

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、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クロストークを抑制した AC-LGAD 検出器では、30 ps の時間分解能が確認されている。

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、LGAD 検出器と同じ構造を持つ、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。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。LGAD 検出器と 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、ノイズを閾値付近の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 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を明らかにした。その要因について理解を深めることができ、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
第 2 章 LGAD 検出器の原理	5
2.1 半導体とシリコン検出器	5
2.1.1 pn 接合	5
2.1.2 電流電圧特性	6
2.1.3 雪崩増幅	7
2.1.4 飽和ドリフト速度	7
2.2 LGAD 検出器	8
2.2.1 基本構造	8
2.2.2 AD-LGAD 検出器と DC-LGAD 検出器	8
2.3 時間分解能	8
2.3.1 タイムウォーク	9
2.3.2 ジッター	9
2.3.3 ランダウノイズ	10
2.3.4 過剰ノイズ	10
2.3.5 時間分解能の電圧特性と研究目的	11
第 3 章 LGAD 検出器の増幅率の測定	13
3.1 サンプルの作成	13
3.1.1 LGAD と PIN の構造	13
3.1.2 酸化膜とアルミニウムの除去	13
3.2 レーザー測定の方法と使用装置	14
3.2.1 レーザーの性能	14
3.2.2 使用するセンサーとアンプボードの接続	15
3.2.3 レーザー測定のセットアップ	15
3.2.4 LGAD 検出器の電流電圧特性を用いた温度測定	17
3.3 解析方法	18
3.3.1 波形の解析	18
3.3.2 信号の大きさと時間分解能	18
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	20

第 4 章 時間分解能の評価	23
4.1 立ち上がり時間の測定	23
4.1.1 解析方法	23
4.1.2 立ち上がり時間の測定結果	24
4.1.3 波高差の測定結果	24
4.2 ノイズの測定	25
4.2.1 解析方法	25
4.2.2 ノイズの測定結果	26
4.3 ジッターの評価	27
4.4 時間分解能を悪化させる要素の考察	28
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
2.1	<i>pn</i> 接合による電界形成の様子 [4]	5
2.2	熱平衡状態、順バイアス電圧、逆バイアス電圧におけるバルクの空乏層幅とエネルギー帯図 [4] . .	6
2.3	<i>pn</i> 接合の電流電圧特性 [4]	6
2.4	電子雪崩におけるエネルギー帯図 [4]	7
2.5	Si 中のドリフト速度の電界依存性 [4]	7
2.6	LGAD 検出器の構造	8
2.7	DC-LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器の構造	9
2.8	タイムウォークの影響	9
2.9	ジッターの影響	10
2.10	ランダウノイズの影響	10
2.11	過剰ノイズ係数の増幅率依存性 [6]	11
2.12	レーザーで測定した時間分解能（ジッター） [7]	12
3.1	LGAD の表面図	13
3.2	LGAD 検出器 増幅層有り	13
3.3	PIN の検出器 増幅層無し	13
3.4	表面の剥離後の様子	14
3.5	裏面の剥離後の様子	14
3.6	赤外線パルスレーザー本体	15
3.7	KEK16 チャンネルアンプボード	16
3.8	アンプボードにセンサーを設置した様子	16
3.9	センサーに高電圧を印加させる様子	16
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	17
3.12	レーザーの焦点の様子	17
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	波高と到達時間のヒストグラム	19
3.16	AC-LGAD 検出器の信号の大きさの電圧依存性	20
3.17	AC-LGAD 検出器の時間分解能 σ_t の電圧依存性	20
3.18	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	23

4.2	立ち上がり時間のヒストグラム	24
4.3	波高差のヒストグラム	24
4.4	PIN の波形	24
4.5	AC-LGAD 検出器の立ち上がり時間の電圧依存性	25
4.6	AC-LGAD 検出器の波高の 60 %から 40 %の差の電圧依存性	25
4.7	ノイズの解析方法	26
4.8	AC-LGAD 検出器のノイズの電圧依存性	26
4.9	AC-LGAD 検出器のジッターの電圧依存性	27
4.10	AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターの増幅率依存性	28
4.11	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
4.12	オシロスコープの出力の比較	29

