエネルギーが 14 TeV で衝突頻度が LHC の約 10 倍の高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）にアップグレードすることが決まっている。また、重心系エネルギーが約 27 TeV の High Energy LHC (HE-LHC) や重心系エネルギーが 100TeV の Future Circular Colider (FCC) の加速器実験の計画も考えられており、さらなる高輝度化と高エネルギー化に伴って、増加する衝突点と粒子の飛跡を検出することができる、内部飛跡検出器の改良が求められている。

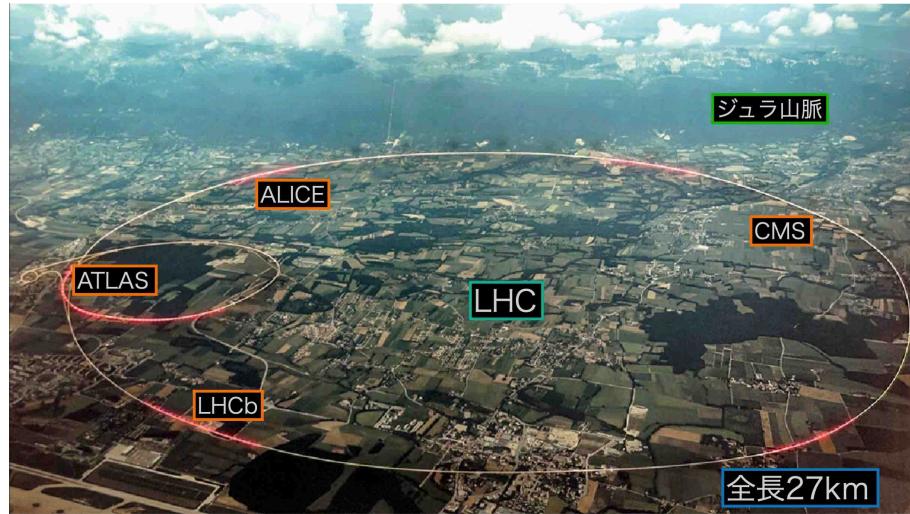


図 1.1: Large Hadron Colider (LHC) の鳥瞰図 [1]

1.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、加速器実験の衝突点を複数層に囲むようにして設置される粒子検出器の中で、最内層に設置される検出器である。内部飛跡検出器は、検出器内に荷電粒子が通過すると、その通過した情報を電気信号として出力することができる。そのため、検出器に粒子が通過した情報を元に、粒子の飛跡を再構成することで、粒子の飛跡からビームの衝突点、磁場による飛跡の曲率から粒子の運動量を測定することができる。測定から得られた情報から、衝突によって生成された粒子の性質や相互作用について調べることができる。

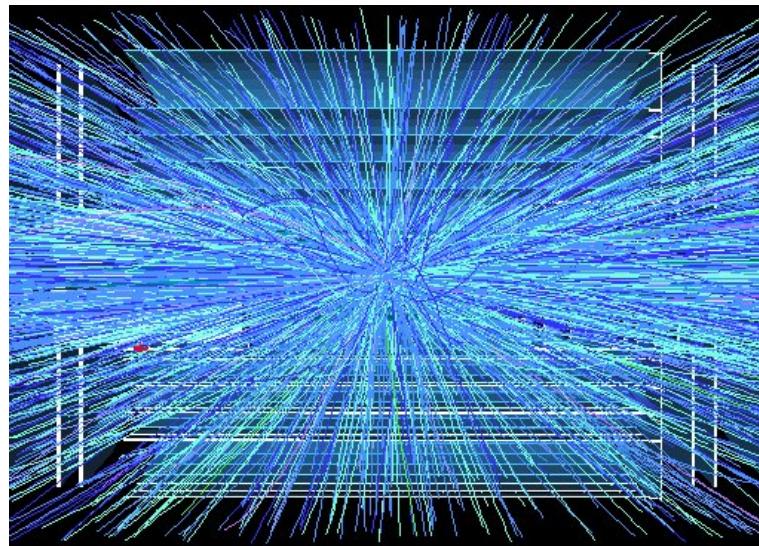


図 1.2: HL-LHC の衝突点の様子 [2]

将来の加速器実験では、生成確率が低い粒子や質量が大きい粒子を発見するために、重心系エネルギーとデータ量を増やす計画がされている。加速器によって加速される粒子は、バンチと呼ばれる粒子の塊となっており、加速器実験ではその塊を衝突させている。データ量の増加には、1バンチに含まれる粒子数を増やすことで衝突点の数を多くすることや、バンチとバンチの間隔を縮めて、衝突の頻度を大きくすることが有効である。図 1.2 は、HL-LHC における衝突点のシミュレーション [2] を行ったもので、1 バンチで 200 回の陽子-陽子衝突が生じるとシミュレーションされている。現在の LHC では 1 バンチでおよそ 25 回の衝突が起るので、HL-LHC では LHC の約 16 倍の衝突が生じる。HL-LHC に限った話ではなく、将来の加速器実験を見据えた際には、さらなる衝突回数の増加があると考え

られる。また、主衝突に関与しない粒子の衝突もあり、そのような背景事象から、調べたい衝突を測定しなければならない。そのため、内部飛跡検出器には大量の粒子の通過が起こるため、その情報から粒子1つ1つの飛跡を再構成できるような性能が求められる。加速器の高輝度化に対応できる内部飛跡検出器の開発が必要不可欠である。

HL-LHC 実験では、電極サイズが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のピクセル検出器を使用する。検出器の電極サイズを細かくすることで、位置分解能を向上することができ、多数の衝突から生成される粒子の飛跡より細かく測定できる。高い位置分解能に加えて、検出器に高い時間分解能を持つことで粒子の飛跡に時間情報を追加することができる。図 1.3 に位置情報と時間情報を用いて飛跡を再構成した様子を示す。星印が衝突点で、三角が粒子のヒット情報である。検出

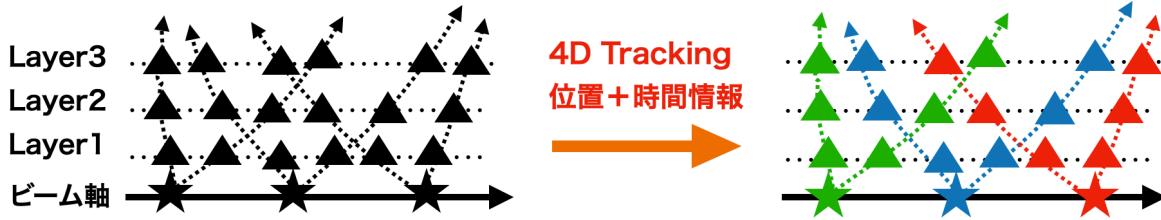


図 1.3: 位置情報と時間情報による飛跡の再構成の様子。

星印が粒子のヒット情報で点線が再構成した飛跡である。

器が3層に設置されており、ビーム軸上で起きた衝突から3つの検出器がヒット情報を得ることで、飛跡を再構成した様子点線が再構成した飛跡である。左の図が時間情報のない場合で、右の図が時間情報がある場合の様子である。この図のように時間情報があると、飛跡の再構成することに加えて、衝突と飛跡がどのタイミングで起こったのかを知ることが可能になる。

図??には、HL-LHC の ATLAS 実験による衝突点のシミュレーション結果を示す [3]。左の図が位置分解能による飛跡の再構成で、右の図が位置分解能と時間分解能による飛跡の再構成を示している。時間分解能が加わることによって、衝突点と飛跡の時間情報の取得により、粒子密度が高い状況でも高輝度化に伴うパイルアップによって困難とされる、飛跡の再構成が可能となる。30ps の時間分解能を満たすと、光速の粒子の飛跡を 1 cm 単位で区別することが可能となる。加速器の高輝度化に対して、高い時間分解能と位置分解能を併せ持つ内部飛跡検出器が非常に有効であり、新粒子や新物理の発見に大きく貢献することができる。

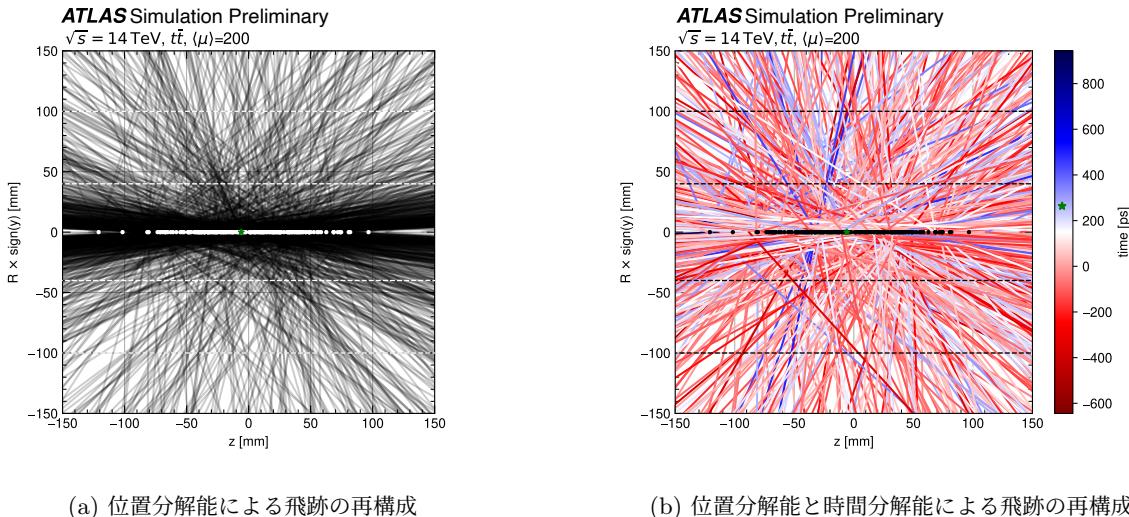


図 1.4: 飛跡の再構成のシミュレーション [3]

時間分解能があることで、衝突点と飛跡がどのタイミングで起こったのかがわかる。粒子密度が高くなても衝突点と飛跡の紐付けが可能。

1.4 LGAD 検出器

Low-Gain-Avalanche-Diode(LGAD) 検出器は、高い時間分解能が実現できる半導体検出器として期待されている。LGAD 検出器を 図 1.5 に示す。詳しい構造については、第 2 章で解説を行う。LGAD 検出器は増幅層によって意図的に高電場を作り出すことで、電子正孔対が増幅され、立ち上がりが速く、増幅された信号を出すことができる。電圧を上げることで、増幅層内で生じる電子雪崩による増幅率を大きくすることができる。そのため、高い時間分解能を実現することができる。実際に、MIP 粒子の測定において、30 ps の時間分解能 [4] を実現している半導体検出器である。

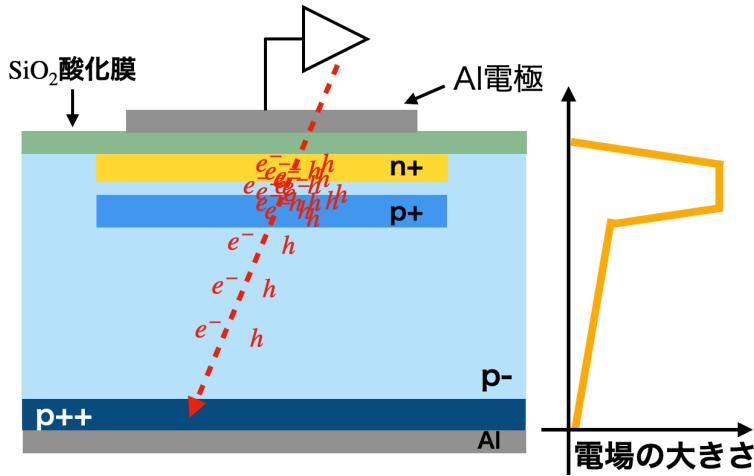


図 1.5: LGAD 検出器の構造

増幅層によって意図的に高電場を作り出し、電子雪崩によって電子正孔対が増幅される。立ち上がりの速い増幅された信号が出せるため、高い時間分解能が実現できる。

LGAD 検出器は増幅層により信号を増幅することができるため、通常の半導体検出器と比較して、Application-Specific-Integrated-Circuit(ASIC) 内のアンプの増幅率を小さく設定することができる。そのため、アンプの増幅率の減少による消費電力の削減、そして、ASIC の発熱を抑えるための冷却システムの軽減ができると考えられている。

LGAD 検出器の時間分解能は以下の式 4.0.1 で表すことができるとされている。時間分解能を構成するそれぞれの要素は、タイムウォーク σ_{tw} 、ジッター σ_j 、ランダウノイズ σ_L と呼ばれており、詳しい解説は第 2 章の第 4 節で行う。

$$\sigma_t^2 = \sigma_{tw}^2 + \sigma_j^2 + \sigma_L^2 \quad (1.4.1)$$

先行研究 [5] から、タイムウォーク σ_{tw} 、ランダウノイズ σ_L の影響が少ない赤外線パルスレーザーを使った測定では、時間分解能が以下の図 1.6 のようになる。横軸が印加電圧で縦軸が時間分解能である。赤点が 50μm 厚の Strip 型、緑点が 20μm 厚の Strip 型、青点が 50μm 厚の Pad 型、橙色の点が 20μm 厚の Pad 型センサーである。50μm 厚の Pad 型センサーは、電圧が 180 V 付近で時間分解能が最も良く、その前後の電圧で 10 V 程度の時間分解能の変化がほとんどない領域が存在する。さらに電圧を印加すると、時間分解能が悪くなることがこの研究からわかっている。

そのため、本研究では AC-LGAD 検出器の ASIC の開発に向けた基礎特性の理解として、最も良い時間分解能を実現する増幅率を決定することと、今後の AC-LGAD 検出器の時間分解能の向上をはかるために、特に増幅率が高い場合に時間分解能が悪化する原因について理解することを目的とする。

