

卒業論文 2024 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

筑波大学理群物理学類
素粒子実験研究室
物理学類 4 年
学籍番号 202012130

堀越 一生

指導教員 廣瀬茂輝

目次

第 1 章 背景	3
1.1 新粒子の探索	3
1.2 大型加速器実験	3
1.3 内部飛跡検出器	4
1.4 LGAD 検出器	5
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	7
2.3 鮎和ドリフト速度	8
2.4 時間分解能	9
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	過剰ノイズ	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]	4
1.2	HL-LHC の衝突点の様子 [2]	4
1.3	位置情報と時間情報による飛跡の再構成の様子	5
1.4	LGAD 検出器の構造	5
1.5	レーザーで測定した時間分解能（ジッター） [4]	6
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バンド図 [6]	8
2.3	Si 中のドリフト速度の電界依存性 [6]	8
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	過剰ノイズ係数の增幅率依存性 [7]	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	オシロスコープの出力の比較	28
4.9	190V と 198V の時の到達時間と波高の 2 次元ヒストグラム	28
4.10	AC-LGAD 検出器の過剰ノイズの電圧依存性	29
4.11	AC-LGAD 検出器の時間分解能、ジッター、過剰ノイズの増幅率依存性	30

表目次

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

卒業論文 2024 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、加速器実験の高輝度化と高エネルギー化が計画されている。高輝度化によって 1 バンチあたりの粒子の衝突数が増加し、生成される粒子の数が大きくなる。生成された粒子の飛跡を測定することができる内部飛跡検出器は、電極サイズを細かくすることで高い位置分解能を実現することができる。この位置分解能に加えて、新たに粒子の時間情報を取得することで、高輝度化による数多の粒子の飛跡を再構成することが可能になる。

Low-Gain-Avalanche-Diode(LGAD) 検出器は、 n^+ -in- p 型シリコン半導体検出器で、 n^+ 層の直下に増幅層と呼ばれる不純物濃度が高い 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・加速されることで、立ち上がりが速く、増幅された信号を出力することができる。そのため LGAD 検出器は、高い時間分解能を得ることが可能な半導体検出器である。

信号の不感領域をなくすために開発された AC-LGAD 検出器は、一様に増幅層が置かれ、酸化膜を介して電極に信号を誘起できる構造になっている。不純物濃度と酸化膜の厚さを最適化することで、クロストークが減少した AC-LGAD 検出器が開発され、30 ps の時間分解能が実現されている。AC-LGAD 検出器は、印加電圧を大きくすることで、時間分解能を小さくすることができる。この電圧が LGAD 検出器の運転電圧である。運転電圧を超えると、時間分解能が増加してしまうことがわかっている。

本研究では、AC-LGAD 検出器の増幅率と時間分解能を電圧ごとに測定することで、時間測定に最適な増幅率について調べた。増幅率を調べるために、増幅層がある Avalanche-Photo-Diode (APD) と、増幅層の無い P-Intrinsic-N (PIN) ダイオードの AC-LGAD 検出器を作成した。本実験では、赤外線パルスレーザーを LGAD 検出器に入射して、信号の大きさと時間分解能を測定するため、レーザー窓を LGAD 検出器の表面保護のための酸化膜と、表面と裏面のアルミニウムを除去することによって作成した。APD と PIN の信号の大きさの比を取ることで、LGAD 検出器の増幅率を求めた。測定結果から、時間測定な増幅率が 30.6 ± 3.7 倍であることがわかった。

時間分解能を構成する要素を詳細に測定することで、運転電圧を超えると時間分解能が上昇する原因について調べた。LGAD 検出器の時間分解能は、信号の大きさの違いによる閾値を超える時間のばらつきの影響（タイムウォーク σ_{tw} ）、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 つが大きく影響すると考えられている。赤外線パルスレーザーを使用することで、タイムウォーク、ランダウノイズの影響がほとんどない時間分解能の測定ができる。また、以下の式からジッターを求めることができる。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \left| \frac{t_r}{\sigma_n} \right|$$

LGAD 検出器の信号の立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S 、ノイズ σ_n の測定を行い、求めたジッターと測定した時間分解能を比較することにより、電圧上昇による時間分解能の増加の原因がジッターでないことがわかった。

信号由来の波高の揺らぎによる時間分解能の増加の効果を評価し、この影響が時間分解能が悪化する要因であることがわかった。増幅率が上昇することによってこの影響が大きくなる点と、増幅層がない PIN ではこの影響が見られなかった点から、増幅層がある APD 特有の、電子雪崩によって生成される電子正孔対による電流変化による影響（過剰ノイズ σ_m ）であると考える。

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。

反応確率が小さい事象や、超対称性粒子のような質量が非常に重い粒子を作り出すためには、さらに多くのデータ量と高エネルギーの粒子の衝突が必要である。そのため、LHC はエネルギーが 14TeV 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されており、加速器による粒子の衝突頻度の増加とエネルギーの増加に伴って、数多くの衝突点から生じる飛跡を検出するために、内部飛跡検出器の改良が必要になる。

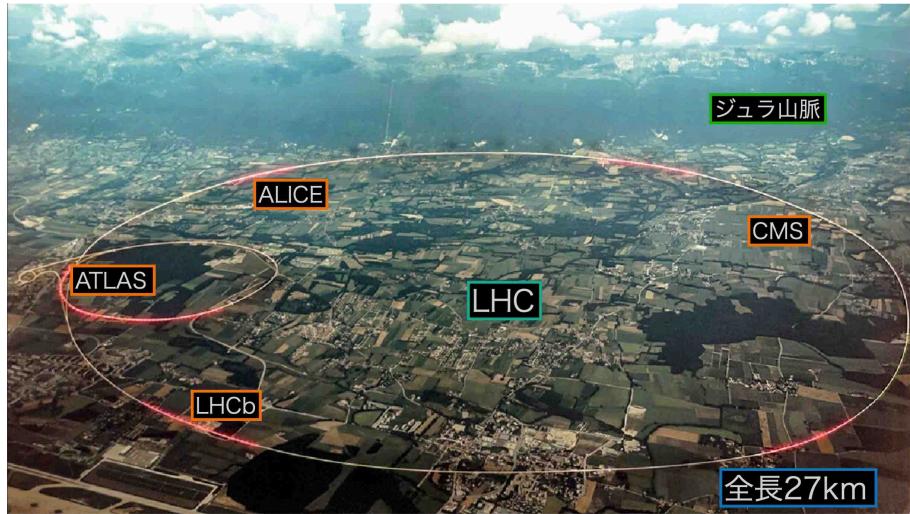


図 1.1: Large Hadron Colider (LHC) の鳥瞰図 [1]

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。

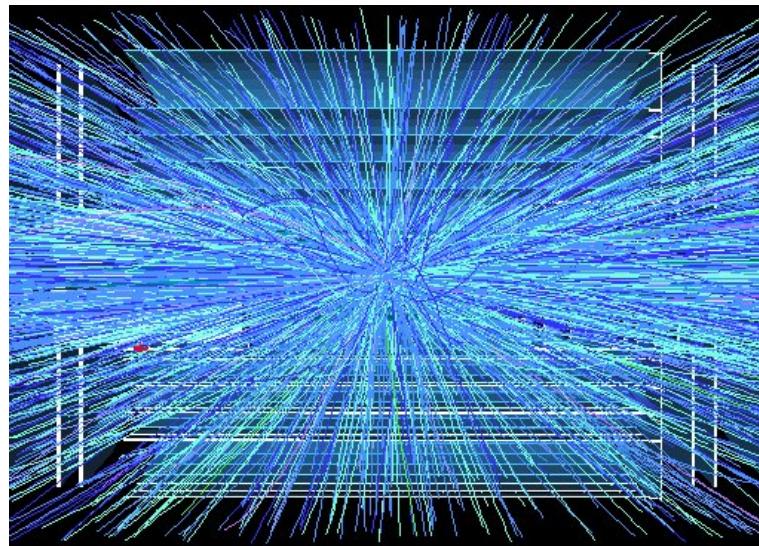


図 1.2: HL-LHC の衝突点の様子 [2]

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必要がある。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 回の衝突が起きるので、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、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のピクセル検出器を使用する。検出器のピクセル数を細かくすることで、多数の衝突から生成される粒子の飛跡より細かく測定することができる。また、位置情報に加えて時間情報を取得することで、4次元的に粒子の飛跡を再構成することも可能になる。位置情報と時間情報を用いて飛跡を再構成した様子を図 1.3 に示す。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。左の図が時間情報のない場合で、右の図が



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。

時間情報がある場合の様子である。30ps の時間分解能を満たすと、光速の粒子の飛跡の情報を 1 cm 単位で区別することが可能となる。そのため、加速器の高輝度化に向けて、30ps の時間分解能と $\mathcal{O}(10)\mu\text{m}$ を併せ持つ内部飛跡検出器の開発が新粒子や新物理の発見に大きく貢献できる。

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 1.4 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 [3] を実現している半導体検出器である。