表目次

3.1	赤外線パルスレーザーの性能表	15
-----	----------------	----

第1章

背景

1.1 新粒子の探索

2012年 Large Hadron Collider (LHC) 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量の反物質が存在していたはずだが、現在では反物質の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、ダークマターとダークエネルギーの正体、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素粒子物理学の研究目的の一つである。

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。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、エネルギーをすることで、生成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、真空の管パイプ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での陽子・陽子衝突を起こすことができる。質量が重い新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、衝突頻度を上げることで、1 年間で取得するデータ量が 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) も検討されている。

LHC の衝突点で行われている実験の1つに ATLAS 実験がある。ATLAS 実験では、直径 25 m、長さ 46 m の円筒状の ATLAS 検出器を使って、陽子と陽子の衝突によって生成された粒子の測定を行っている。衝突によって生成された粒子の再構成を行うために、ATLAS 検出器の最内層に置かれている検出器を内部飛跡検出器と呼ぶ。将来の素粒子実験では、さらなる高輝度化と高エネルギー化に伴って、衝突点で生成される粒子の数が激増するため、それらを効率よくとらえて飛跡を再構成するために、内部飛跡検出器の改良が求められている。

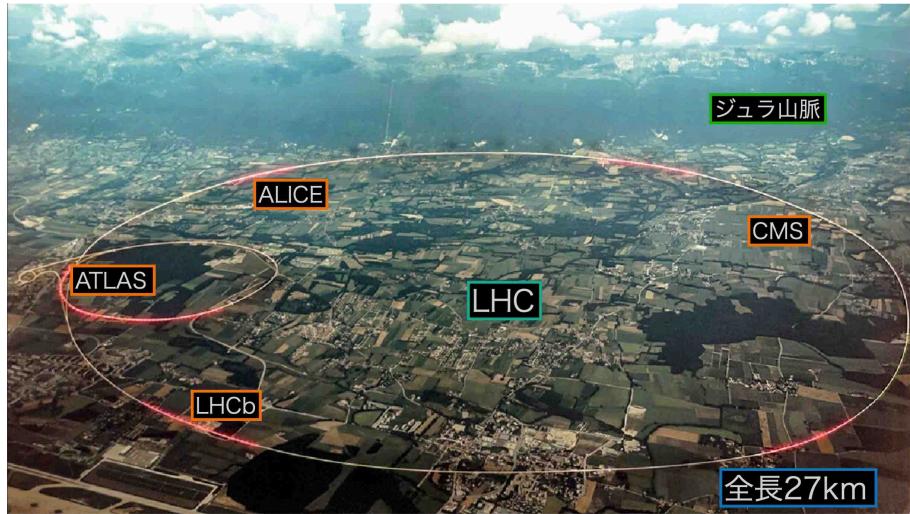


図 1.1: Large Hadron Colider (LHC) の鳥瞰図 [1]

1.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、検出器内に荷電粒子が通過すると、検出器内で電子正孔対が生成され、通過した情報として電気信号を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。

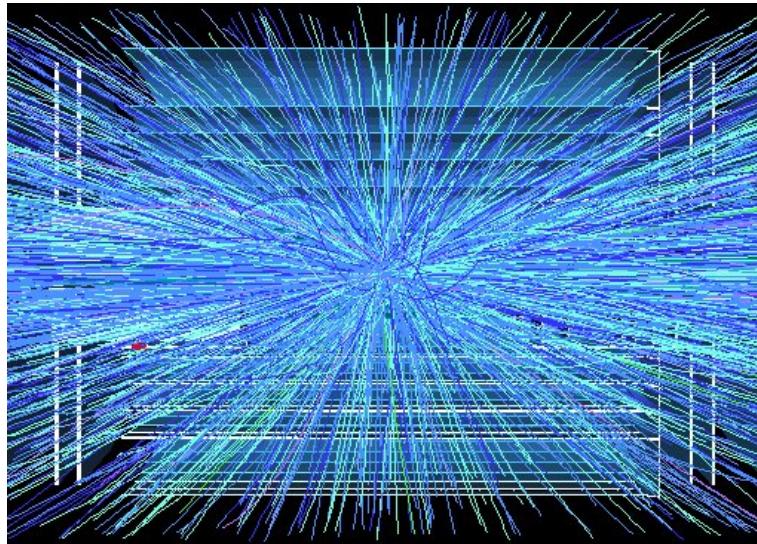


図 1.2: HL-LHC の衝突点の様子 [2]