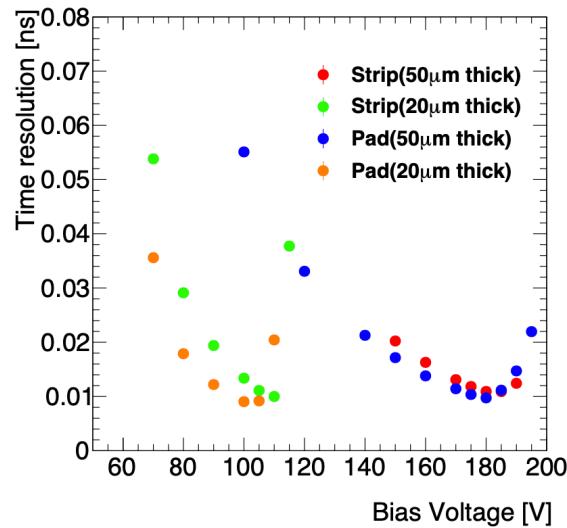


図 1.6: レーザーで測定した時間分解能（ジッター） [5]

横軸が印加電圧で縦軸が時間分解能である。

赤点が 50μm 厚の Strip 型、緑点が 20μm 厚の Strip 型、青点が 50μm 厚の Pad 型、橙色の点が 20μm 厚の Pad 型センサーである。50μm 厚の Pad 型センサーを示している。

第2章

LGAD 検出器の原理

2.1 LGAD 検出器の構造

Low Gain Avalanche Diode (LGAD) 検出器は、高い時間分解能が実現できる半導体検出器として期待されている。LGAD 検出器は p 型シリコン半導体をベースにしたシリコン半導体検出器で、アルミニウム電極の直下に SiO_2 の酸化膜がある。LGAD 検出器の n 型半導体は、シリコンに不純物としてリンが、p 型半導体は、不純物としてホウ素がドープしてある。pn 接合を作るために形成された表面の n^+ 層の数 μm 下に、増幅層としてアクセプター濃度が高い濃度が高い p^+ 層をドープした構造になっている。検出器に逆バイアス電圧をかけると、高濃度の p^+ 層によって、局所的に高電場領域を作り出すことができる。検出器内で生成された電子正孔対が、高電場による電子雪崩によって増幅されることで、立ち上がりが速くタイミングが揃った信号を出力することができる。また、増幅層の高電場によって電子正孔対が加速され、移動度が大きくなるため、電極に誘起される信号の立ち上がりが速くなる。そのため、増幅層のない一般的な半導体検出器と比べて、信号サイズが大きく、信号の立ち上がりを速くすることができるため、非常に高い時間分解能で荷電粒子を検出できる。

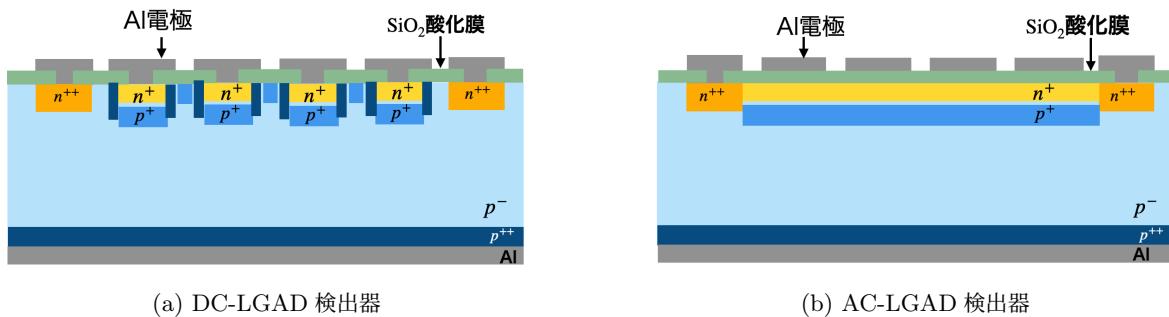


図 2.1: DC-LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器の構造

DC-LGAD 検出器は電極を細密化すると電極間に不感領域ができてしまう。

AC-LGAD 検出器は一様に増幅層を置くことで不感領域をなくすことができる。

従来の LGAD 検出器は、電極ごとに増幅層を設置する 図 2.1a のような DC-LGAD 検出器であった。DC-LGAD 検出器では、電極の細密化によって、電極間に信号が確認できない不感領域ができてしまう問題があった。そこで開発された 図 2.1b の AC-LGAD 検出器は、増幅層を読み出し電極ごとに分割しないで一様に形成し、酸化膜を介して電極に誘起された信号を検出する。増幅層を一様にしたことで、隣接チャンネルへの信号のクロストークが問題であったが、不純物濃度や酸化膜の厚さを最適化することで、クロストークが抑制された AC-LGAD 検出器を開発されている [6]。本研究では、クロストークが最も少ない E600 タイプの AC-LGAD 検出器を使用する。

2.2 雪崩増幅

電場がある値を超えると、電子と正孔が雪崩増幅を起こす。図 2.2 はその過程を示したものになっている。図 2.2 中の 1 番の電子に注目すると、高電場によってこの電子の運動エネルギーが増加する。この電子が格子に衝突した際に、持っていた運動エネルギーによって、格子の結合手を切断し、価電子帯から電子が励起される。この過程によって生じた電子正孔対が 2 番の電子と 2' 番の正孔である。この電子と正孔も高電場によって、格子に衝突し、電子正孔対を生成する。このように、高電場によって連鎖的に電子と正孔が生じる過程を電子雪崩（アバランシェ）という。

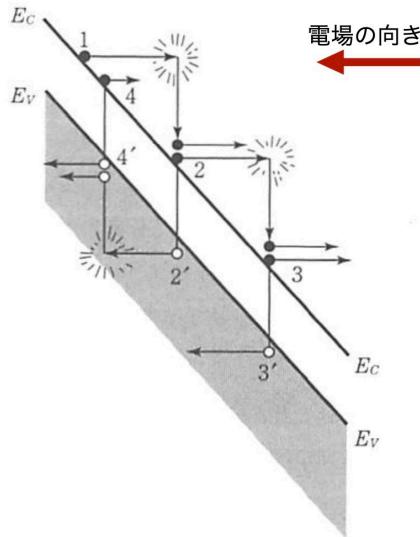


図 2.2: 電子雪崩におけるエネルギーバンド図 [7]

電子や正孔が衝突して電子正孔対を生成する現象が繰り返し生じる。

2.3 飽和ドリフト速度

以下の図 2.3 にシリコン中のドリフト速度の電界依存性を示す。横軸が電界の強さで縦軸がドリフト速度低電界ではドリフト速度は電界に比例するが、電界が大きくなると、徐々にドリフト速度の増加割合が小さくなる。そして、十分に高い電界になると、電荷キャリアと半導体格子との相互作用により、速度の増加が妨げられるため、ドリフト速度は飽和状態に近づく。その時の速度を飽和ドリフト速度という。生成された電子の速度を大きくすることで、検出器の電極に誘起される信号の立ち上がりを速くすることができる。LGAD 検出器では、印加する電圧を調整することで、電子が飽和ドリフト速度に達するほどの高電場を形成することができる。そのため、信号の立ち上がりが速くなり、優れた時間分解能を実現することができる。

2.4 時間分解能

時間分解能は検出器がある事象の時間的変化を識別できる能力のことである。検出する際に、どのくらいの時間幅で測定できるかを表す指標となる。時間分解能が向上することで、光速で飛んでくる荷電粒子の飛跡を細かく測定することができる。LGAD 検出器の時間分解能 σ_t を決定する要素は、タイムウォーク σ_{tw} 、ジッター σ_j 、ランダウノイズ σ_L の 3 つが大きく影響すると考えられている。式 4.0.1 に示すように、時間分解能は各要素の 2 乗和の式で表すことができる。

$$\sigma_t^2 = \sigma_{tw}^2 + \sigma_j^2 + \sigma_L^2 \quad (2.4.1)$$

この 3 つの影響をそれぞれ小さくすることで時間分解能を向上することができる。

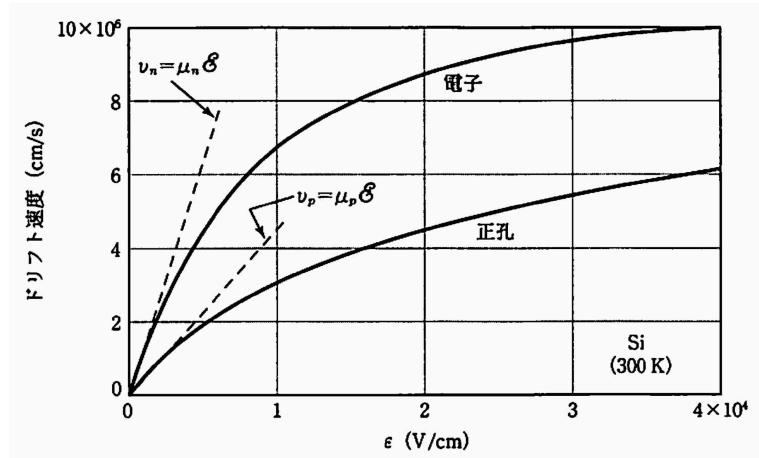


図 2.3: Si 中のドリフト速度の電界依存性 [7]、横軸が電界の強さで縦軸がドリフト速度
電界が強くなるとドリフト速度は増加するが、その増加割合は徐々に小さくなり飽和ドリフト速度になる。

2.4.1 タイムウォーク

図 2.4a に示すように、タイムウォークとは一定の閾値を設定して到達時間を測定したときに、信号の大きさによって到達時間にばらつきが生じてしまうことをいう。図 2.4a を見ると大きい信号の方が、小さい信号と比べて到達時間が早くなることがわかる。図 2.4b に示すようにタイムウォークは信号の大きさが異なっても、信号波高に対して 50 % の位置に閾値を設定する (constant fraction 方式) を使用することで、その影響を抑制できる。

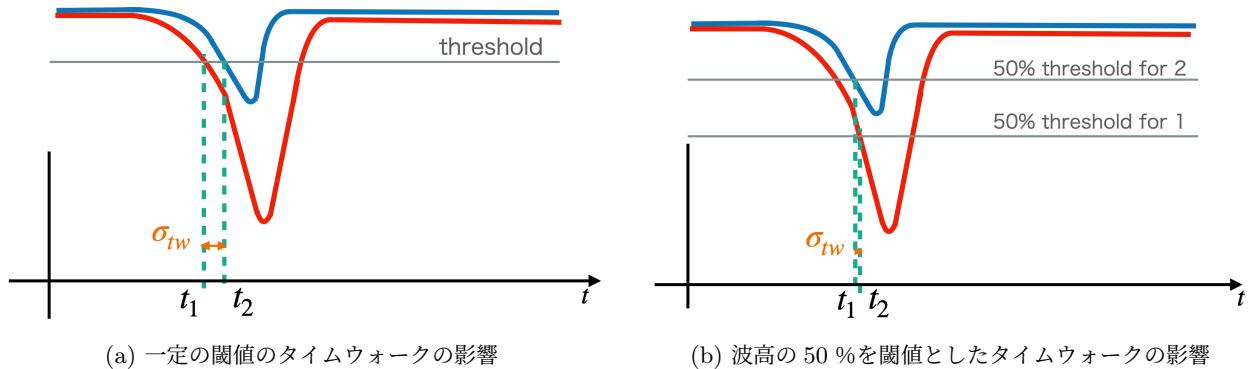


図 2.4: タイムウォークの影響

(a) が一定の閾値を設定したときのタイムウォークで (b) が波高の 50 % を閾値とした時のタイムウォーク
波高の 50 % の時間を到達時間として、タイムウォークの影響を小さくすることができる。

2.4.2 ジッター

図 2.5 に示すように、ジッターとは測定回路にのるノイズによって到達時間に違いが生じてしまうことをいう。ジッターは式 4.3.1 のように評価することができると考えられている。 σ_j がジッター、 σ_n がノイズ、 $\frac{dV}{dt}$ が図 2.5 の傾きを示している。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \frac{t_r}{\left| \frac{S}{\sigma_n} \right|} \quad (2.4.2)$$

この傾きは信号の大きさ S と、立ち上がり時間 t_r を用いることで、式 4.3.1 の第 2 項の分母の形のように表すことができる。この式から、ジッターは信号ノイズ比 (S/N) が大きい場合と、立ち上がり時間が早い場合に小さくなることがわかる。LGAD 検出器は增幅層の効果によって、信号が大きく、立ち上がり時間が早いため、增幅層が無い検出

器と比較してジッターが小さくなると考えられる。本実験では、このジッターの式 4.3.1 が実際にどのくらい正しいのかを信号の大きさ、ノイズ、立ち上がり時間、ジッターを測定することで、定量的に評価する。

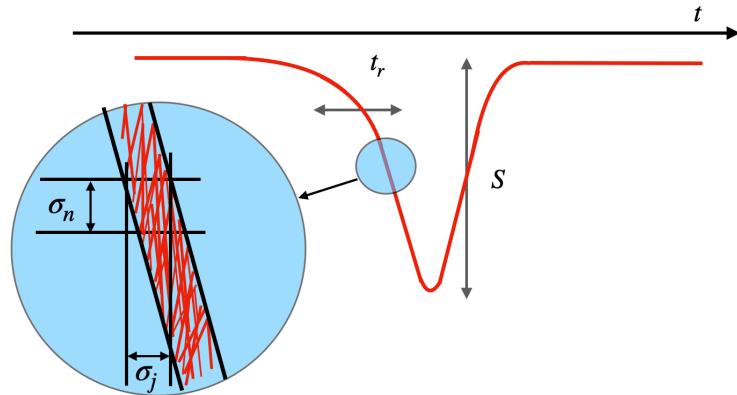


図 2.5: ジッターの影響
ノイズにより到達時間にばらつきが生じる。

2.4.3 ランダウノイズ

図 2.6 は荷電粒子が検出器内にエネルギーを落とす様子を示している。この図のように、荷電粒子が LGAD 検出器内に落とすエネルギーは深さによってばらつきがある。このばらつきはランダウ分布に従うことが知られており、この深さ方向に対する落とすエネルギーの違いによって、電荷が電極に誘起される時間にばらつきが生じる。このような影響をランダウノイズと呼ぶ。本実験の赤外線パルスレーザーでは、1 つの光子が落とすエネルギーは深さ方向にばらつきがあるが、検出器内に入射する光子の数が非常に多いため、あたかもエネルギーデポジットが一様な粒子を模擬することができる。そのため、ランダウノイズの影響が少ない状況で時間分解能を測定することができる。