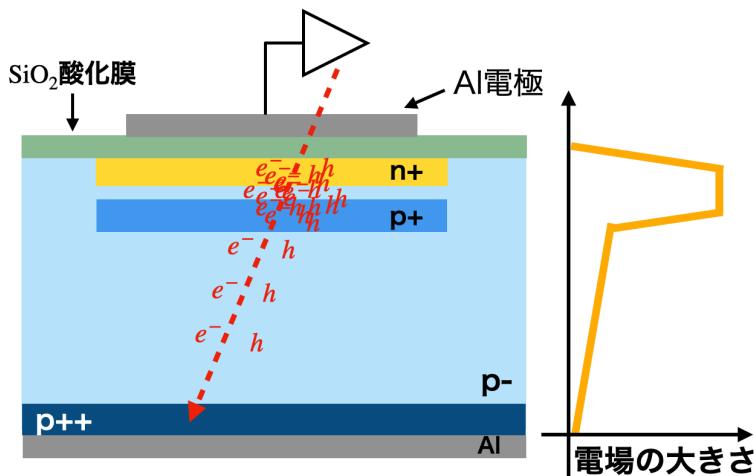


図 1.4: LGAD 検出器の構造

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 [4] によると、タイムウォーク σ_{tw} 、ランダウノイズ σ_L の影響がほとんど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 1.5 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 180V 付近で時間分解能が最も良く、その前後の電圧で 10V 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、時間分解能が大きくなることがこの研究からわかっている。ジッター σ_j は以下の 式 4.3.1 のように表すことができ、時間分解能が大きくなった原因が、熱ノイズの電子雪崩による影響で σ_n が増加したためであるとされている。

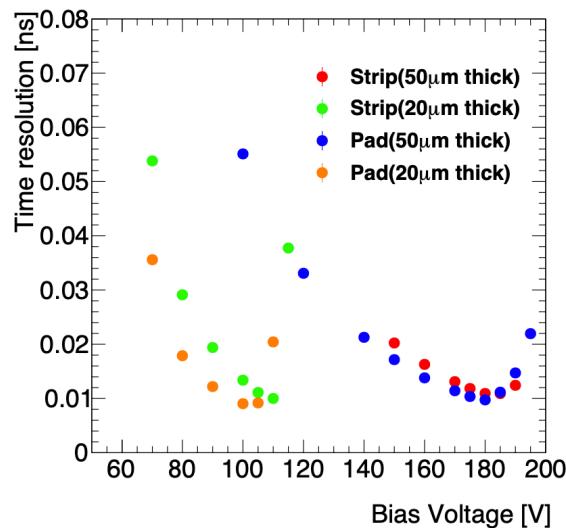


図 1.5: レーザーで測定した時間分解能（ジッター） [4]

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。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \frac{t_r}{\left| \frac{S}{\sigma_n} \right|} \quad (1.4.2)$$

時間分解能が良い電圧帯が存在するという先行研究 [4] から、本研究では、時間分解能が良い電圧帯を調べ、その領域の増幅率を測定することで、LGAD 検出器の時間測定に最適な増幅率を明らかにする。この研究は、LGAD 検出器の ASIC を開発における、アンプの増幅率を決定する際に大きく貢献できると考える。また、LGAD 検出器の信号の立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S 、ノイズ σ_n の測定を行い、式 4.3.1 からジッターを求めることで時間分解能の詳細な構成要素について調べる。また、運転電圧を超える電圧で、時間分解能が増加する原因や電圧変化による時間分解能の振る舞いについて議論する。

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 n^+ -in- p 型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。酸化膜の下に n^+ 層があり、さらにその数 μm 下に、バルク層と比べて不純物濃度が高い p^+ 層が設置された構造となっている。この高濃度の p^+ 層によって、意図的に高電場領域を作り出し、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（アバランシェ）によって、増幅された信号を出すことができる。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が実現できる。

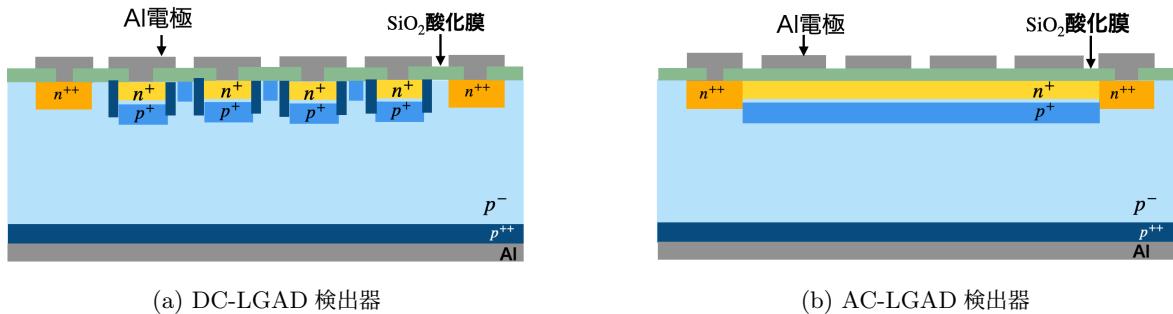


図 2.1: DC-LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器の構造

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、電極間に信号が確認できない不感領域が存在するため、電極の細密化ができない問題があった。増幅層を一様に設置することで、この問題を解決し、信号の不感領域を無くした検出器が 図 2.1b の AC-LGAD 検出器である。増幅層を一様にしたこと、隣の電極に電荷が誘起されてしまうクロストークが生じる問題があったが、不純物濃度や酸化膜の厚さを最適化することで、クロストークが少ない AC-LGAD 検出器の作成されている [5]。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。

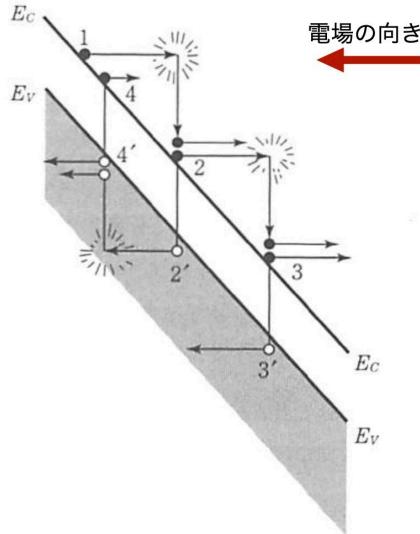


図 2.2: 電子雪崩におけるエネルギー-band 図 [6]
電子や正孔が衝突して電子正孔対を生成する現象が繰り返し生じる。

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可能である。

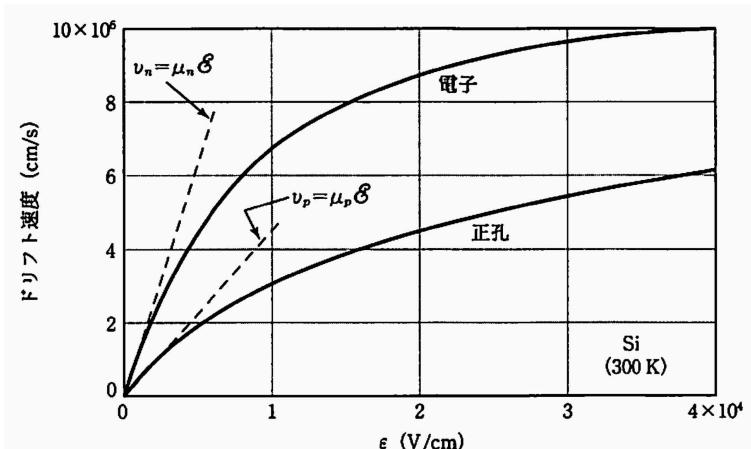


図 2.3: Si 中のドリフト速度の電界依存性 [6]、横軸が電界の強さで縦軸がドリフト速度
電界が強くなるとドリフト速度は増加するが、その増加割合は徐々に小さくなり飽和ドリフト速度になる。

2.4 時間分解能

時間分解能は検出器がある事象の時間的变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。

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、閾値を各々の信号の波高の 50 % とすることで、この影響を小さくすることができる。

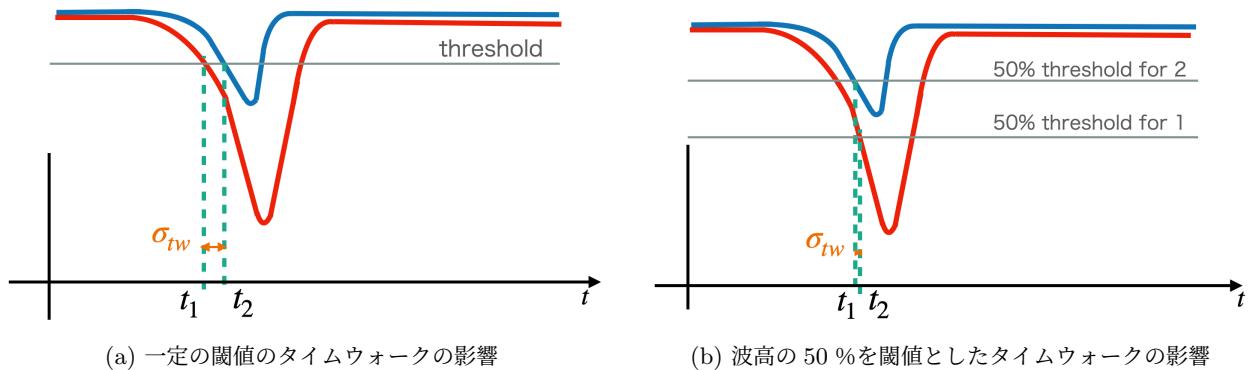


図 2.4: タイムウォークの影響

(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することで、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、増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。