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衝突頻度を向上させる計画が検討されている。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、衝突の頻度を高くすることが有効である。現在の LHC では1回のバンチ交差あたり最大 60 個の衝突が起きるが、図 1.2 の HL-LHC における衝突点のシミュレーション [2] では、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。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。粒子の衝突によって生じる事象のほとんどが背景事象で、その中から調べたい衝突を見つけなければならない。内部飛跡検出器には大量の粒子が通過するため、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 実験で使われる ATLAS 検出器では、主に電極サイズが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 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、位置分解能を向上と occupancy を下げる事ができるため、多数の衝突から生成される粒子の飛跡をより確実に再構成できる。高い位置分解能に加えて、検出器に高い時間分解能を持たせる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。検出器が 3 層に設置されており、ビーム軸上で起きた衝

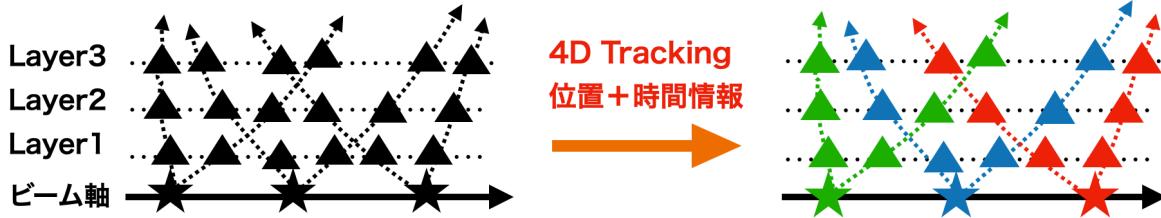


図 1.3: 位置情報と時間情報による飛跡の再構成の様子。星印が粒子のヒット情報で点線が再構成した飛跡である。

時間分解能を持たせた検出器を用いることで、飛跡と衝突点を時間で区別することができる様子を示している。

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。時間情報があることで、飛跡の再構成することに加えて、右の図で衝突点と飛跡を色で区別したように、時間で区別することができるようになる。

図 1.4 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。1 cm 単位で検出器を設置する場合、光速で進む粒子の飛跡に時間情報を加えるためには、30 ps の時間分解能を満たす必要がある。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。

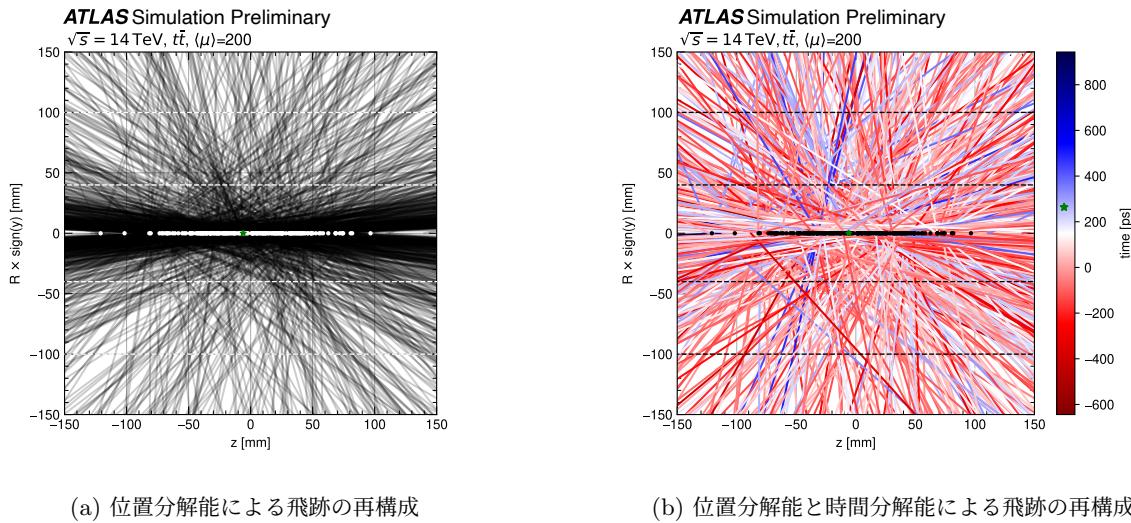


図 1.4: 飛跡の再構成のシミュレーション [3]