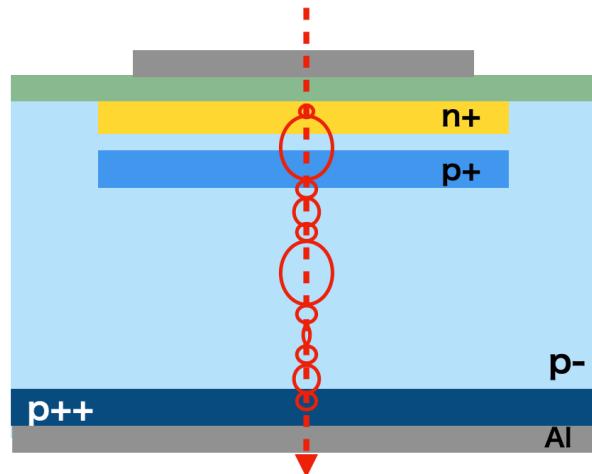


図 2.6: ランダウノイズの影響
赤丸が荷電粒子が落とすエネルギーの大きさを示している。

2.4.4 過剰ノイズ

増幅層がある半導体検出器特有のノイズとして、過剰ノイズ σ_m (Multiplication Noise) がある。過剰ノイズは、電子雪崩によって生成される電子や正孔による、電流変化に起因するノイズである。増幅層がある半導体内の単位長さあたりの電流変化は式 2.4.3 のように表すことができる [8]。 α が電子のイオン化係数、 β が正孔のイオン化係数として、 αI_n は、電子が格子に衝突した時の単位長さあたりの電子正孔対の生成確率で、 βI_p が、正孔が格子に衝突した

時の単位長さあたりの電子正孔対の生成確率である。 g は、単位長さあたりの熱や光学的に生成される電子正孔対の生成確率である。

$$dI_p = (\alpha I_n + \beta I_p + g) dx \quad (2.4.3)$$

また、過剰ノイズ係数 $\phi/2eI_{in}$ は式 2.4.4 で表すことができる [8]。 ϕ は、過剰ノイズ分布密度である。また、 $k = \frac{\beta}{\alpha}$ で、 M は増幅率である。式 2.4.4 は注入電流 I_{in} が I_p で近似した場合に満たされる式となっている。

$$\phi/2eI_{in} = M^3 \left[1 + \frac{1-k}{k} \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right] \quad (2.4.4)$$

式 2.4.4 を用いて、さまざまな $k = \frac{\beta}{\alpha}$ での過剰ノイズ係数の増幅率依存性を図 2.7 で示すことができる。図 2.7 の縦軸が過剰ノイズ係数で横軸が増幅率の両対数グラフである。このグラフを見ると、増幅率が高くなると過剰ノイズも大きくなることがわかる。そのため、増幅率が大きい領域では、過剰ノイズ增加により時間分解能が悪くなると考える。また、 $k = \frac{\beta}{\alpha}$ の値によって過剰ノイズが変化することがわかる。電子雪崩によって生成する電子と正孔の割合に偏りがあると、過剰ノイズの大きさに変化が生じる。電子が高電場領域に入った時に電子の生成が多い場合と、正孔が高電場領域に入った時に正孔の生成が多い場合に、過剰ノイズが小さくなる。

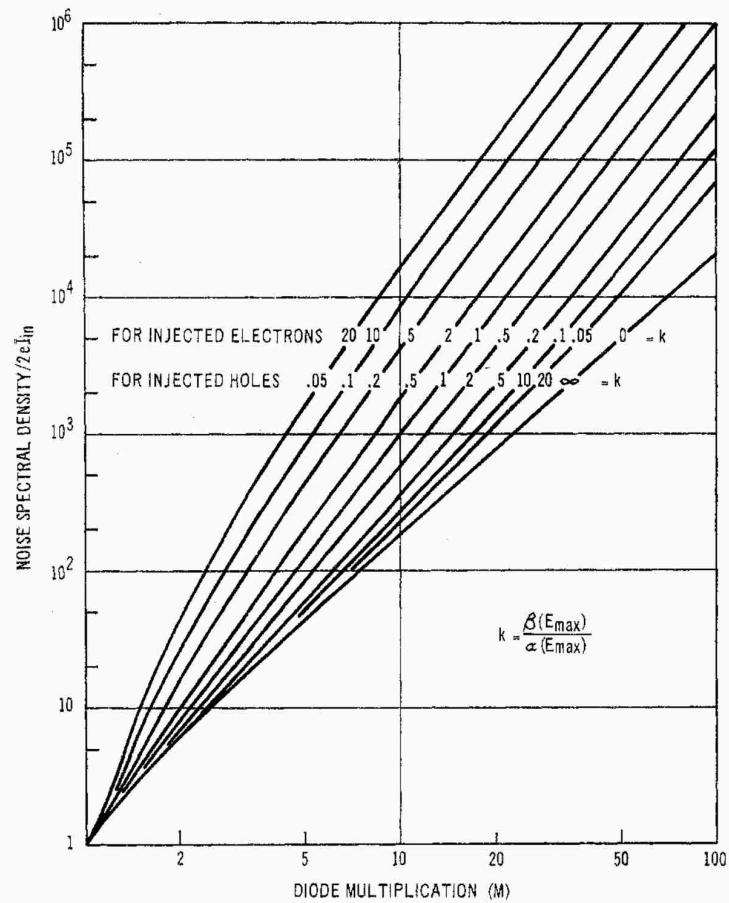


図 2.7: 過剰ノイズ係数の増幅率依存性 [8]

横軸が増幅率で縦軸が過剰ノイズ係数の両対数グラフ、さまざまな $k = \frac{\beta}{\alpha}$ での過剰ノイズ係数が示されている。

2.5 電流電圧特性

以下の図 2.8 に Pad 型の AC-LGAD 検出器の電流電圧特性を示す。横軸が印加電圧で縦軸が暗電流である。印加電圧を大きくすると、暗電流が急激に大きくなる電圧がある。この電圧は降伏電圧と呼ばれており、電子雪崩起きると暗電流が非常に大きくなるため、このような振る舞いをする。降伏電圧を超えた電圧だと、ノイズに対しても電子

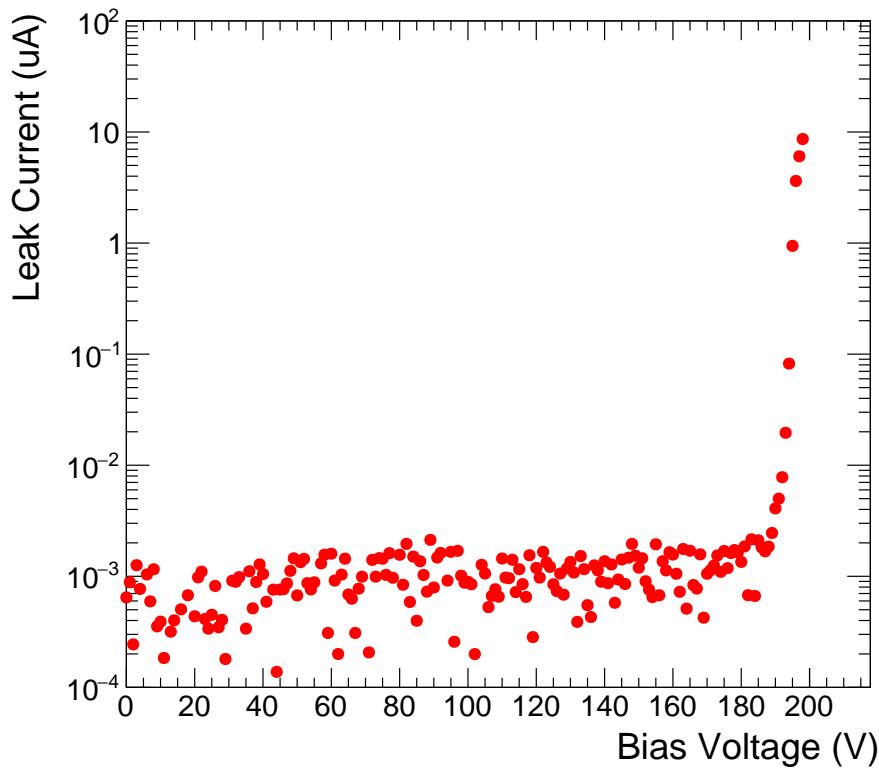


図 2.8: Pad 型の AC-LGAD 検出器の電流電圧特性

横軸が印加電圧で縦軸が暗電流、電子雪崩が生じると急激に暗電流が上昇する。

雪崩を起こしてしまい、ノイズが大きくなってしまう。そのため、LGAD 検出器の運転電圧は、ノイズに対して電子雪崩が生じずに、さらに信号の増幅率が最大の電圧に設定することが重要である。降伏電圧は温度に対して依存性があり、Pad 型の LGAD 検出器は、1 °C 増加すると降伏電圧が 1.1 V 増える [5]。温度によって降伏電圧にズレが生じないように、測定の際には温度を一定にする必要がある。また、1 °C 増加すると降伏電圧が 1.1 V 増えるため、電流電圧特性を用いることによって、測定系の温度を調べることもできる。

第3章

LGAD 検出器の増幅率

3.1 使用サンプル

今回の測定で使用するサンプルは AC-LGAD 検出器の 1chPad の E600 タイプ、 $50 \mu\text{m}$ 厚のセンサーであり、このセンサーは浜松ホトニクス社と共同で開発した。E600 タイプとは n^+ 不純物濃度で決定する抵抗値が $1600 \Omega/\square$ 、電極間の接合容量が 600 pF/mm^2 のクロストークが少ないサンプルである。以下の図 3.1 に使用サンプルの表面図を示す。中心の $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の部分には一様に増幅層があり、この領域に粒子が入射した際に増幅した信号を電極へ出力することができる。また、外側の部分はガードリング、エッジリングがあり、ガードリングは検出器内の急な電圧勾配を抑制する役割を担っている。

3.1.1 APD と PIN

本実験のために、増幅層がある Avalanche-Photo-Diode (APD) と、増幅層がなく増幅機構を持たない P-Intrinsic-N (PIN) ダイオードを作成した。以下の図 3.2 は APD、図 3.3 は PIN の検出器の構造を示している。アクセプター濃度が高い p^+ 層が増幅層である。AC-LGAD 検出器と同じ構造を持つ、APD と PIN の信号の大きさの比をとることで、LGAD 検出器の増幅率が求められる。

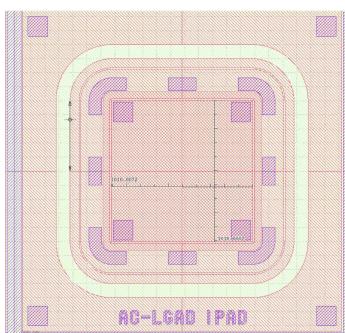


図 3.1: LGAD 検出器の表面図

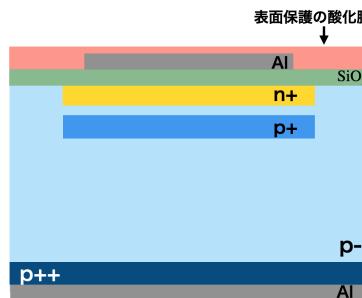


図 3.2: APD の LGAD 検出器

増幅層有り

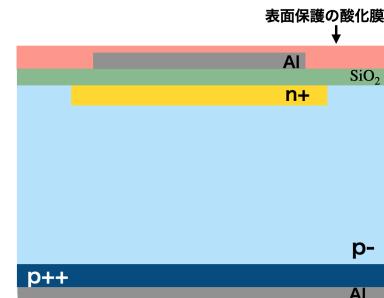


図 3.3: PIN の LGAD 検出器

増幅層無し

3.1.2 酸化膜とアルミニウムの除去

LGAD 検出器の表面には 図 3.2 と 図 3.3 にもあるように、検出器の表面を保護するための酸化膜、そしてその下にはアルミニウムの電極がある。本実験で使用する赤外線パルスレーザーを検出器内に入射するには、レーザーが反射することを防ぐために、表面と裏面のアルミニウムを剥離する必要がある。アルミニウムは、酢酸エチルを直接塗ることで剥離することができる。しかし、酢酸エチルを直接アルミニウムに塗布するには、表面保護の酸化膜を除去しなければいけないため、まずは表面の酸化膜の除去を行なった。PIN の酸化膜はピンセットで除去した。APD についてはピンセットで除去したところ、検出器内部を傷つけてしまい、暗電流が非常に大きくなってしまった。そのため、APD に関しては検出器内部を傷をつけないように、ワイヤーボンディングのウェッジを使って酸化膜を除去

することで、暗電流の増加を抑えることができた。酸化膜を除去し、アルミニウムを剥離した後の PIN と APD の表面の様子を 図 3.4 と 図 3.5 に示す。サンプルの中心に穴が空いていることがわかる。これが酸化膜を除去し、アルミニウムを剥離して作ったレーザーを入射するためのレーザー窓である。

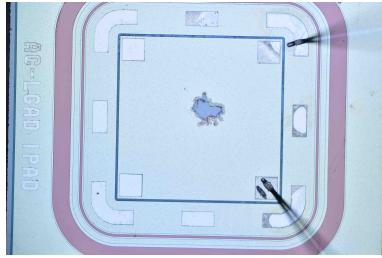


図 3.4: PIN の表面の剥離後の様子

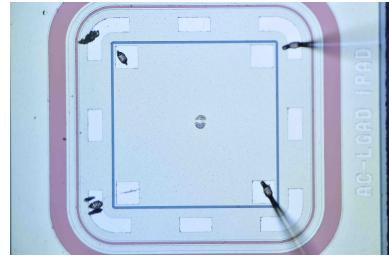


図 3.5: APD の表面の剥離後の様子

3.2 測定方法と使用装置

3.2.1 レーザーの性能

今回の LGAD 検出器の増幅率の測定においては、図 3.6 の赤外線パルスレーザーを使用する。このレーザーは、NKT Photonics 社の KATANA 10 [9] で、レーザーの性能について 表 3.1 にまとめた。このレーザー本体から直接トリガーを受け取る。レーザーのタイミングジッタが 10 ps 以下であるので、この影響が時間分解能に効いてくると考える。また、このレーザーの波長は 1064 nm で、周波数を 0.05 から 1 MHz に可変することができる。今回の測定では、周波数は 1 MHz に設定した。