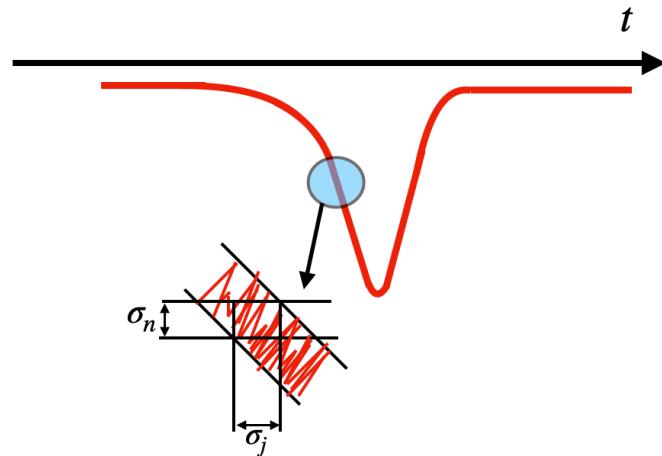


図 2.5: ジッターの影響
ノイズにより到達時間にばらつきが生じる。

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を呼ぶ。本実験の赤外線パルスレーザーでは、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ので、ランダウノイズの影響を無視することができる。

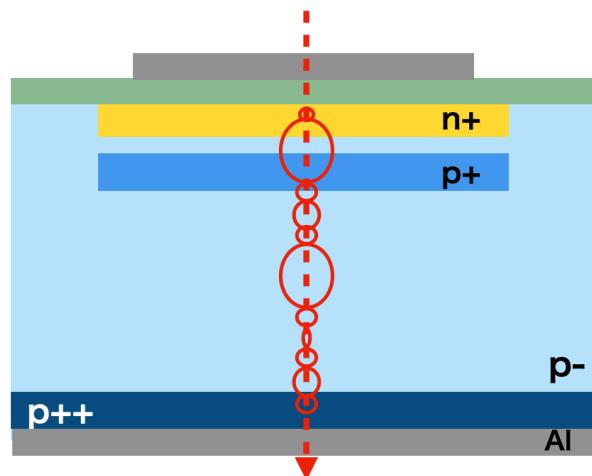


図 2.6: ランダウノイズの影響
赤丸が荷電粒子が落とすエネルギーの大きさを示している。

2.4.4 過剰ノイズ

增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 [7]。 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 [7]。 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。

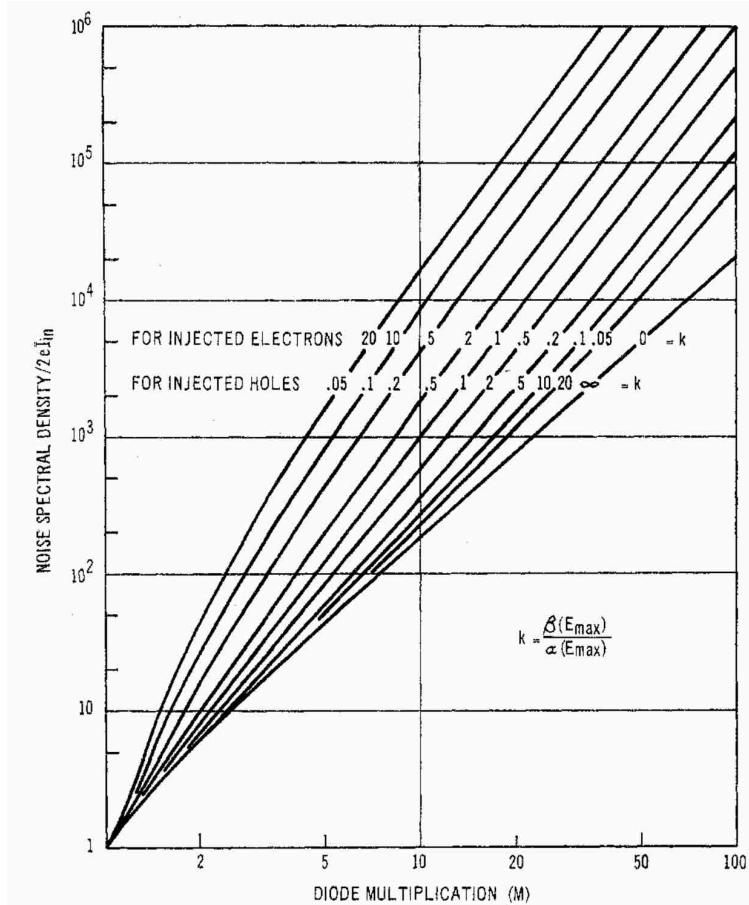


図 2.7: 過剰ノイズ係数の増幅率依存性 [7]

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

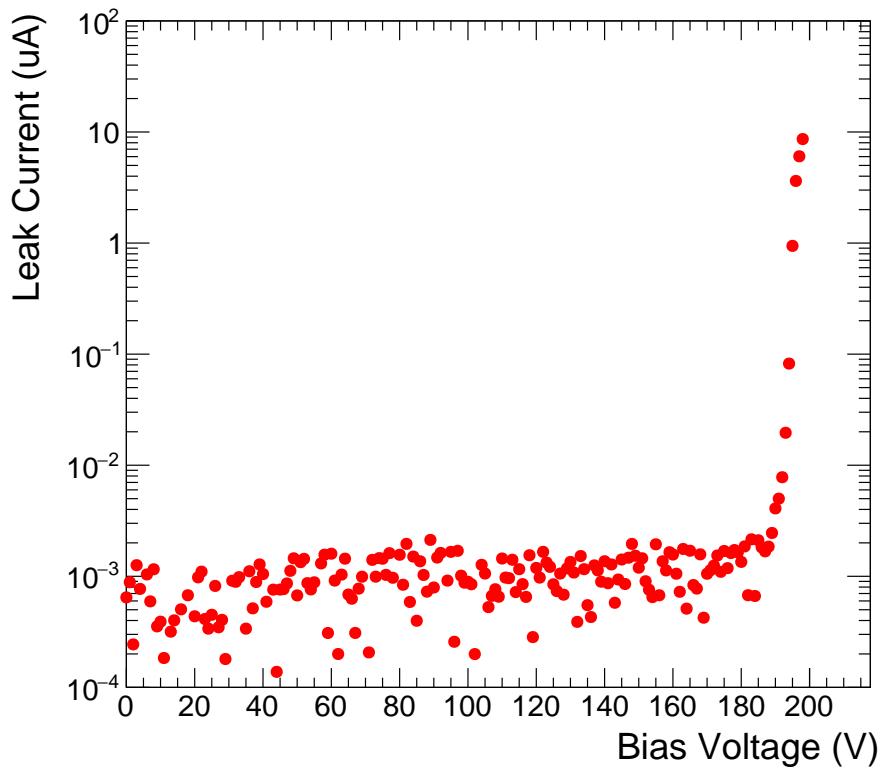


図 2.8: Pad 型の AC-LGAD 検出器の電流電圧特性

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、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 増加すると降伏電圧が 1.1 V 増える [4]。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、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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、増幅層が有る Avalanche Photo Diode (APD) と増幅層の無い P Intrinsic N (PIN) ダイオードを作成した。増幅層以外の構造は APD と PIN ともに同じになっている。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。p 型半導体を高濃度でドープした p^{++} 層が増幅層である。増幅層以外は APD と PIN ともに同じ構造となっている。APD と PIN の信号の大きさの比をとることで、増幅層による信号の増幅率を求めることができる。

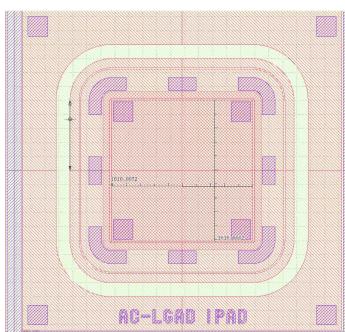


図 3.1: LGAD 検出器の表面図

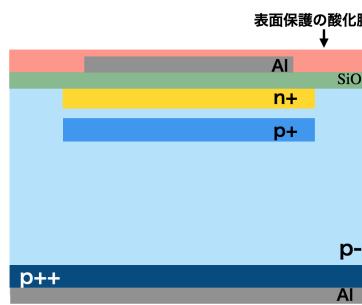


図 3.2: APD の LGAD 検出器
増幅層有り

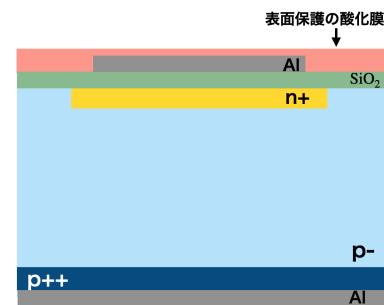


図 3.3: PIN の LGAD 検出器
増幅層無し

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。

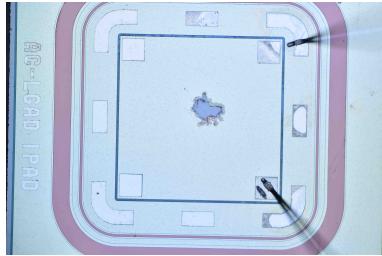


図 3.4: PIN の表面の剥離後の様子

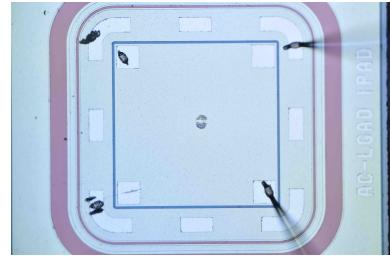


図 3.5: APD の表面の剥離後の様子

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 [8] 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。