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。粒子密度が高くなっても衝突点と飛跡の紐付けが可能。

第2章

LGAD 検出器の原理

2.1 半導体とシリコン検出器

2.1.1 pn 接合

p 型半導体と n 型半導体を接合させた時の接触した領域を pn 接合と呼ぶ。 pn 接合が形成されると、 p 側と n 側で電子と正孔の密度差が生じるため、図 2.1 のように n 型半導体の電子は p 型半導体へ拡散し、 p 型半導体の正孔は n 型半導体へ拡散する。拡散した電子と正孔が再結合することで、 pn 接合付近にキャリアが少ない領域が形成される。この領域を空乏層という。 p 側では正孔が拡散し負電荷のアクセプタインが中和されずに接合近傍に残る。 n 側では電子が拡散し正電荷のドナーイオンが接合近傍に残る。これによって空乏層内に、 n 側から p 側の方向に電界が生じる。この電位を内蔵電位と呼ぶ。

シリコン半導体の空乏層幅 W は、電荷量を q 、シリコンの誘電率を ϵ_s 、内蔵電位を V_{bi} 、アクセプタイン濃度 N_A 、ドナーイオン濃度 N_D を使って、式 2.1.1 で表すことができる [4]。

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \quad (2.1.1)$$

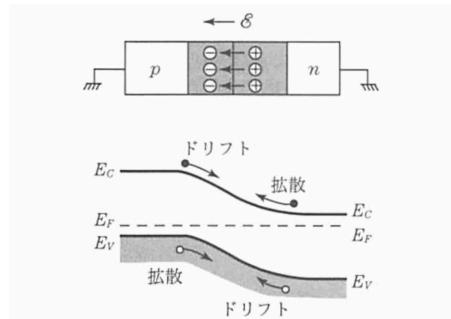


図 2.1: pn 接合による電界形成の様子 [4]

n 型半導体の電子と p 型半導体の正孔が拡散し、 n 側から p 側へ電界が生じる。

図 2.2 の (a) に pn 接合の熱平衡状態の空乏層幅とエネルギー-band 図を示す。空乏層幅が W で、 pn 接合のバンドギャップは電荷量を q 、内蔵電位を V_{bi} とすると qV_{bi} と表せる。

pn 接合へ順バイアス電圧の印加

pn 接合の p 側に順バイアス電圧を印加した時の空乏層の様子を 図 2.2 の (b) に示す。 p 側へ V_F の順バイアス電圧を印加すると、 pn 接合の電位は V_F だけ下がるため、空乏層幅は 式 2.1.1 から減少することがわかる。 pn 接合のバンドギャップも $q(V_{bi} - V_F)$ となり熱平衡状態のバンドギャップと比べて減少する。

pn 接合へ逆バイアス電圧の印加

pn 接合の *p* 側に逆バイアス電圧を印加した時の空乏層の様子を 図 2.2 の (c) に示す。*p* 側へ V_R の逆バイアス電圧を印加すると、*pn* 接合の電位は V_R だけ上昇するため、空乏層幅は 式 2.1.1 から増加することがわかる。*pn* 接合のバンドギャップも $q(V_{bi} + V_R)$ となり熱平衡状態のバンドギャップと比べて増加する。