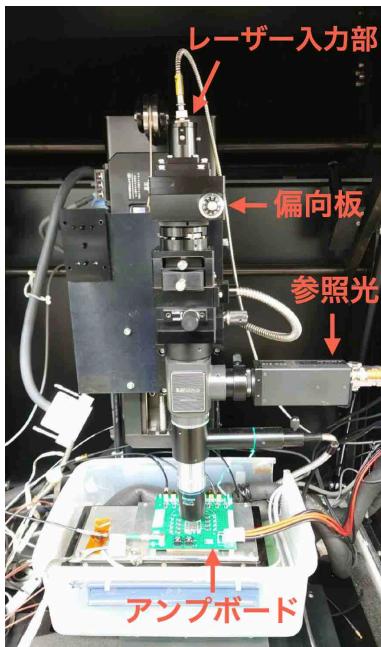


図 3.6: 赤外線パルスレーザー本体

表 3.1: 赤外線パルスレーザーの性能表

モデル	KATANA 10
波長	$1064 \pm 2 \text{ nm}$
パルス幅	$35 \pm 15 \text{ ps}$
平均出力	$> 60 \text{ mW at } 80 \text{ MHz}$
繰り返し周波数	$20 - 80 \text{ MHz}$
スペクトルバンド幅 FWHM	$< 0.4 \text{ nm}$
振幅ノイズ	$< 4 \% \text{ rms (10 時間)}$
タイミングジッタ	$< 10 \text{ ps}$

レーザーの波長が 1064 nm であるため、レーザーのエネルギーは 1.165 eV となる。レーザーのエネルギーを、シリコン半導体のバンドギャップエネルギー 1.12 eV とほぼ同じにすることによって、電子正孔対を一様に生成することができる。よって、エネルギーデポジットが一様な荷電粒子の通過を模擬できるため、ランダウノイズの効果がほとんどない測定が行える。また、レーザーの信号波形はほとんど同じであるため、タイムウォークの影響もほぼ無視できる。そのため、この測定系で時間分解能を測定することで、ジッターのみの影響を評価することができる。また、最大出力が 400 mW であるが、レーザー本体の上部にあるつまみを回すことで、偏向板減衰フィルターを回転

させることができる。レーザーの波の向きは1つの方向に偏っているため、レーザーから出た光子の強度を偏向板を用いて調整することができる。本実験では、PIN型のLGAD検出器の信号が小さいため、その信号がノイズに埋もれないようにレーザーの出力を最大にして測定を行なった。

3.2.2 センサーとアンプボード

今回の測定で用いる信号增幅用アンプ搭載基板(KEK16チャンネルアンプボード)が図3.7で最大16チャンネルの信号を高速で読み出すことができる。また、アンプボードにLGAD検出器を設置した様子が図3.8である。LGAD検出器とアンプボードは、ワイヤーを伝わって信号を送り出される。今回用いたLGAD検出器は、1chPadと呼ばれる電極が1つのAC-LGADであるため、検出器の信号は1つのチャンネルのみ出力される。そのため、信号をアンプボードへ送るために電極からアンプボードの入力端子に1本のワイヤーで繋がっている。アンプボードとアルミニウムが繋がっている3本のワイヤーは、高電圧をLGAD検出器に印加するためのワイヤーである。LGAD検出器に高電圧が印加される様子を、図3.9に示す。この図はLGAD検出器とアンプボードを側面から見た様子である。高電圧電源がアルミニウムから導電性テープを通ってLGAD検出器に高電圧を印加することができる。図3.9の最下層にあるG10は、エポキシガラス繊維樹脂の絶縁の板であり、高電圧が外部に流れない仕組みである。使用する高電圧電源はTektronix社製Keithley2410を使用した。また、アンプボードに電力を供給するための低電圧電源は、TEXIO社のPW8-5ADPSで6Vの電圧をかけた。



図3.7: KEK16 チャンネルアンプボード

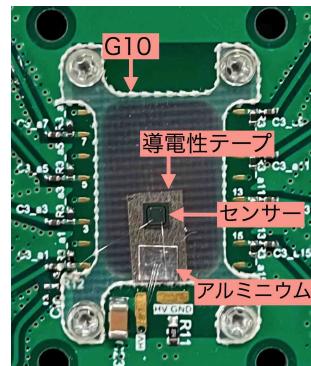


図3.8: アンプボードにセンサーを設置した様子

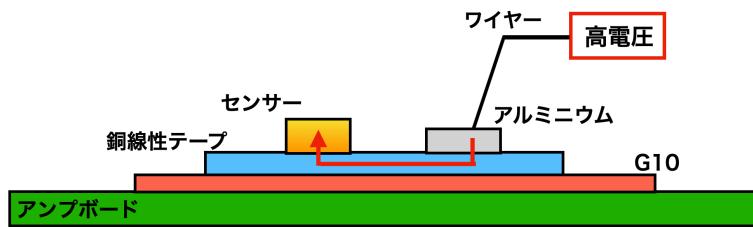


図3.9: センサーに高電圧を印加させる様子

アルミニウムから導電性テープを通ってセンサーに電圧が印加される

3.2.3 レーザー測定のセットアップ

以下の図3.10にこの実験の測定のセットアップを示す。センサーとアンプボードの下には、アンプボードの発熱による温度上昇を抑えるために、15°Cに設定されたチラーユニットと20°Cに設定されたペルチェ素子を設置した。この装置の冷却が銅板に伝わり、空冷によってセンサーの温度上昇を抑えている。また、センサーに光が入ると、セ

ンサーの暗電流が大きくなってしまうため、測定のセットアップを遮光するためにボックスの中に設置した。レーザーの入射によるセンサーの出力をアンプボードで増幅を行い、オシロスコープへと信号を送る。信号を受け取ったオシロスコープから PC へとデータを送り出す。一度の測定のイベント数は 65535 イベントでこのイベント数はオシロスコープの一回の測定による限界の値である。今回の測定では、一回の測定で 65535 イベントを取得する。本測定のトリガーはレーザー本体から直接オシロスコープへ送っている。

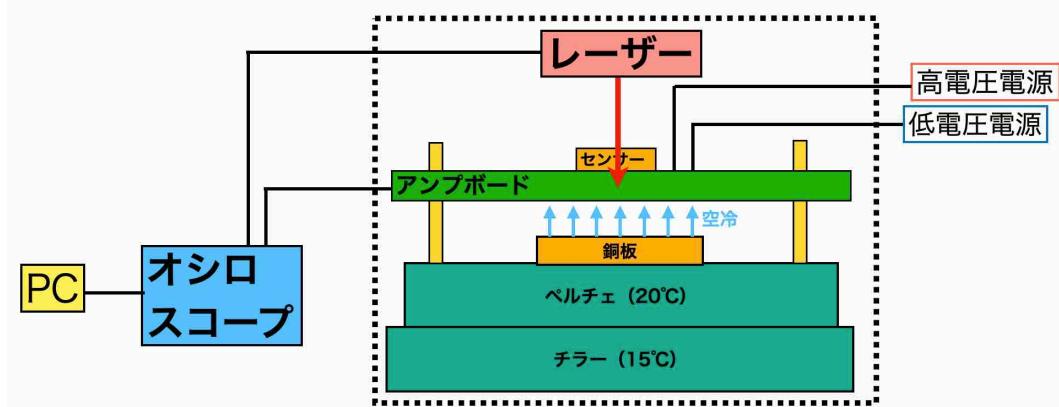


図 3.10: レーザー測定のセットアップ

チラーとペルチェによってセンサーとアンプボードが空冷される。遮光ボックス（波線部）の中に測定系を設置している。レーザー本体からトリガーをアンプボードから信号をオシロスコープへ送る。

測定の際にはまず、 $2 \mu\text{m}$ 角のレーザーがセンサーの中心に来るよう調節し、焦点を合わせる必要がある。レーザーの位置を調節する際には 図 3.12 の左図の中心にある参照光を用いて、レーザーの位置と焦点を調節する。ステージコントローラを使って、 $0.1 \mu\text{m}$ 単位で 図 3.11 にあるように、xyz 軸動かすことができる。そのため、レーザー窓の中心に参照光が来るように x と y 軸を動かすことで、レーザーの焦点を z 軸を動かすことで調節することができる。

今回の測定系では低電圧をアンプボードにかけると、アンプボードの発熱によって温度膨張が生じ、図 3.12 のように焦点がずれてしまう。そのため、チラーとペルチェの空冷によって、アンプボードとセンサーが熱平衡状態になってから焦点を合わせる必要がある。光による暗電流の増加を防ぐために、測定系は遮光ボックス内に設置してある。また、測定を開始する際には、参照光を消してから測定を行った。

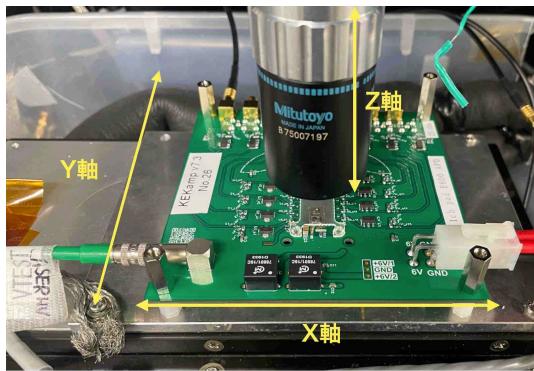


図 3.11: レーザーの入射位置と焦点の調節

xyz 軸を動かして、位置と焦点を調節できる。

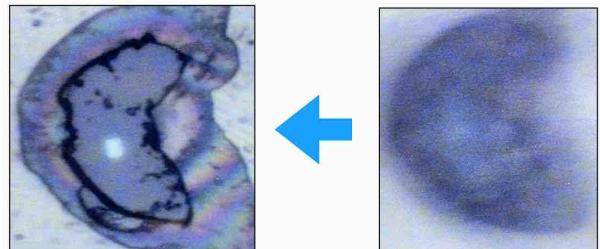


図 3.12: レーザーの焦点の様子

右が焦点を合わせる前、左が焦点を合わせた後

3.2.4 サンプルの電流電圧特性

20°C に設定した恒温層内の LGAD 検出器の電流電圧特性と、今回の測定セットアップ内での電流電圧特性を比較することで、測定系の温度を調べた。今回の電流電圧特性の測定では、 2 V ステップで暗電流が $100 \mu\text{A}$ になるまで

行った。以下の図 3.13 に APD の電流電圧特性の測定結果を示す。青のデータ点がレーザーのセットアップ内で測定した電流電圧特性で、赤のデータ点が恒温層内で測定した電流電圧測定である。LGAD 検出器の降伏電圧は、 1°C 増加すると 1.1 V 増える [5]。暗電流の上昇率が初めて 10 倍を超えた点を降伏電圧をすると、レーザーのセットアップ内の降伏電圧が 198 V で恒温層内の降伏電圧が 186 V であった。そのため、今回の実験セットアップでは、降伏電圧が 12 V 増加していることがわかった。よって、本実験の測定系では、センサーが 32°C であると考えられる。

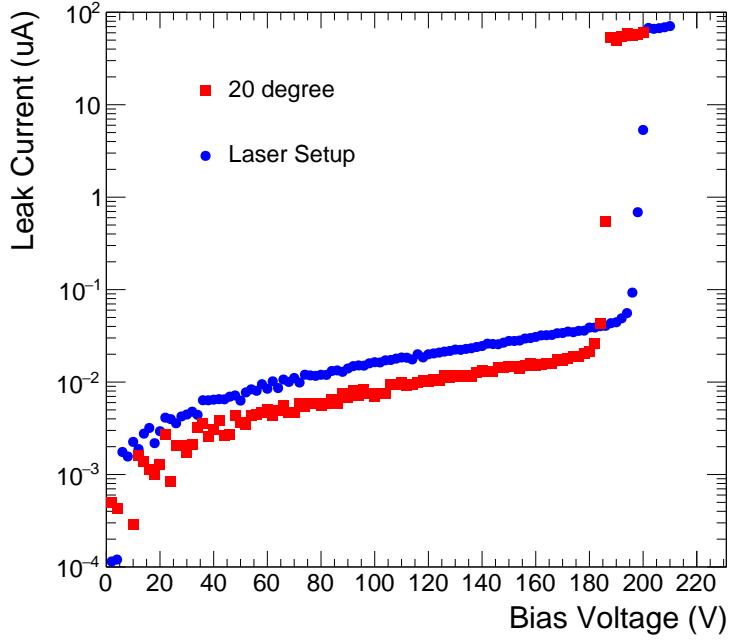


図 3.13: AC-LGAD 検出器の電流電圧特性

恒温層内で測定した電流電圧特性（赤）とレーザーセットアップで測定した電流電圧特性（青）の比較

3.3 解析方法

3.3.1 波形の解析

TELEDYNE LECROY 社の WaveRunner 8000HD 8 チャンネル 高分解能オシロスコープを使用して、赤外線パルスレーザーからのトリガーと LGAD 検出器からの信号を取得する。図 3.14 にオシロスコープの出力とデータ取得方法を示す。オレンジ色の信号が赤外線パルスレーザー本体から取得したトリガー信号である。トリガーは 1 MHz で threshold は 1.5 V に設定した。トリガー信号から出でてから約 55 ns 後に見られる黄色の信号が LGAD 検出器の信号である。LGAD 検出器の信号はアンプボードのノイズによって、 0 V 付近でふらつく。そのため、 0 mV をベースラインとして、ベースラインと信号の最小値の差を波高とした。信号サイズの違いによるタイムウォークの影響を小さくするために、波高の 50% の時の時間を到達時間とした。このようにして波形から波高と到達時間のデータ取得した。APD に関しては、逆電圧を印加し始めた電圧は、增幅層の空乏化に使われるため、バルク部の空乏化による信号は 70 V から見える。そのため、APD は 70 V から 200 V の範囲を測定した。PIN に関しては、 0 V から 200 V の範囲を測定した。また、時間分解能が良いと予想される 180 V から 200 V の範囲については、細かい電圧ステップで測定を行った。