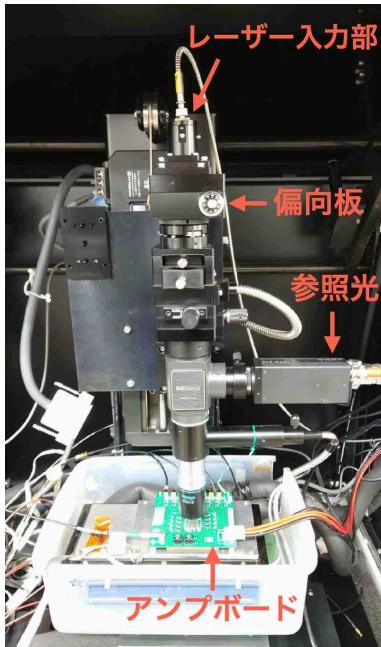


図 3.6: 赤外線パルスレーザー本体

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 mW at 80 MHz
繰り返し周波数	20 – 80 MHz
スペクトルバンド幅 FWHM	< 0.4 nm
振幅ノイズ	< 4 % rms (10 時間)
タイミングジッタ	< 10 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増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、1 chPad 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、エポキシガラス纖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 6 V の電圧をかけた。



図 3.7: KEK16 チャンネルアンプボード

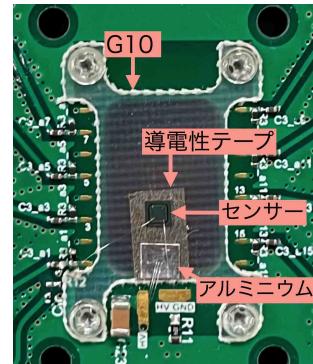


図 3.8: アンプボードにセンサーを設置した様子

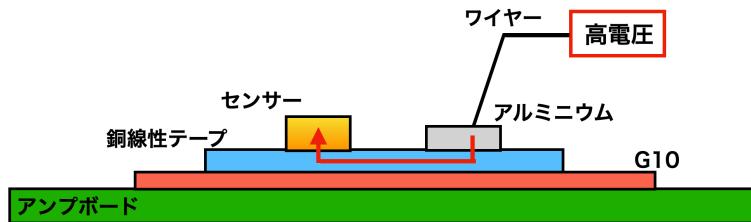


図 3.9: センサーに高電圧を印加させる様子
アルミニウムから導電性テープを通ってセンサーに電圧が印加される

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。

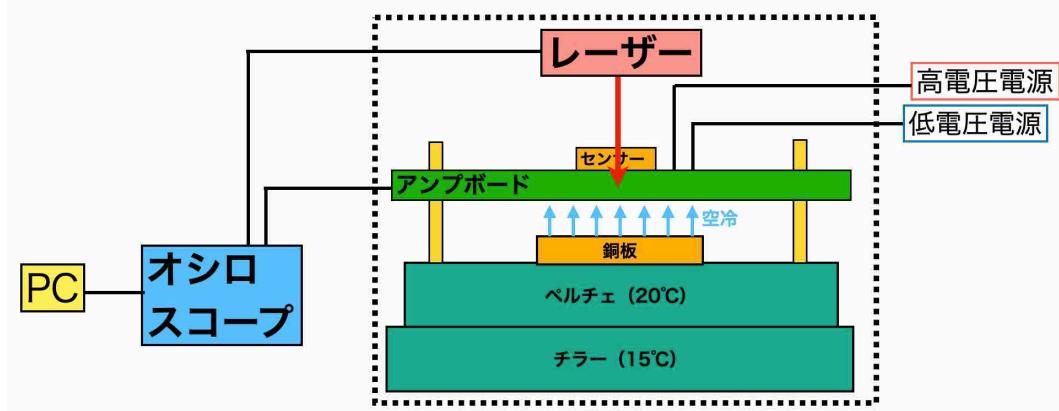


図 3.10: レーザー測定のセットアップ

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。

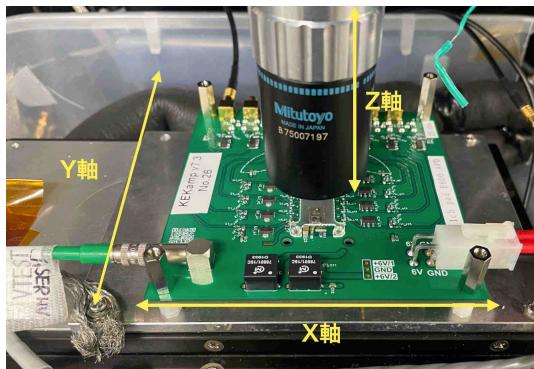


図 3.11: レーザーの入射位置と焦点の調節
xyz 軸を動かして、位置と焦点を調節できる。

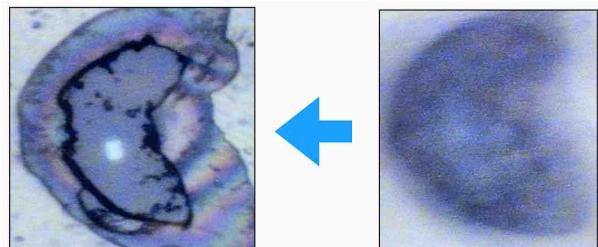


図 3.12: レーザーの焦点の様子
右が焦点を合わせる前、左が焦点を合わせた後

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、2Vステップで暗電流が100μA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1.1V増える[4]。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での降伏電圧が198Vで恒温層内での降伏電圧が186V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12V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。

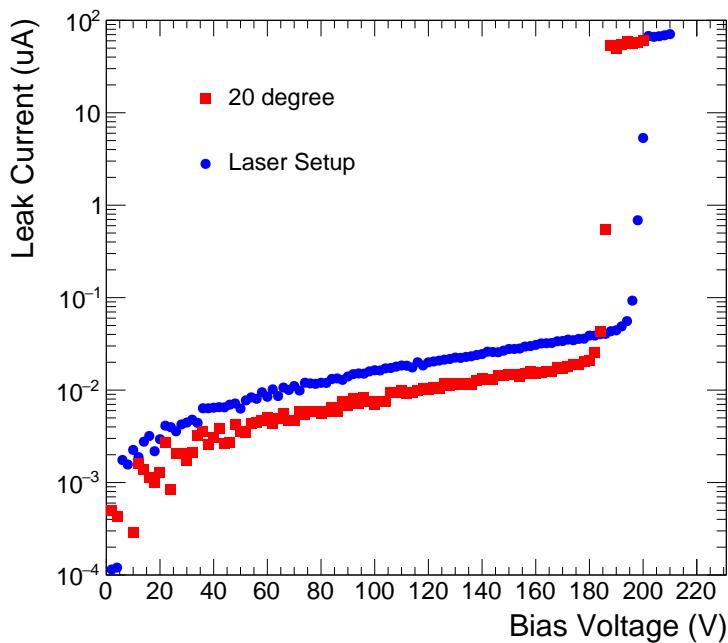


図3.13: AC-LGAD検出器の電流電圧特性

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1MHzでthresholdは1.5Vに設定した。トリガー信号から約55ns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、0V付近でふらつく。そのため、0mV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を得た。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70Vから見える。そのため、APDは70Vから200Vの範囲を測定した。PINに関しては、0Vから200Vの範囲を測定した。また、時間分解能が良いと予想される180Vから200Vの範囲については、細かい電圧ステップで測定を行った。