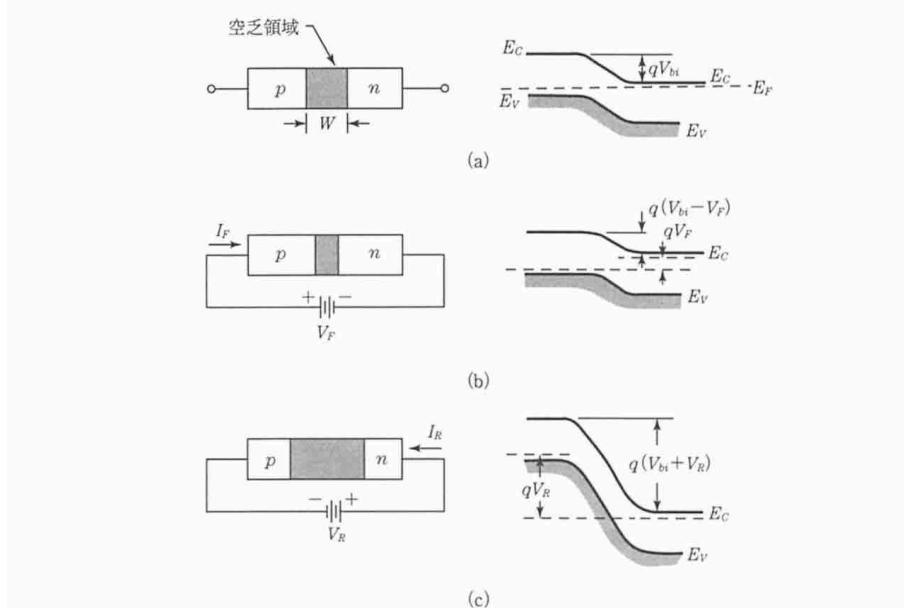


図 2.2: 热平衡状态、顺バイアス电压、逆バイアス电压におけるバルクの空乏层幅とエネルギーバンド図 [4]

(a) が热平衡状态、(b) が顺バイアス电压、(c) が逆バイアス电压の様子。

2.1.2 電流電圧特性

pn 接合は特定の方向にだけ電流が流れやすい性質を持つ。図 2.3 に *pn* 接合の電流電圧特性を示す。*pn* 接合に順バイアス電圧をかけると、*pn* 接合のバンドギャップが減少し、キャリアがバンドギャップを越えることが容易になるため、電圧の増加とともに電流が急速に増加する。逆バイアス電圧をかけると、*pn* 接合のバンドギャップが増加するため、キャリアによる電流は流れない。ある逆バイアスがある電圧に達すると大電流が流れる。この電圧を降伏電圧と呼び、この電流は電子雪崩によって生じる電流である。

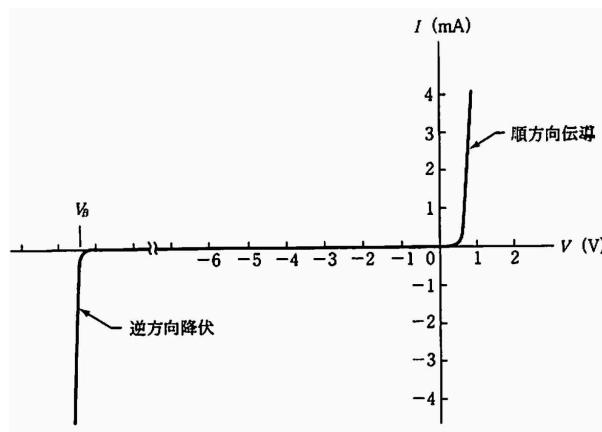


図 3 典型的な Si *p-n* 接合の電流-電圧特性。

図 2.3: *pn* 接合の電流電圧特性 [4]

順バイアス電圧をかけると電圧上昇に伴い電流が上昇し、逆バイアス電圧をかけると降伏電圧で電流が上昇する。

2.1.3 雪崩増幅

半導体内の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 2.4 はその過程を示したものになっている。図 2.4 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。

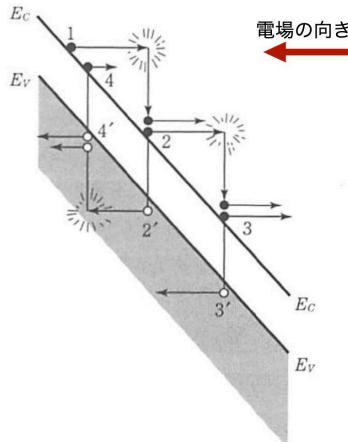


図 2.4: 電子雪崩におけるエネルギーバンド図 [4]
電子や正孔が衝突して電子正孔対を生成する現象が繰り返し生じる。

2.1.4 飽和ドリフト速度

半導体内に電界が印加されると、電子は電界による力を受けて加速される。この電界による速度成分のことをドリフト速度と呼ぶ。図 2.5 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。