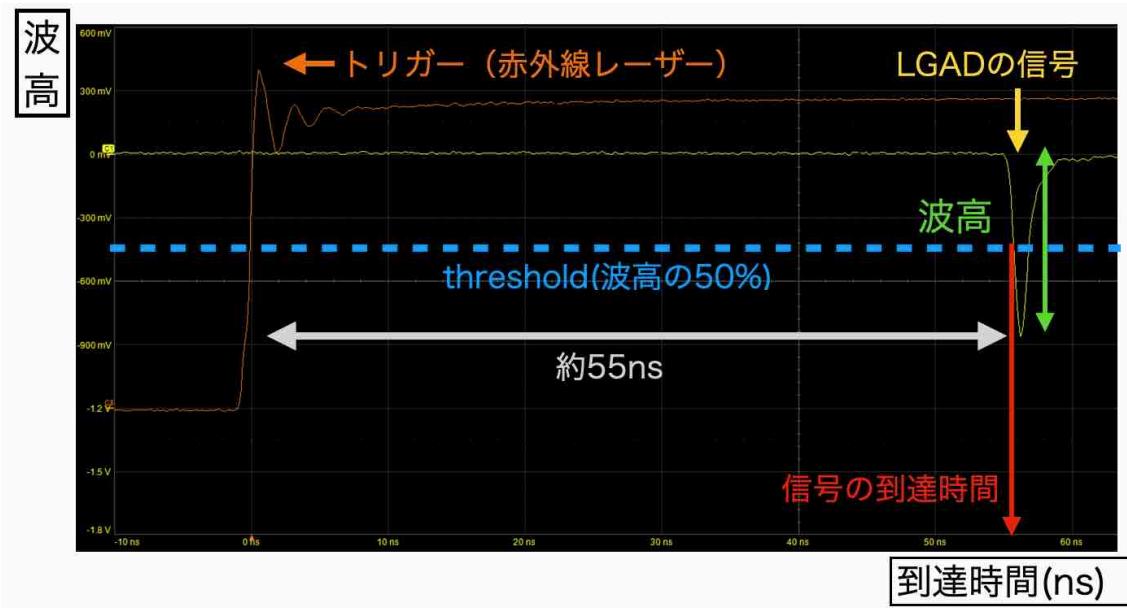


図 3.14: オシロスコープの出力とデータの取得方法

横軸が時間、縦軸が波高である。トリガー（赤色）の 55 ns 後に LGAD 検出器の信号（黄色）が来る。ベースラインと LGAD の信号の最小値の差を波高、波高の 50 % の時の時間を到達時間とした。

3.3.2 信号の大きさと時間分解能

信号の大きさと時間分解能を測定するために、波形から取得した波高と到達時間のデータを用いて、図 3.15 のように x 軸が到達時間、y 軸が波高の 2 次元ヒストограмを作成した。図 3.16a が、2 次元ヒストograms の x 軸を射影した到達時間のヒストogram で、図 3.16b が 2 次元ヒストograms の y 軸を射影した波高のヒストogram である。時間分解能は到達時間のヒストogram の標準偏差とした。標準偏差は到達時間のヒストogram を、ガウスでフィッティングすることで求めた。信号の大きさは波高のヒストogram の最頻値とした。最頻値は波高のヒストogram を、非対称ガウスでフィッティングすることで求めた。この解析を各電圧で行い、信号の大きさ、時間分解能、増幅率の電圧依存性を求めた。

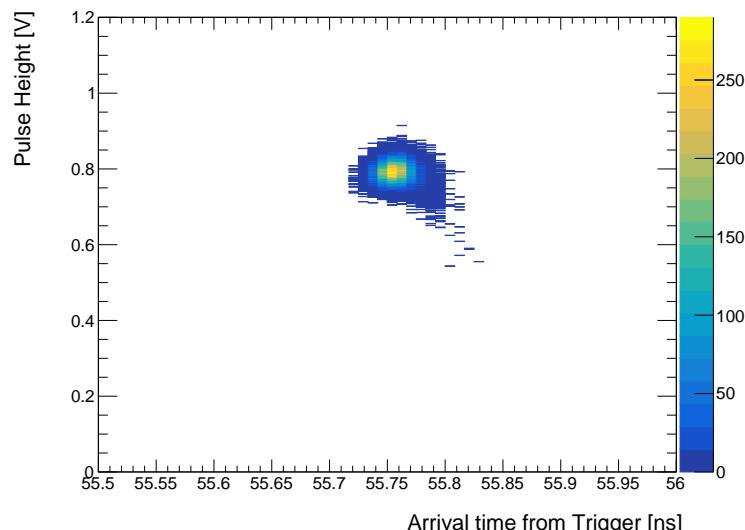


図 3.15: 波高と到達時間の 2 次元ヒストogram

x 軸が到達時間で y 軸が波高

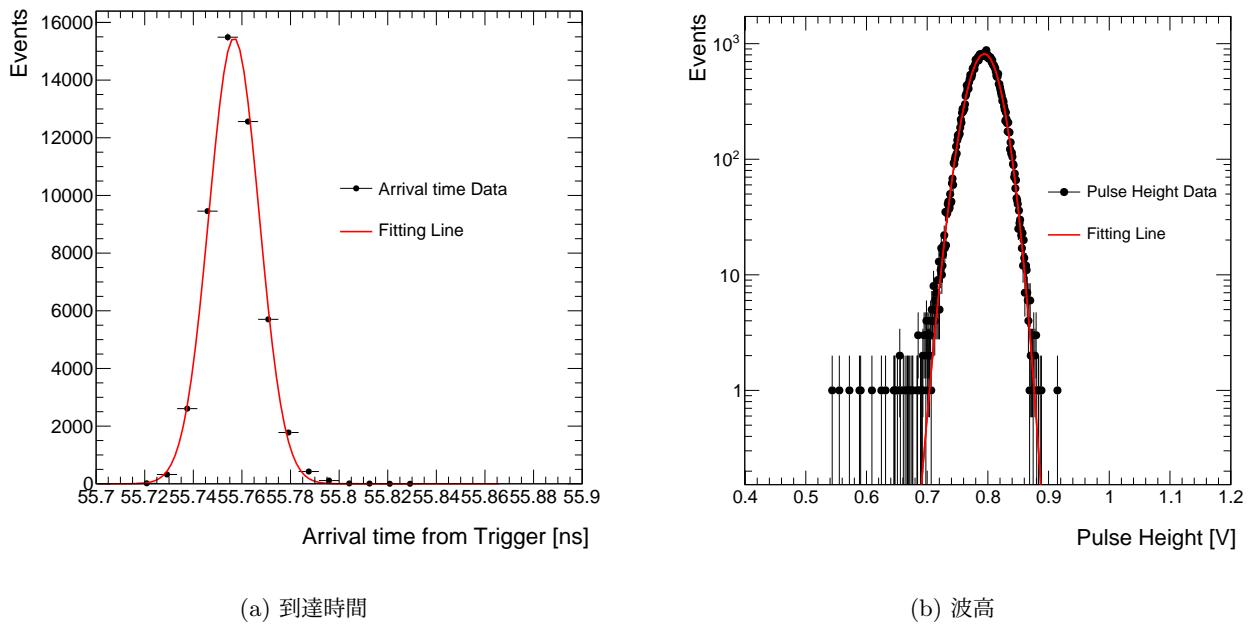


図 3.16: (a) が x 軸を射影した到達時間のヒストグラムの標準偏差を時間分解能とした。

(b) が y 軸を射影した波高のヒストグラムの最頻値を信号の大きさとした。

黒点が各データ点で赤線がフィッティングした結果

3.3.3 増幅率

APD の信号の大きさを S_{APD} とし、PIN の信号の大きさを S_{PIN} とすると、増幅率は式 3.3.1 のように、APD の信号の大きさと PIN の信号の大きさの比を取ることで、増幅層で電荷が何倍に増幅されるか求めることができる。

$$\text{Gain} = \frac{S_{APD}}{S_{PIN}} \quad (3.3.1)$$

3.4 測定結果

3.4.1 信号の大きさ

測定した結果から x 軸が印加電圧、y 軸が信号の大きさのグラフを作成した。図 3.17a は増幅層の無い PIN の信号の大きさの電圧依存性で、図 3.17b は増幅層がある APD の信号の大きさの電圧依存性である。PIN の信号の大きさの電圧依存性を見ると、電圧をかけ始めた領域では、電圧を上げると信号の大きさが上昇していることがわかる。さらに電圧を上げていくと、信号の上昇率が徐々に減少し、信号の大きさが約 25mV でほぼ一定になった。これは、電圧をかけ始めた領域では、増幅層の無い半導体検出器の空乏層が電圧を上げることで拡大するため、信号の大きさが上昇していると考える。また、信号の大きさが約 25mV でほぼ一定になった理由は、空乏層が全て空乏化したことにより、これ以上電圧を大きくしても空乏層は拡大しないためであると考える。APD の信号の大きさの電圧依存性を見ると、電圧を上げると信号の大きさが指数関数的に増大していることがわかった。この結果より、増幅層の高電場によって、荷電粒子が入射することで生成した電子正孔対が、指数関数的に増幅されることがわかった。

3.4.2 時間分解能

時間分解能 σ_t の電圧依存性を以下の 図 3.18 に示す。青点が PIN と赤点が APD の測定結果を、同時に x 軸が電圧、y 軸が時間分解能のグラフにプロットした様子になっている。PIN の時間分解能は、電圧を印加し始めたところでは向上していることがわかった。PIN は電圧を上げることで空乏化により空乏層が拡大し、信号が大きくなるた

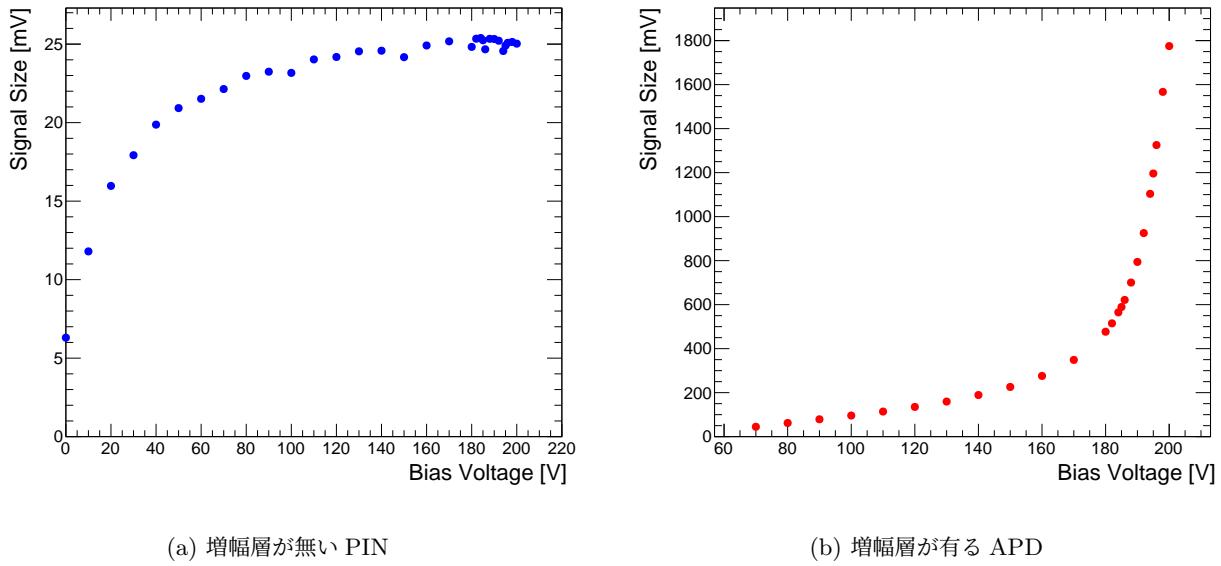
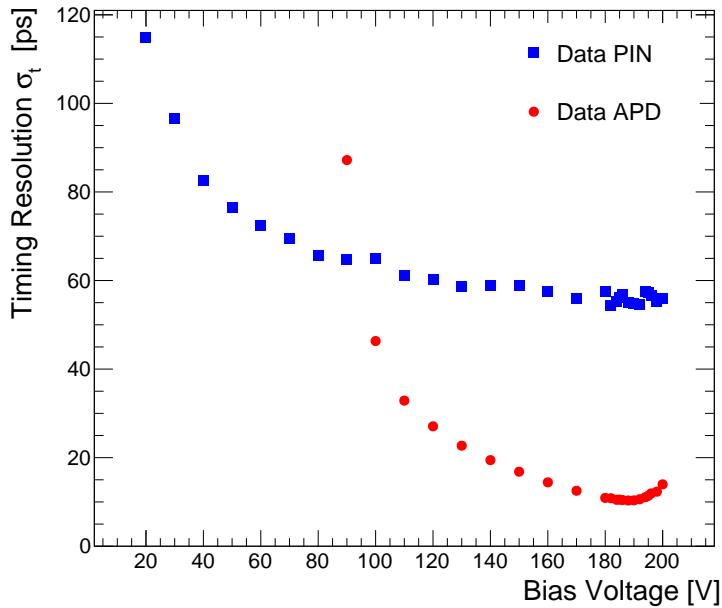


図 3.17: AC-LGAD 検出器の信号の大きさの電圧依存性

x 軸が電圧で y 軸が信号の大きさ

め、時間分解能が向上したと考える。また、時間分解能の向上割合が小さくなるのは、印加電圧の上昇による空乏層の拡大がほとんど起らなくなつたためであると考える。APD の時間分解能は 188~192 V でおよそ 10 ps を得られることがわかった。この電圧を超えると時間分解能が悪化する様子を見ることができた。そのため、188~192 V が本実験の測定セットアップでのセンサーの運転電圧であると考える。運転電圧を超える電圧を印加すると、時間分解能が悪化してしまう原因については第 4 章で詳しく議論する。APD と PIN の時間分解能の比較から、検出器に増幅効果があることで時間分解能が 1/5 倍になることがわかった。