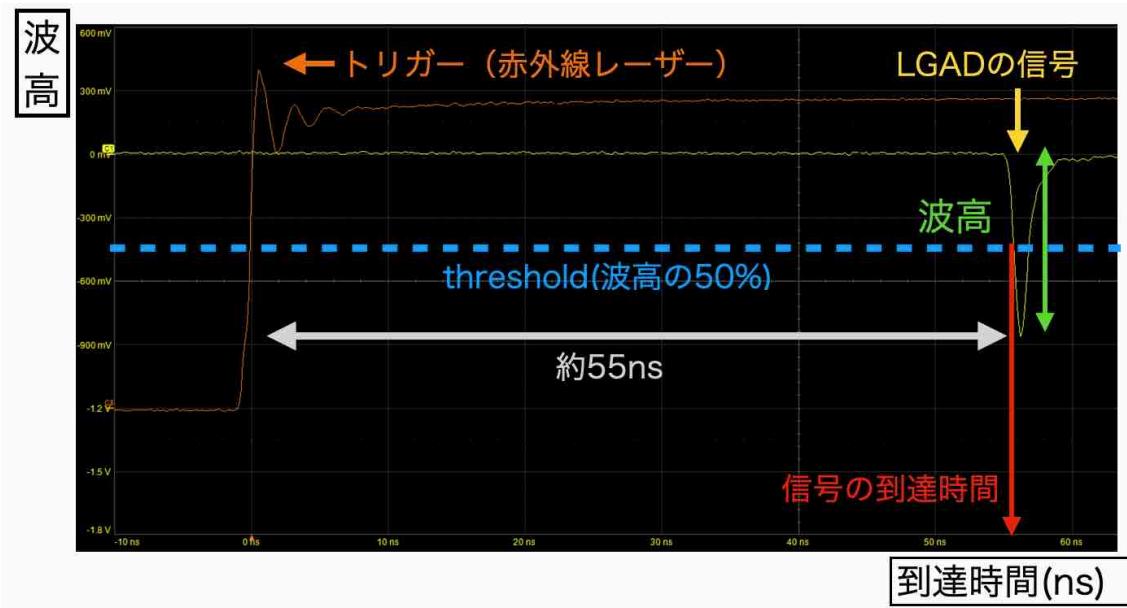


図 3.14: オシロスコープの出力とデータの取得方法

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グラムで、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グラムである。時間分解能は到達時間のヒストグラムの標準偏差とした。標準偏差は到達時間のヒストグラムを、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グラムの最頻値とした。最頻値は波高のヒストグラムを、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。

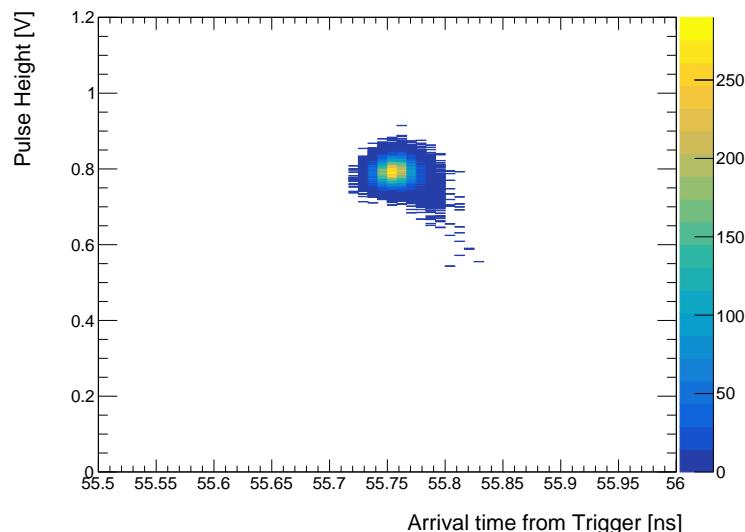


図 3.15: 波高と到達時間の 2 次元ヒストグラム

x 軸が到達時間で y 軸が波高

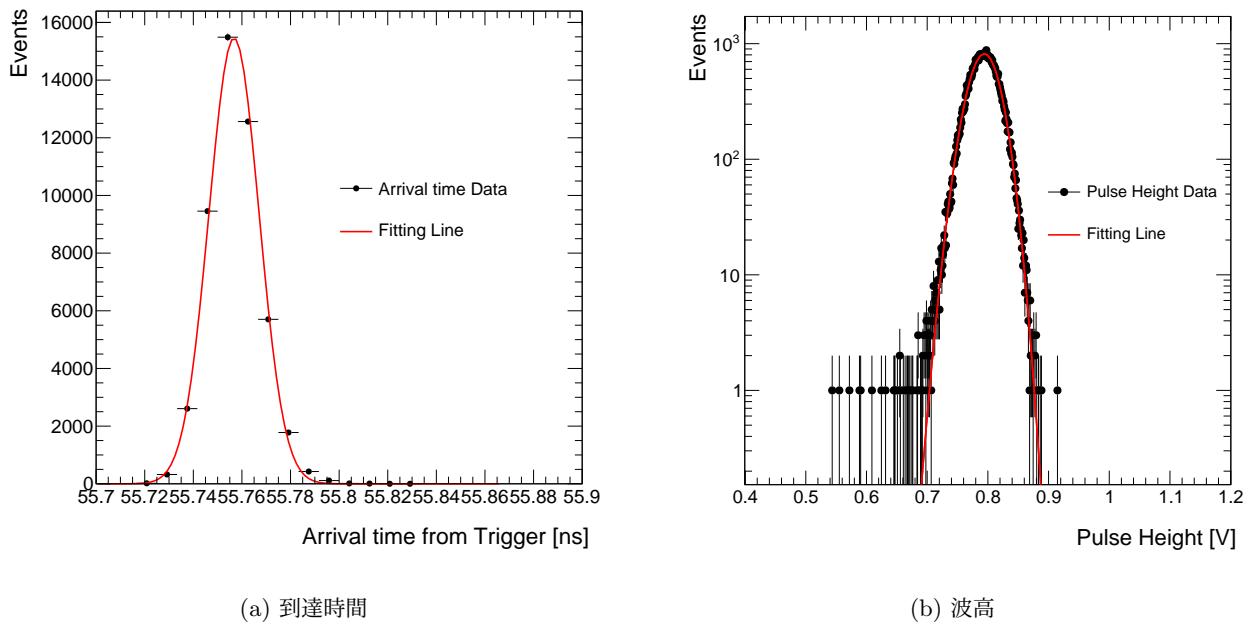


図 3.16: (a) が x 軸を射影した到達時間のヒストグラムの標準偏差を時間分解能とした。

(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

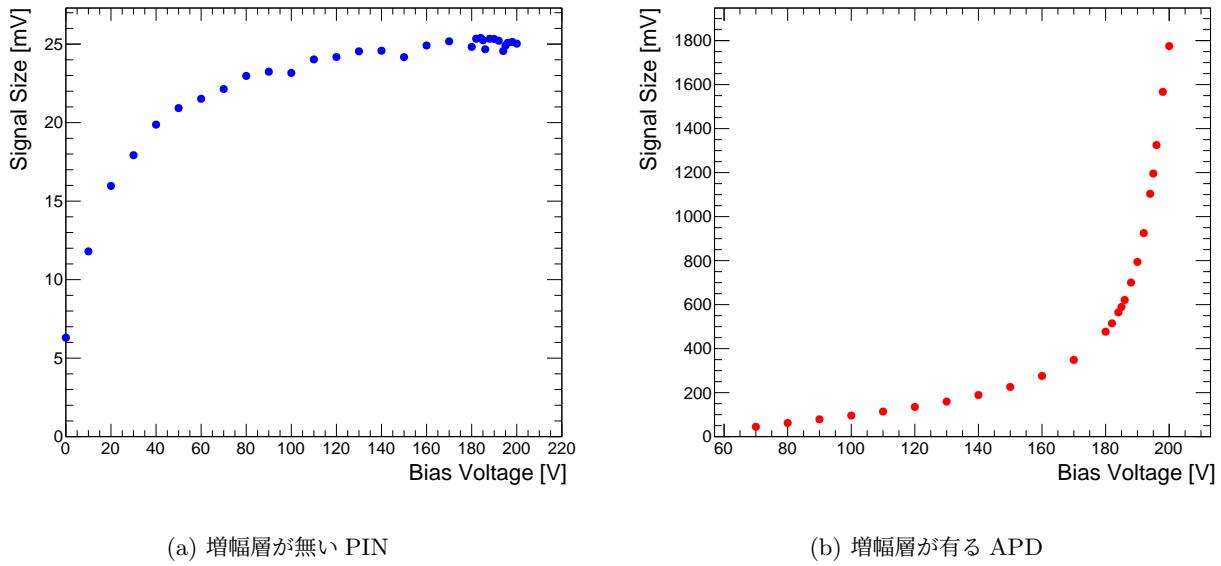
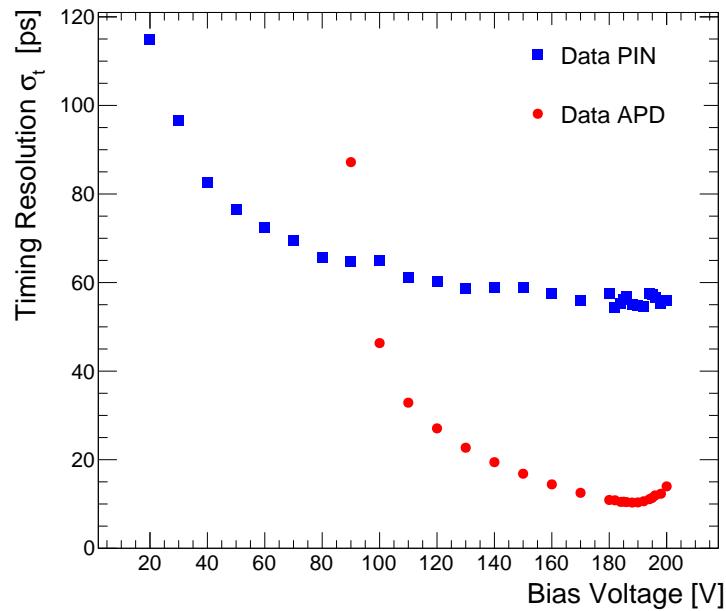