図 3.18: AC-LGAD 検出器の時間分解能 σ_t の電圧依存性

x 軸が電圧で y 軸が時間分解能、青点が PIN で赤点が APD

3.4.3 増幅率

APD と PIN の信号の大きさから、LGAD 検出器の信号の増幅率を求めた。図 3.19 は、求めた増幅率と APD の時間分解能の測定結果の電圧依存性を同時にプロットしたものになっている。x 軸が電圧で、y 軸が増幅率と時間分解能を示している。赤点が時間分解能で、青点が増幅率、黒線が増幅率のフィット結果である。この図を見ると、増幅率は電圧を上げることで指数関数的に増大することがわかった。これは、印加電圧を増やしたことによる PIN の信号の大きさの増加と比べて、APD の信号の大きさの増加が非常に大きいためである。運転電圧 188~192V の範囲の増幅率を求めた。以上の結果より、AC-LGAD 検出器の時間分解能が最も良い増幅率は、およそ 20~35 倍であることがわかった。

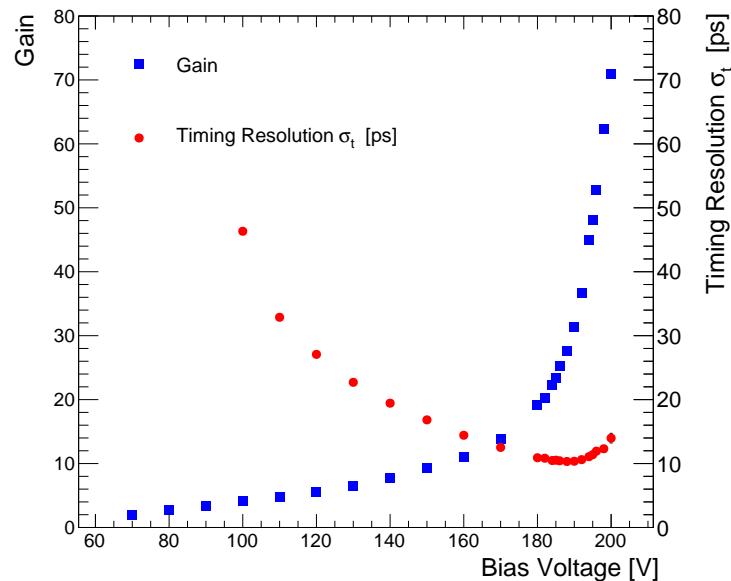


図 3.19: AC-LGAD 検出器の増幅率と時間分解能の電圧依存性

x 軸が電圧で y 軸が増幅率と時間分解能、赤点が増幅率、青点が時間分解能、黒線がフィット結果

第4章

時間分解能の評価

第3章で運転電圧を超えると、LGAD検出器の時間分解能が悪化する様子が見られた。LGAD検出器の時間分解能は、タイムウォーク σ_{tw} 、ジッター σ_j 、ランダウノイズ σ_L の3つが大きく影響すると考えられており、式4.0.1に示すように、時間分解能は各要素の2乗和の式で表すことができると第2章で説明した。

$$\sigma_t^2 = \sigma_{tw}^2 + \sigma_j^2 + \sigma_L^2 \quad (4.0.1)$$

赤外線パルスレーザーを用いることで、タイムウォーク σ_{tw} 、ランダウノイズ σ_L の影響が少ない荷電粒子の入射を模擬することができる。式4.3.1にあるように、立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S 、ノイズ σ_n から、ジッターを求めることができる。本章では、レーザー測定から求めた時間分解能と、計算から求めたジッターとの比較から、特に増幅率が高い場合に時間分解能が悪化する原因について議論する。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \left| \frac{t_r}{\frac{S}{\sigma_n}} \right| \quad (4.0.2)$$

4.1 立ち上がり時間

4.1.1 解析方法

以下の図4.1にオシロスコープの信号から立ち上がり時間を解析する方法を示す。横軸が時間、縦軸が波高で、LGAD検出器の信号が黄色線である。

式4.3.1より、信号の傾き $\left| \frac{S}{t_r} \right|$ はこのように求めることができる。そのため、立ち上がり時間 t_r を波高の60%から40%の範囲の値を使用するので、信号の大きさ S も60%から40%の範囲の波高の差を用いる必要がある。最大波高の60%と40%の時の波高と時間をそれぞれ読み取り、その差を取ることで、立ち上がり時間と60%から40%の波高の差のデータを取得した。全イベントの取得したデータをヒストグラムにして、その時の最頻値を立ち上がり時間 t_r 、 S を60%から40%の波高差とした。PINの信号の大きさが小さいため、立ち上がり時間と波高差を求める際の範囲を広げすぎると、ノイズの影響で立ち上がり時間と波高差を正しく解析することができないので、範囲を波高の60%から40%に設定した。

4.1.2 立ち上がり時間の測定結果

APDとPINの立ち上がり時間の電圧依存性を以下の図4.2に示す。横軸が電圧で、縦軸が立ち上がり時間で、赤点がAPDで、青点がPINの測定点である。PINの立ち上がり時間の電圧依存性はほとんど一定であることがわかった。これは、PINの波形が電圧を上げてもほとんど変わらないため、信号の立ち上がりの変化が小さいからであると考える。APDの立ち上がり時間は、電圧が大きくなると小さくなり、運転電圧を超えると悪化することがわかった。運転電圧に近づくほど、LGAD検出器の信号の立ち上がりは速くなることがわかる。運転電圧を超えると、立ち上がり時間が速くならない理由は、電子が飽和ドリフト速度に達するため、これ以上、電子正孔対の速度が大きくならないことに加えて、ノイズが大きくなることによって、立ち上がり時間が悪化するのではないかと考える。

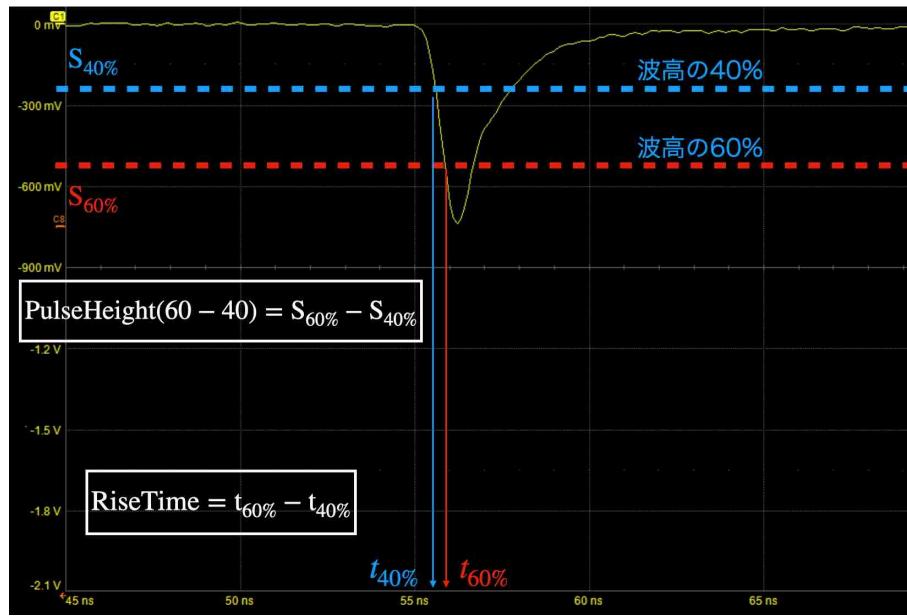


図 4.1: 立ち上がり時間の解析方法

横軸が時間、縦軸が波高で、LGAD 検出器の信号が黄色線。

最大波高の 60 % と 40 % の波高と時間の差をとって、立ち上がり時間 t_r と 60 % から 40 % の波高の差 S を求めた。

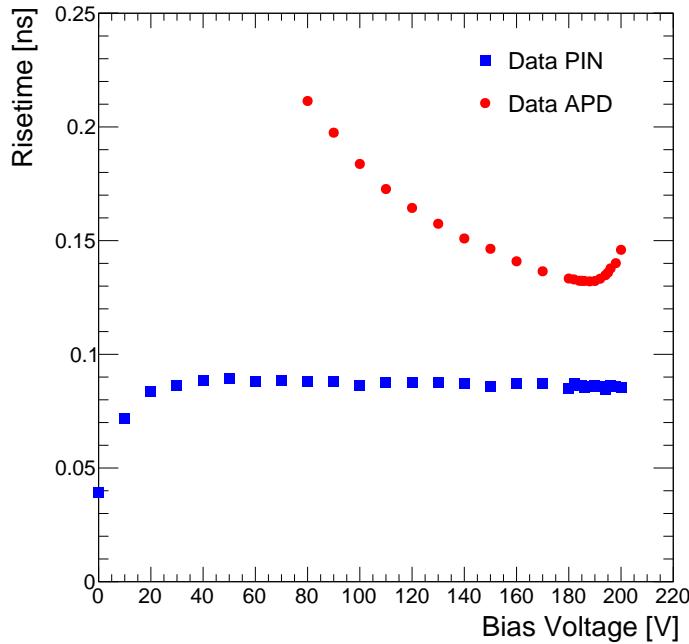
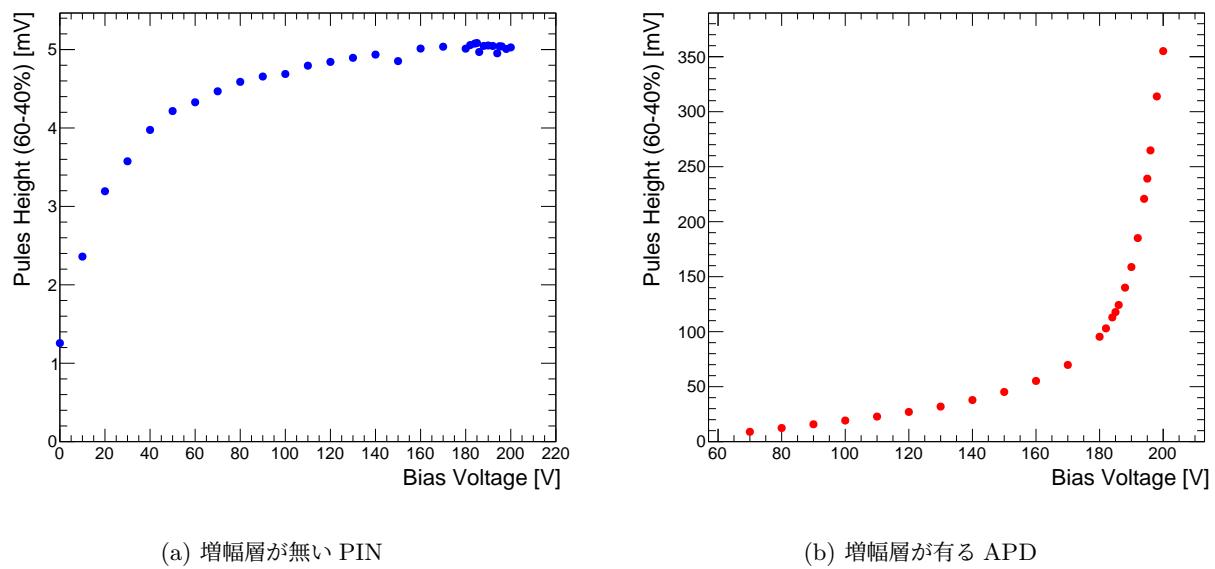


図 4.2: AC-LGAD 検出器の立ち上がり時間の電圧依存性

横軸が電圧で縦軸が立ち上がり時間、赤点が APD で青点が PIN の測定点

4.1.3 波高差の測定結果

測定した結果から x 軸が印加電圧、y 軸が波高差のグラフを作成した。図 4.3a は増幅層の無い PIN の波高差の電圧依存性で、図 4.3b は増幅層が有る APD の波高差の電圧依存性である。PIN のグラフは、図 3.17a の信号の大きさの電圧依存性のグラフと同様に、空乏化によって、波高差が変化する様子が見られた。APD のグラフは、図 3.17b の信号の大きさの電圧依存性のグラフと同様に、増幅層による電子正孔対の増幅による、波高差の指数関数的な変化が見られた。



(a) 増幅層が無い PIN

(b) 増幅層が有る APD

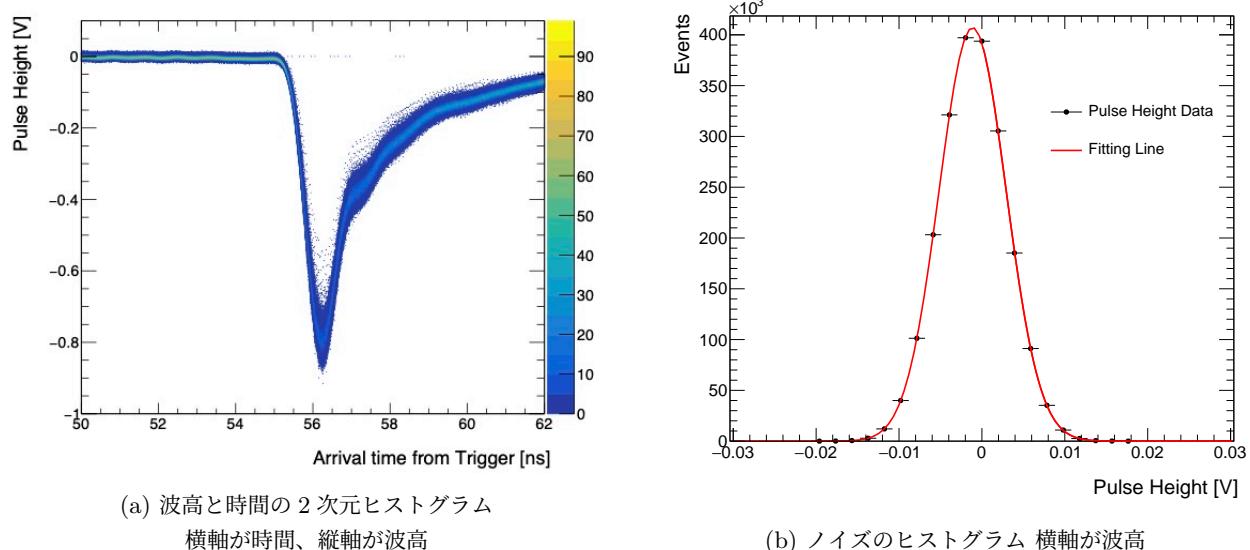
図 4.3: AC-LGAD 検出器の波高の 60 %から 40 %の差の電圧依存性

x 軸が電圧で y 軸が波高の 60 %から 40 %の差、赤点が APD で、青点が PIN の測定点

4.2 ノイズ

4.2.1 解析方法

図 4.4a は、横軸が時間で縦軸が波高のグラフに、AC-LGAD 検出器から得られる信号をプロットした 2 次元ヒストограмである。このヒストogram から信号のない時間領域である 50 ns から 54 ns の範囲を x 軸で射影したヒストogram が 図 4.4b である。このヒストogram の標準偏差をノイズとして、APD と PIN のノイズの電圧依存性を測定した。

(a) 波高と時間の 2 次元ヒストグラム
横軸が時間、縦軸が波高

(b) ノイズのヒストグラム 横軸が波高

図 4.4: ノイズの解析方法

(a) の y 軸を 50 ns から 54 ns の間で射影したのが (b) のヒストグラム

(b) のヒストグラムの標準偏差をノイズとした。

4.2.2 ノイズの測定結果

APD と PIN のノイズの電圧依存性を以下の図 4.5 に示す。横軸が電圧で縦軸がノイズである。青点が PIN で赤点が APD の測定値を表している。ノイズが一定になっている領域を見ると、PIN のノイズは約 2.6mV に対して、APD のノイズは約 4mV で、PIN と比べて約 1.6 倍大きかった。そのため、增幅層がない検出器と比べて、增幅層がある検出器はノイズが大きくなることがわかった。また、200V では APD のノイズが急激に上昇し、およそ 4.7 mV になることがわかった。これは、図 3.13 の電流電圧特性を見ると、200V では電子雪崩の影響が非常に大きくなることがわかる。そのため、電子雪崩が生じることで、暗電流が増加してノイズが大きくなるのではないかと考える。

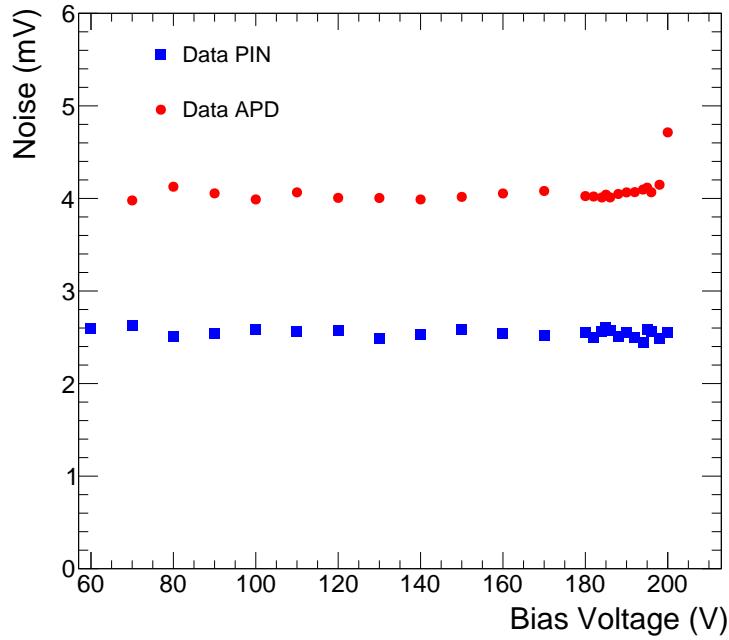


図 4.5: AC-LGAD 検出器のノイズの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸がノイズ、青点が PIN で赤点が APD の測定値

4.3 ジッター

これまでの測定から、立ち上がり時間 t_r 、60 %から 40 %の波高の差 S 、ノイズ σ_n を求めることができた。この測定結果と式 4.3.1 を用いて、PIN と APD のジッター σ_j を求めた。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \frac{t_r}{\left| \frac{S}{\sigma_n} \right|} \quad (4.3.1)$$

以下の図 4.6 に APD と PIN のジッターの電圧依存性を示す。横軸が電圧で縦軸がジッターである。また、青点が PIN、赤点が APD の測定データである。PIN のジッターは電圧が大きくなると減少し、その減少量は印加電圧が大きくなるにつれて小さくなり、およそ 42 ps になることがわかった。PIN の立ち上がり時間とノイズは電圧に依存せずに一定であるため、空乏層の拡大による信号の大きさの増加がジッターの減少に影響していると考える。APD のジッターは電圧を上げるほど小さくなり、最小値が 198 V でおよそ 1.9 ps であった。APD は印加電圧の増加により、立ち上がり時間が早くなり、信号の大きさが増加するため、ジッターが小さくなると考える。また 200V では、電子雪崩によってノイズが非常に大きくなる影響によって、少しだけ増加することがわかった。

さらに、図 4.7 に、APD のジッター σ_j とレーザー測定から求めた時間分解能 σ_t の増幅率依存性を示す。横軸が増幅率で縦軸がジッターと時間分解能である。青点が時間分解能で赤点がジッターのデータ点である。この図より、時間分解能は増幅率が大きくなると悪化するのに対して、ジッターは増幅率が大きくなると減少していることがわか

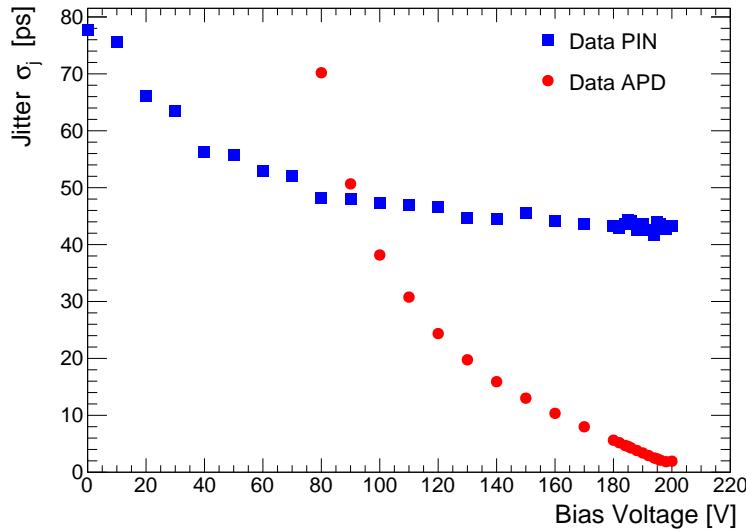


図 4.6: AC-LGAD 検出器のジッターの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸がジッター、赤点が APD で青点が PIN の測定点

る。ジッターと時間分解能は一致せず、ジッターのみでは説明できない時間分解能の悪化が見られることがわかった。そのため、AC-LGAD 検出器の時間分解能は、ジッター、タイムウォーク、ランダウノイズに加わる要因があり、特に増幅率が大きい時にその効果が顕著であることがわかった。

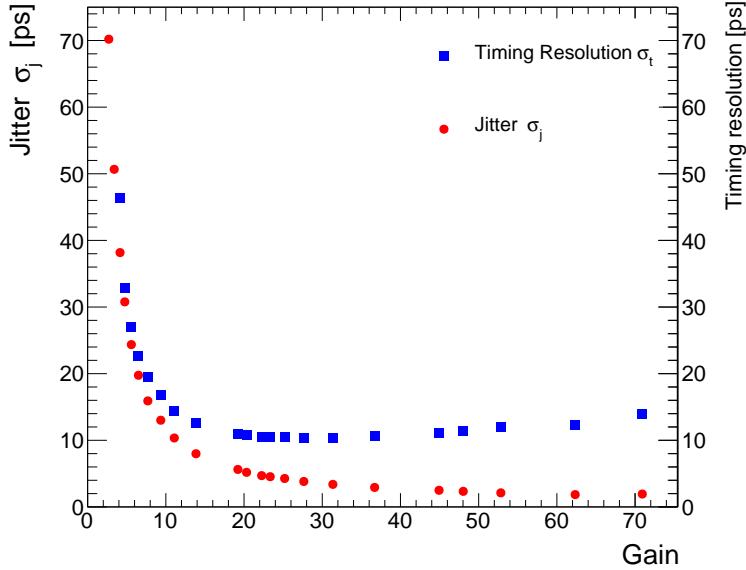


図 4.7: AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターの増幅率依存性
横軸が増幅率で縦軸がジッターと時間分解能、青点が時間分解能で赤点がジッターのデータ点

時間分解能からジッターを引くことで、時間分解能を悪くする要因への理解を進めた。以下の 図 4.8 にその結果を示す。縦軸が時間で横軸が増幅率である。時間分解能が悪くなる様子を見るために、時間スケールを 0~15 ps に変更した。青点が時間分解能で赤点がジッター、ピンクの点が時間分解能とジッターの差についてである。増幅率が小さい領域では、時間分解能とジッターの差は増幅率が上昇とともに減少し、増幅率が 15 倍以上の領域では、増幅率の増加と共に上昇することがわかった。

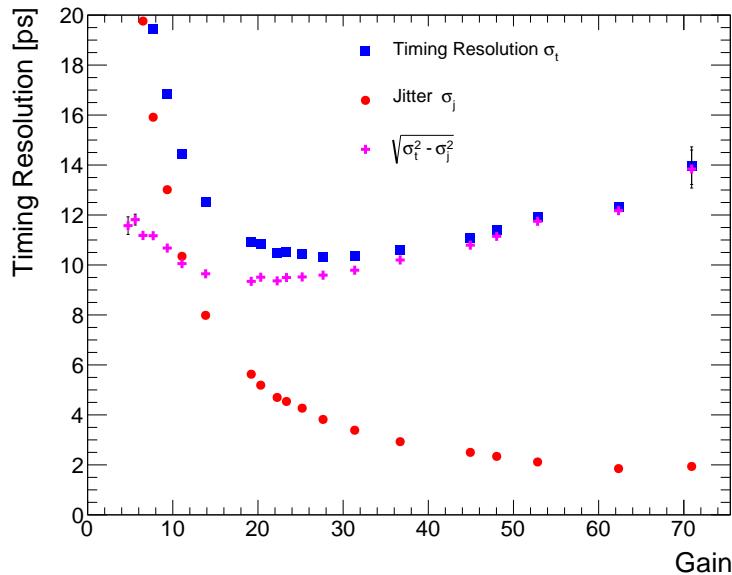


図 4.8: AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターとその差の増幅率依存性

横軸が増幅率で縦軸がジッターと時間分解能、青点が時間分解能で赤点がジッター、ピンクの点が時間分解能とジッターの差

4.4 時間分解能を悪化させる要素の考察

4.4.1 波形と解析方法

ジッターと時間分解能の差が大きくなる前となった後の波形を比較するために、以下の 図 4.9a に 190 V の波形、図 4.9b に 198 V の波形を示す。この図はオシロスコープの出力で、横軸が時間で縦軸が波高である。2 つの波形を比較すると、198 V の波形は波高に大きなばらつきがあることがわかる。このように波高が揺らぐため、波高の 50 % の時間を到達時間とした際に、波高の大きさによって、到達時間にばらつきが出てしまうのではないかと考える。

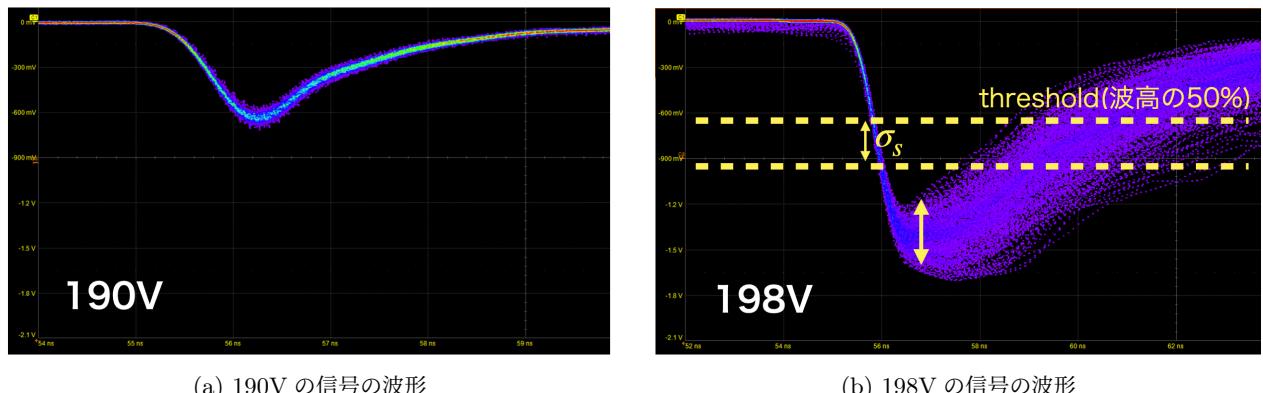


図 4.9: オシロスコープの出力の比較

198 V の波形から波高の揺らぎが大きいことがわかる。そのため、波高の 50 % の時の時間にばらつき σ_s が生じる。

波高のばらつきが実際に時間分解能に影響するのかを調べるために、図 4.10 に 190 V と 198 V の時の到達時間と波高の 2 次元ヒストグラムを示す。190 V のヒストグラムからは到達時間のばらつきは少ないが見えないが、198 V のヒストグラムでは、55.5 ns 以下の領域に多くの点があることがわかった。この点があることによって到達時間の標準偏差が大きくなってしまうと考える。よって、時間分解能を悪化する原因是、電圧を大きくすることによる波高のばらつきの増加によるものであると考える。この信号由来の波高のばらつきの影響が、時間分解能にどのくらい関