図 3.17: AC-LGAD 検出器の信号の大きさの電圧依存性

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 の時間分解能は電圧を上げることで向上するが、188 V で 10.32 ± 0.03 ps が最小値で、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。時間分解能の最小値の統計誤差の範囲内に、時間分解能がある時の電圧を、本実験の測定系における AC-LGAD 検出器の運転電圧とすると、188 V と 190 V がその範囲内にあることがわかった。180 V から 200 V の範囲は 2 V ずつ測定を行なっていたので、運転電圧は 1 V の誤差があると考えると、運転電圧は 189 ± 2 V であった。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、増幅層を入れることで、AC-LGAD 検出器の時間分解能が 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。フィット結果を用いて、運転電圧 189 ± 2 V の範囲の増幅率を求めた。以上の結果より、AC-LGAD 検出器の時間測定に最適な増幅率は 30.6 ± 3.7 倍であると評価できる。

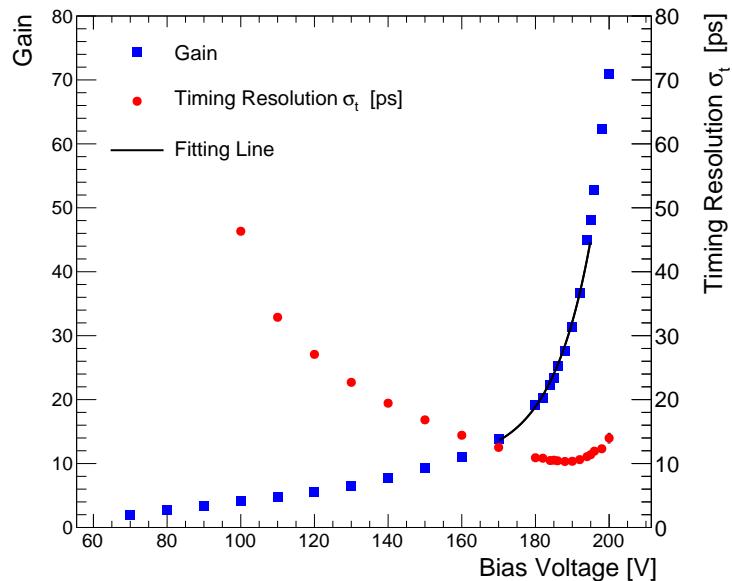


図 3.19: AC-LGAD 検出器の増幅率と時間分解能の電圧依存性

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 の影響がほとんどない荷電粒子の入射を模擬することができる。そのため、ジッター σ_j のみによってLGAD検出器の時間分解能 σ_t を評価することができる。本章では、式4.3.1にある、ジッターを構成する要素の信号の立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S 、ノイズ σ_n をそれぞれ測定することで、LGAD検出器の時間分解能 σ_t を詳しく評価する。

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

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。

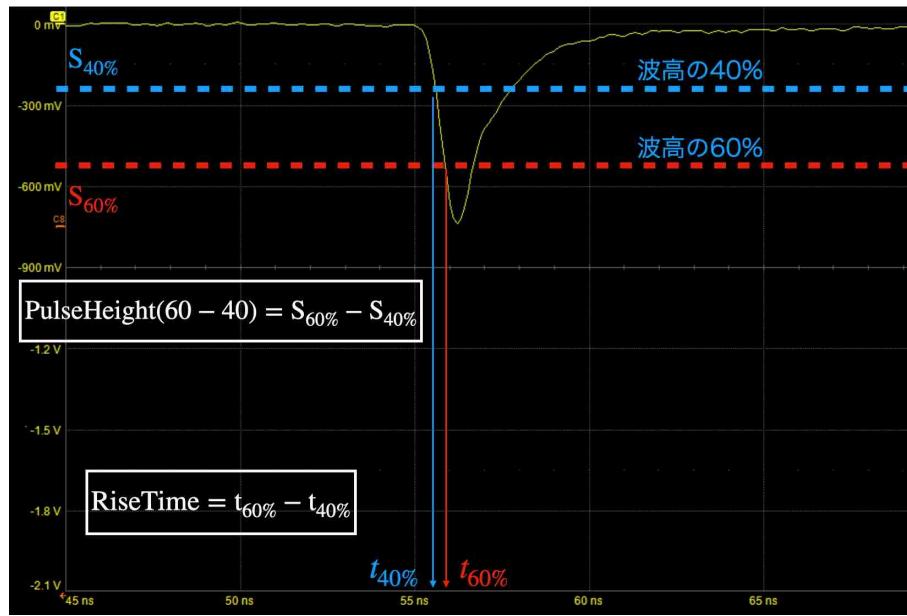


図 4.1: 立ち上がり時間の解析方法

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。

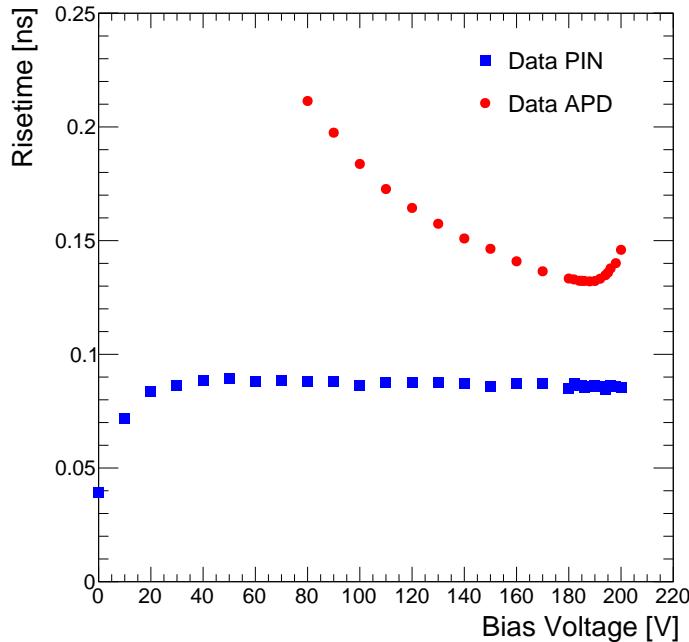
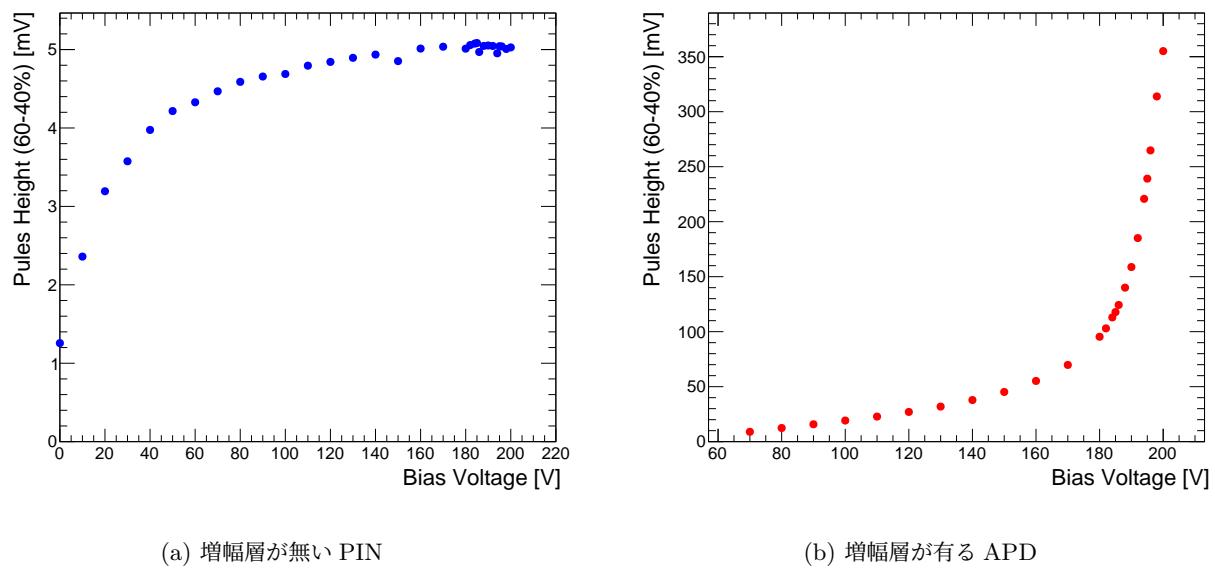