わっているのかを調べた。

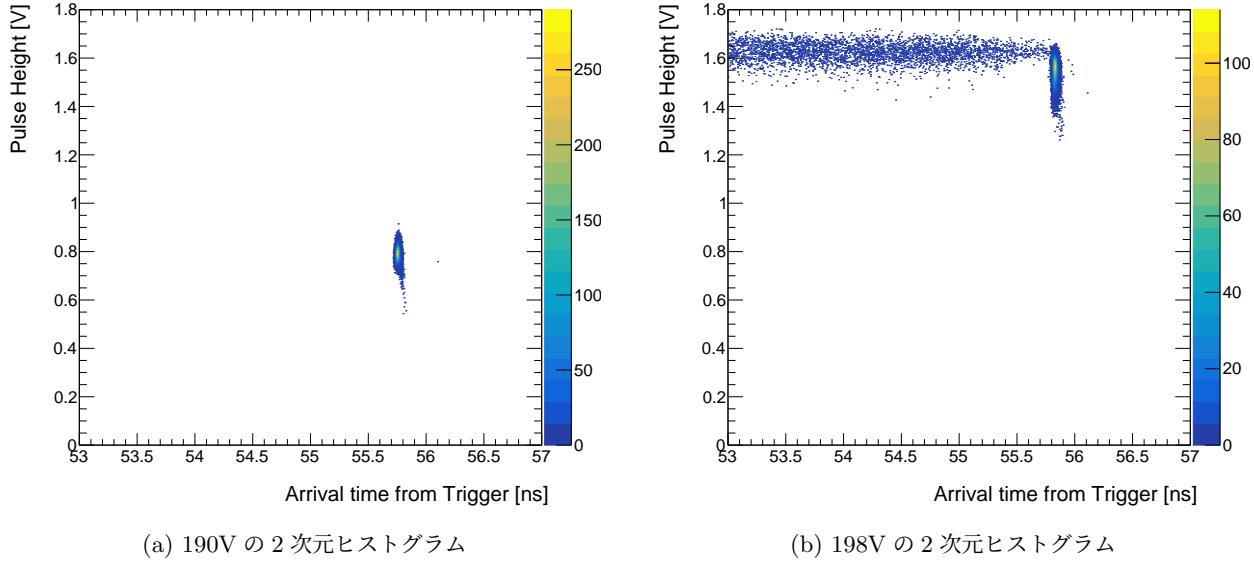


図 4.10: 190V と 198V の時の到達時間と波高の 2 次元ヒストグラム

横軸が到達時間で縦軸が波高、198V のヒストグラムには波高の変化による到達時間のばらつきが生じている

信号由来の波高のばらつきが到達時間にどのくらい影響を与えるのかを評価するために、波高の 50 % の標準偏差を σ_s として、以下の式 4.4.1 のように時間分解能への影響を定義した。増幅率が増加すると、信号由来の波高のばらつきの効果が大きくなるため、この影響を σ_{ph} として議論を進めていく。この式の分子に関しては、信号由来の波高の 50 % の揺らぎ σ_s からノイズ σ_n の影響を除いたものとなっている。それを信号の傾きで割ることによって、x 成分である到達時間の揺らぎ σ_{ph} を求めることで、信号由来の波高のばらつきによる効果を考えてみる。傾きは、ジッター σ_j の際に計算した、波高の 60 % から 40 % 間の立ち上がり時間と波高差を用いて求めたものを使用する。

$$\sigma_{ph} = \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - \sigma_n^2}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - \sigma_n^2}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} \quad (4.4.1)$$

4.4.2 結果

以下の図 4.11 に、波高の揺らぎによる効果 σ_{ph} の電圧依存性を示す。横軸が電圧で縦軸が波高の揺らぎによる効果である。緑点が APD の計算結果を示している。また、PIN に関しては、測定したすべての電圧で、波高の 50 % の揺らぎ σ_s よりもノイズ σ_n の方が大きかったため、過剰ノイズの効果は評価できなかった。これは、PIN の検出器は増幅層がないため、信号の増幅による波高の揺らぎの影響がないからであると考える。

APD の波高の揺らぎの効果は 180 V を超えると現れ、電圧上昇によって徐々に上昇していることがわかる。今回式 4.4.1 で求めた時間分解能を増加させる効果は、図 4.12 を見ると、増幅率に比例して増加していることがわかった。

これまでに測定した時間分解能 σ_t と、測定値から求めたジッター σ_j と波高の揺らぎ σ_{ph} の増幅率依存性を図 4.12 に示す。横軸が増幅率で、縦軸が時間分解能、ジッター、波高の揺らぎによる効果である。青点が時間分解能、赤点がジッター、緑点が波高の揺らぎによる効果を表している。このグラフを見ると、ジッター σ_j は、電圧を上げるほど信号の増幅率が大きくなるため、減少していることがわかる。それに対して、波高の揺らぎによる効果 σ_{ph} は、180V を超えると増加していることがわかる。LGAD 検出器の時間分解能 σ_t が上昇してしまう原因是、波高の揺らぎによる効果の影響がジッターよりも大きくなるからであると考える。

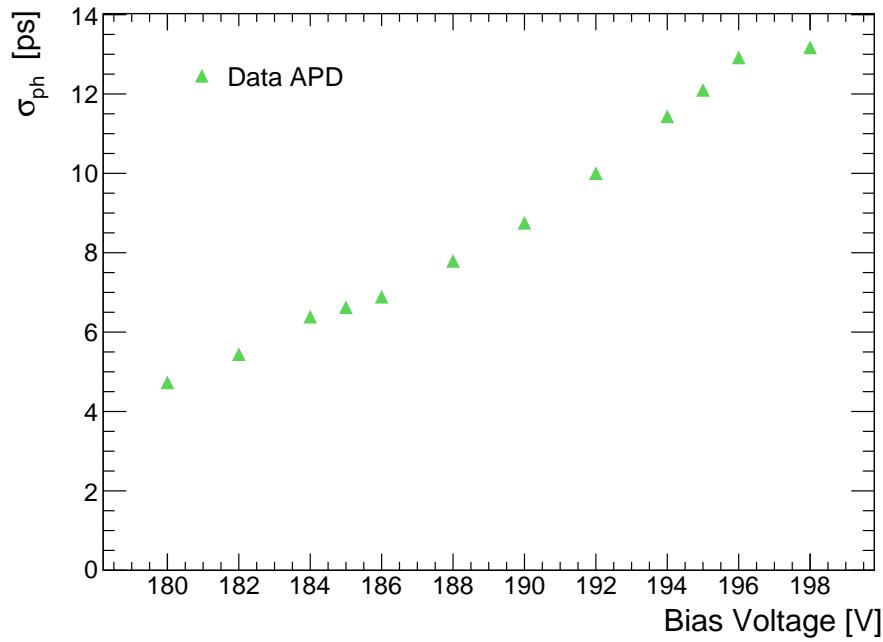


図 4.11: AC-LGAD 検出器の過剰ノイズの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸が過剰ノイズの効果、緑点が APD のデータ点

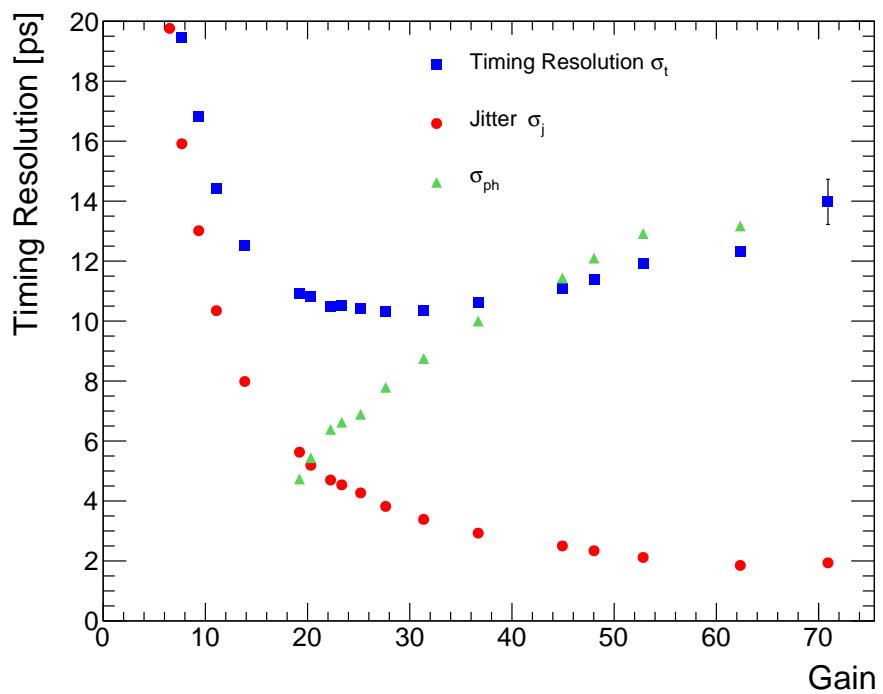


図 4.12: AC-LGAD 検出器の時間分解能、ジッター、波高の揺らぎによる効果の増幅率依存性
横軸が増幅率、縦軸が時間分解能とジッターと波高の揺らぎによる効果
青点が時間分解能 σ_t で赤点がジッター σ_j で緑点が波高の揺らぎによる効果 σ_m のデータ点

第5章

結論

加速器の高輝度化に向けた内部飛跡検出器として、高い位置分解能と時間分解能を併せ持つ AC-LGAD 検出器の開発を行っている。本研究では、浜松ホトニクス社と共同で試作した増幅層がなく増幅機構を持たない P-Intrinsic-N (PIN) ダイオードと、増幅層がある Avalanche-Photo-Diode (APD) を作成し、増幅率と時間分解能についての評価を行った。

まず、赤外線パルスレーザーを用いて、APD と PIN の信号の大きさの電圧依存性を測定した。APD の信号の大きさは、増幅層によって意図的に作り出された高電場によって、指数関数的に増加することがわかった。PIN の信号の大きさは、電圧上昇によって空乏層が広がることで、信号の大きさが大きくなることがわかった。APD と PIN の信号の大きさの比を取ることで、LGAD 検出器の増幅率の電圧依存性を求めた。印加電圧が上昇すると、増幅率が指数関数的に上昇することがわかった。これは、APD の信号の大きさの増加の影響が PIN の信号の大きさに比べて、非常に大きいためであると考える。

APD と PIN の時間分解能の電圧依存性の比較を行った結果、APD は電圧が上昇すると、時間分解能が最小値を取り、それ以上の電圧を印加すると時間分解能が上昇する様子が見られた。PIN は空乏化が生じている電圧では、電圧上昇に伴って時間分解能も小さくなつたが、空乏化が終わると、時間分解能の変化がなくなる様子が見られた。APD と PIN の時間分解能の比較から、検出器に増幅効果があることで時間分解能が 1/5 倍になることがわかった。増幅率と時間分解能の測定結果から、増幅率がおよそ 20~35 倍のときに、最も良い時間分解能およそ 10 ps を得られることがわかった。

立ち上がり時間 t_r 、60 %から 40 %の波高の差 S 、ノイズ σ_n を測定し、式 4.3.1 からジッター σ_j を計算から求めた。赤外線パルスレーザーによる測定では、タイムウォーク σ_{tw} とランダウノイズ σ_L の影響が少ない状況で時間分解能 σ_t を測定することができる。そのため、レーザー測定から求めた時間分解能 σ_t と、計算から求めたジッター σ_j との比較から、時間分解能が悪化する原因について調査した。

APD の立ち上がり時間は、電圧上昇により小さくなることがわかった。これは、電圧上昇による電場の増大によって、電子正孔対の速度が大きくなつたからであると考える。また、運転電圧を超えると、立ち上がり時間が増加してしまつた。これは、電子正孔対が飽和ドリフト速度に達したことに加え、電圧上昇によるノイズが増えたためであると考える。

APD のノイズは約 4 mV で、PIN のノイズは約 2.6 mV で電圧增加に対して変化がなく、ほぼ一定であった。APD のノイズは PIN に比べて約 1.6 倍大きい結果となつた。電子雪崩の影響が大きくなる 200 V では、APD のノイズがおよそ 4.7 mV に上昇することがわかった。

これまでの測定結果から、ジッターの増幅率依存性を調べると、増幅率が大きくなるほど、ジッターは減少することがわかった。これは、立ち上がり時間が早くなること加えて、信号の大きさが増加する影響が非常に大きいからであると考える。また、200 V では電子雪崩によるノイズの増加によって、ジッターは少しだけ増加することがわかつた。レーザー測定から求めた時間分解能と、計算から求めたジッターとの比較から、ジッターのみでは説明できない時間分解能の悪化が見られることがわかつた。以上の結果から、AC-LGAD 検出器の時間分解能は、タイムウォーク σ_{tw} 、ジッター σ_j 、ランダウノイズ σ_L に加わる要因があり、特に増幅率が大きい時にその効果が顕著であることがわかつた。

時間分解能が悪化した時の波形は、波高の揺らぎが大きくなつてゐた。そのため、時間分解能が増加する要因とし

て、信号由来の波高の揺らぎ σ_s による効果があるのではないかと考え、その効果の評価を進めた。この効果を、式 2.4.4 を仮定して評価したところ、増幅率がおよそ 20 倍以上になると、増幅率に比例して波高の揺らぎによる効果が大きくなる様子が見られた。LGAD 検出器の時間分解能 σ_t が上昇してしまう原因は、検出器由来の波高の揺らぎによる効果の影響ではないかと考える。

第6章

謝辞

感謝申し上げます。

2024/02/01 堀越一生

参考文献

- [1] “Geneva, switzerland-september 2014. components of the cern particle accelerator located underground.” (Accessed on 01/23/2024). [Online]. Available: <https://stock.adobe.com/jp/images/geneva-switzerland-september-2014-components-of-the-cern-particle-accelerator-located-underground/397291550>
- [2] U. of Liverpool, “Liverpool physicist to lead international programme,” (Accessed on 01/23/2024). [Online]. Available: <https://news.liverpool.ac.uk/2011/03/14/liverpool-physicist-to-lead-international-programme/>
- [3] “Investigating the impact of 4D Tracking in ATLAS Beyond Run 4,” CERN, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2870326>
- [4] X. e. a. Yang, “Layout and performance of hpk prototype lgad sensors for the high-granularity timing detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 980, p. 164379, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2020.164379>
- [5] 北. 彩友海, “高位置・時間分解能を併せ持つ半導体飛跡検出器 AC-LGAD の電極細密化に向けた研究開発,” 修士論文, 筑波大学, 2023.
- [6] S. Kita, K. Nakamura, T. Imamura, I. Goya, and K. Hara, “Development of AC-LGAD detector with finer pitch electrodes for high energy physics experiments,” 2023.
- [7] S. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. 産業図書株式会社, 2012.
- [8] M. R.J., “Multiplication noise in uniform avalanche diodes,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-13, pp. 164–168, 1966. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1363388845924852224>
- [9] N. P. KATANA. [Online]. Available: https://www.japanlaser.co.jp/nkt-photonics_onefive-katana/