図 4.2: AC-LGAD 検出器の立ち上がり時間の電圧依存性

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

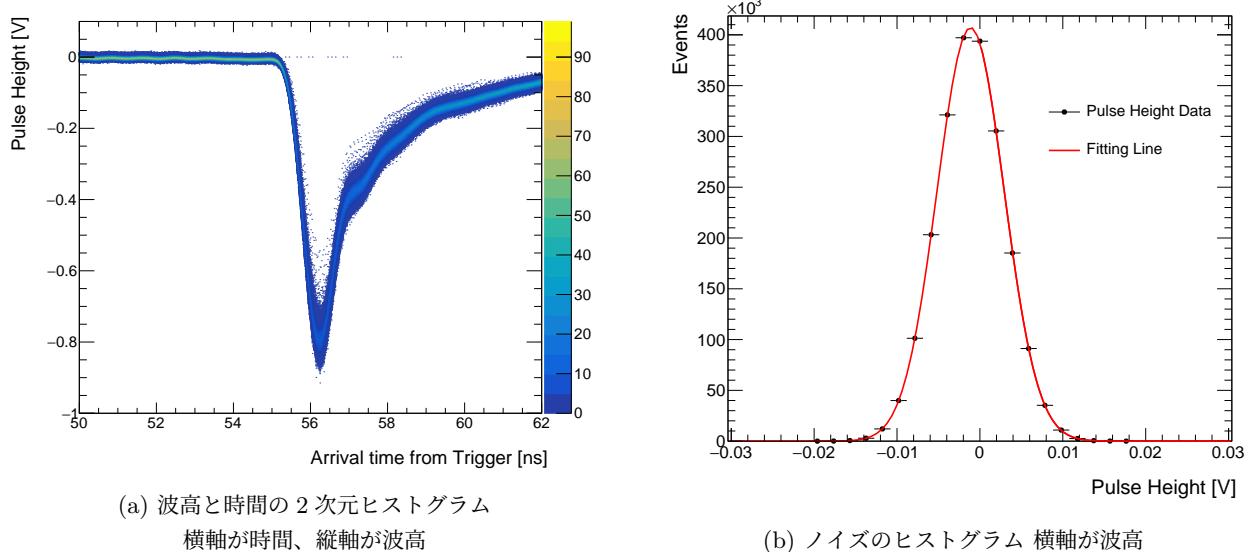
図 4.3: AC-LGAD 検出器の波高の 60 %から 40 %の差の電圧依存性

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、增幅層を入れることで、ノイズについて悪化することがわかった。また、200V では APD のノイズが急激に上昇し、 4.71 ± 0.01 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、ノイズが増えるのではないかと考える。

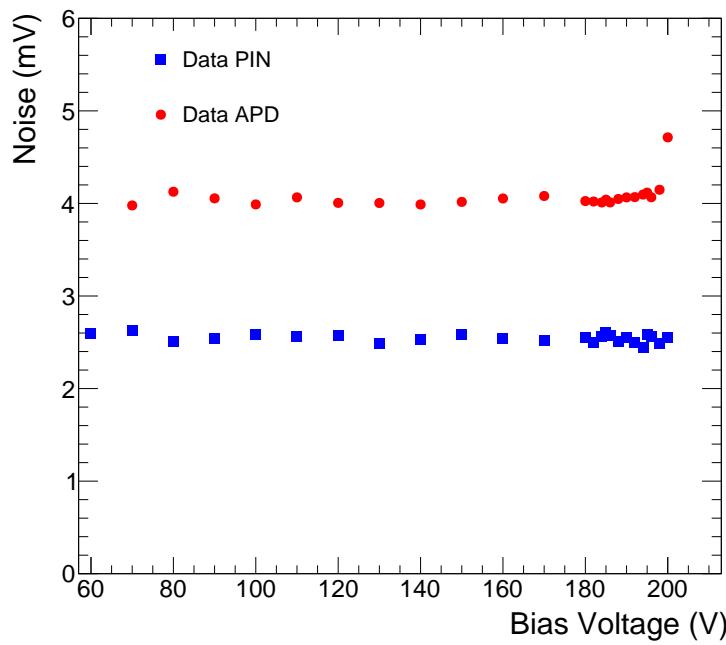


図 4.5: AC-LGAD 検出器のノイズの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸がノイズ、青点が PIN で赤点が APD の測定値

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 1.937 ± 0.001 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ため、ジッターがわずかではあるが増加した。

さらに、図 4.7 に、APD のジッター σ_j と時間分解能 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、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る。時間分解能は増幅率が大きくなると、27 倍の点で最小値をとり、それ以上に

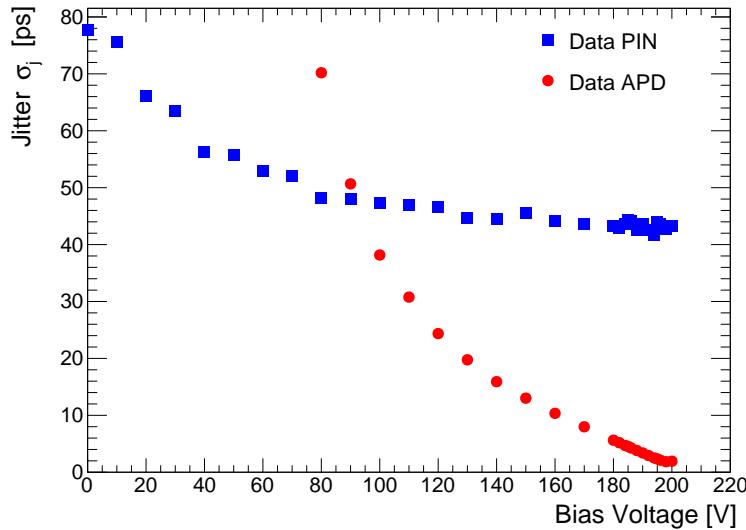


図 4.6: AC-LGAD 検出器のジッターの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸がジッター、赤点が APD で青点が PIN の測定点

なると時間分解能は増加した。ジッターと時間分解能は一致しないことがわかった。。LGAD 検出器の時間分解能が悪化する原因是、增幅率と電圧が大きくなると、ノイズが上昇するからであると考えられていた。しかし、実際にはノイズの悪化よりも、信号の大きさの増加が支配的であるため、ジッターは増幅率が大きくなると減少する。そのため、ノイズの増加が時間分解能の悪化の原因ではないことがわかった。レーザーを用いた測定では、タイムウォーク σ_{tw} とランダウノイズ σ_L の影響がほとんどないため、新たな時間分解能を構成する要素があると考える。そのため、LGAD 検出器の時間分解能を構成する式 4.0.1 に、ジッター、タイムウォーク、ランダウノイズ以外の新たな要素を追加する必要がある。

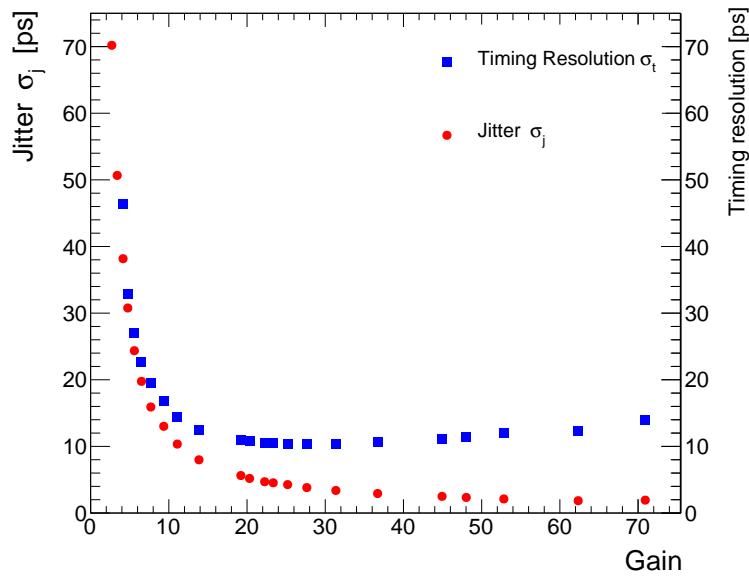
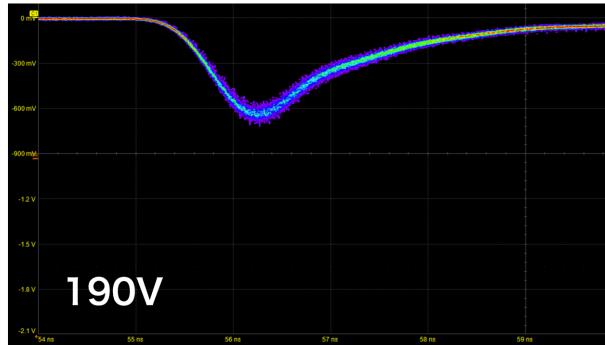


図 4.7: AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターの増幅率依存性
横軸が増幅率で縦軸がジッターと時間分解能、青点が時間分解能で赤点がジッターのデータ点

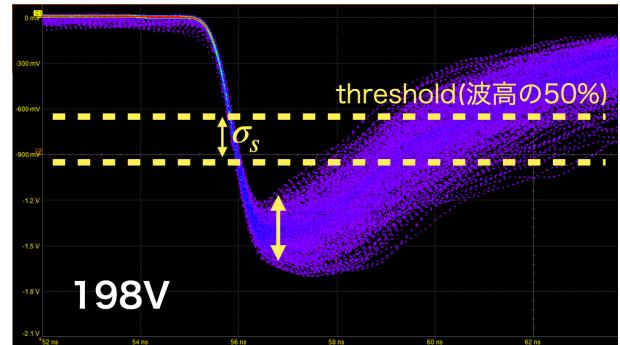
4.4 過剰ノイズ

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4.8aに190 Vの波形、図4.8b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、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。



(a) 190V の信号の波形

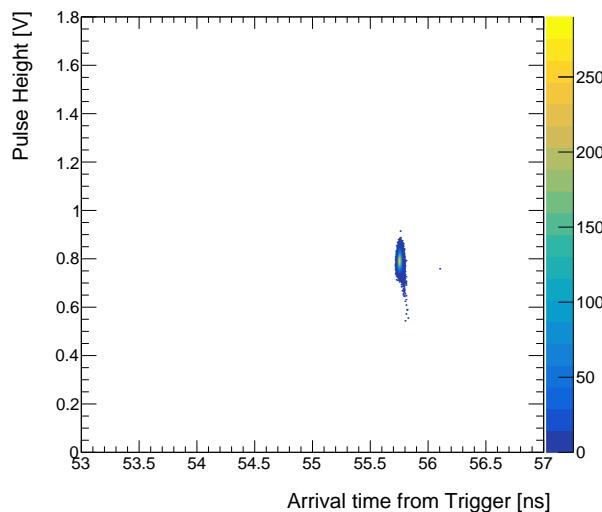


(b) 198V の信号の波形

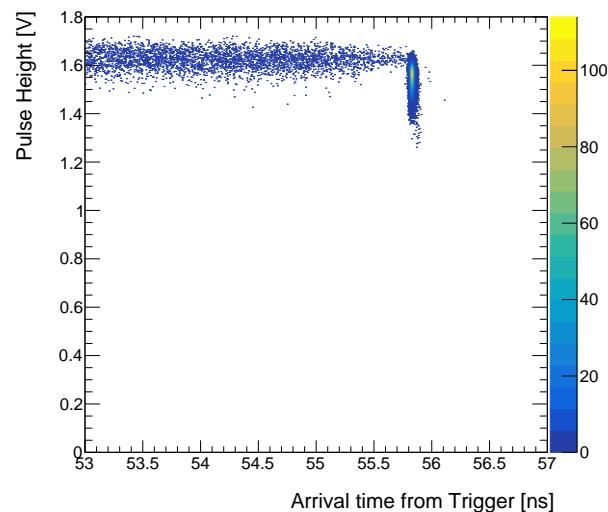
図4.8: オシロスコープの出力の比較

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4.9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。



(a) 190V の 2 次元ヒストグラム



(b) 198V の 2 次元ヒストグラム

図4.9: 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、第 2 章で解説した過剰ノイズ σ_m の効果によるものであると考える。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_m 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評価できるようにした。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。

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

4.4.2 結果

以下の図 4.10 に、過剰ノイズ σ_m と考えられる効果の電圧依存性を示す。横軸が電圧で縦軸が過剰ノイズと考えられる効果である。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 % の標準偏差 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、信号の増幅による過剰ノイズの影響がないからであると考える。

APD の過剰ノイズの効果は 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 4.11 を見ると、増幅率に比例して増加しているため、過剰ノイズの効果によるものであると考える。

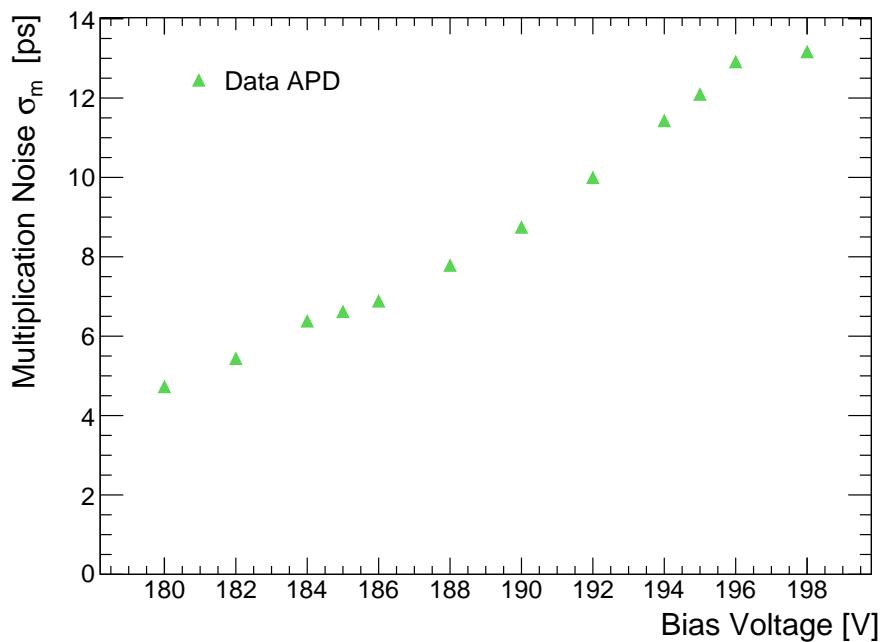


図 4.10: AC-LGAD 検出器の過剰ノイズの電圧依存性
横軸が電圧で縦軸が過剰ノイズの効果、緑点が APD のデータ点

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 と過剰ノイズ σ_m の増幅率依存性を図 4.11 に示す。横軸が増幅率で、縦軸が時間分解能、ジッター、過剰ノイズである。青点が時間分解能、赤点がジッター、緑点が過剰ノイズを表している。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、過剰ノイズ σ_m は、180V を超えると増加していることがわかる。以上の結果から、印加電圧や増幅率が大きくなると、信号の増幅や立ち上がり時間が小さくなることによってジッターは減少するが、過剰ノイズが上昇するため、LGAD 検出器の時間分解能が中庸な領域が見られると考える。そして、運転電圧を超える電圧で、LGAD 検出器の時間分解能 σ_t が上昇してしまう原因は、過剰ノイズ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。

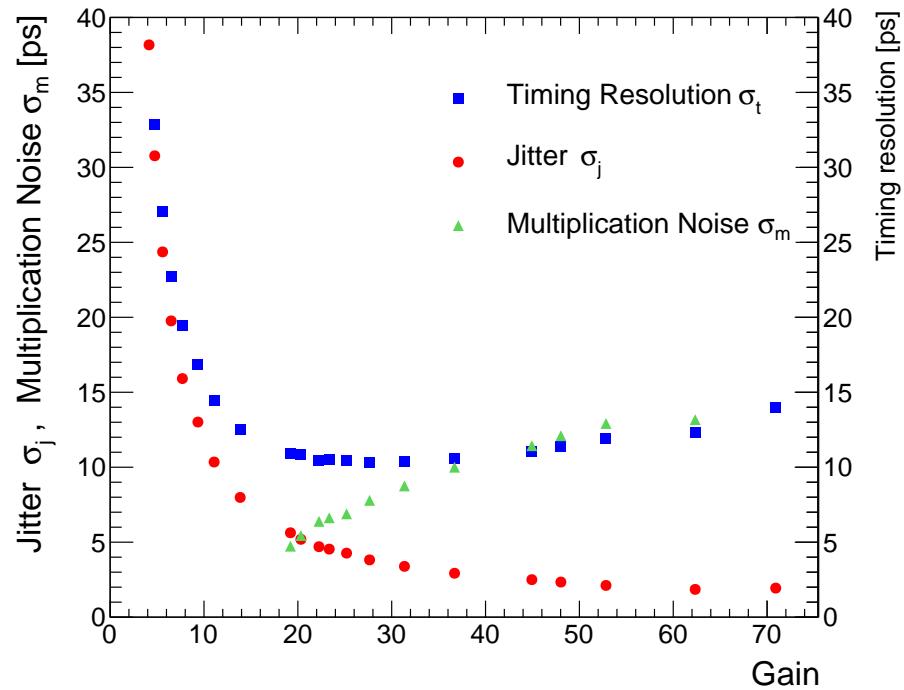


図 4.11: AC-LGAD 検出器の時間分解能、ジッター、過剰ノイズの增幅率依存性

横軸が增幅率、縦軸が時間分解能とジッターと過剰ノイズ

青点が時間分解能 σ_t で赤点がジッター σ_j で緑点が過剰ノイズ σ_m のデータ点

第5章

結論

であることがわかった。

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] Tomas. GENEVA, SWITZERLAND-SEPTEMBER 2014. Components of the CERN particle accelerator located underground.
<https://stock.adobe.com/jp/images/geneva-switzerland-september-2014-components-of-the-cern-particle-accelerator-located-underground-397291550>.
- [2] University of Liverpool. Liverpool physicist to lead international programme.
<https://news.liverpool.ac.uk/2011/03/14/liverpool-physicist-to-lead-international-programme/>.
- [3] X. et al. 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, November 2020.
- [4] 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 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム, 2023.
- [5] Sayuka Kita, Koji Nakamura, Tomoka Imamura, Ikumi Goya, and Kazuhiko Hara. Development of ac-lgad detector with finer pitch electrodes for high energy physics experiments, 2023.
- [6] S.M. Sze. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. 産業図書株式会社, 2012.
- [7] McIntyre R.J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-13, No. 1, pp. 164–168, 01 1966.
- [8] NKT Photonics KATANA.
https://www.japanlaser.co.jp/nkt-photonics_onefive-katana/.