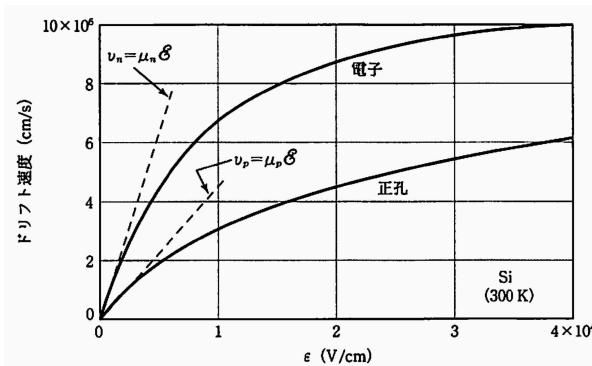


図 2.5: Si 中のドリフト速度の電界依存性 [4]、横軸が電界の強さで縦軸がドリフト速度
電界が強くなるとドリフト速度は増加するが、その増加割合は徐々に小さくなり飽和ドリフト速度になる。

2.2 LGAD 検出器

2.2.1 基本構造

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。以下の図 2.6 に LGAD 検出器の構造を示す。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、立ち上がりが速い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、移動速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。

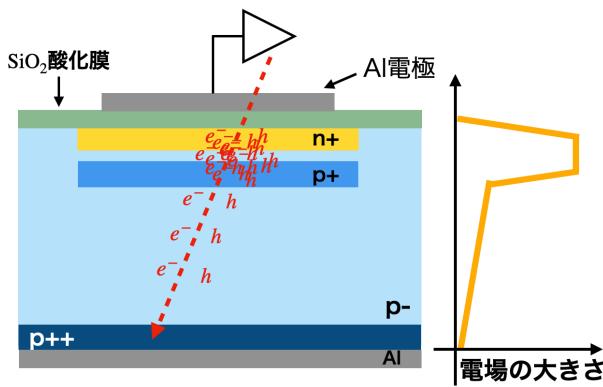


図 2.6: LGAD 検出器の構造

增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。

2.2.2 AD-LGAD 検出器と DC-LGAD 検出器

従来の LGAD 検出器は、電極ごとに増幅層を設置する 図 2.7a 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 2.7b 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 [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。

2.3 時間分解能

時間分解能は検出器が粒子通過の時刻を正確に測定する能力のことである。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 2.3.1 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、それぞれの影響を小さくすることで時間分解能を向上することができる。

$$\sigma_t^2 = \sigma_{tw}^2 + \sigma_i^2 + \sigma_L^2 \quad (2.3.1)$$

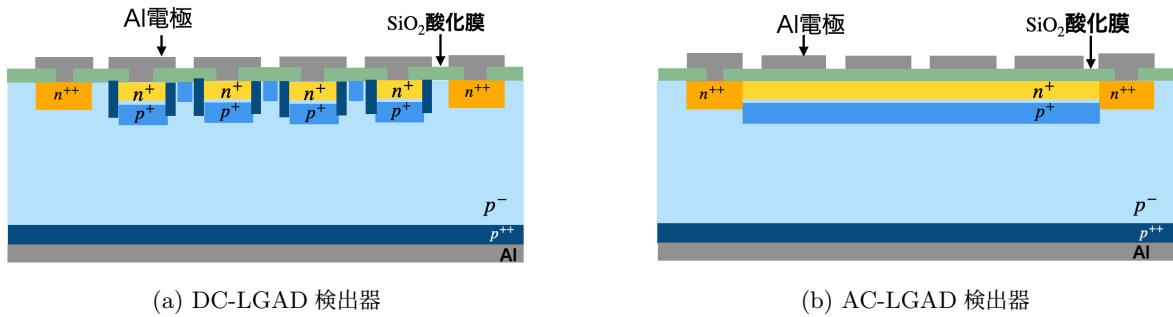


図 2.7: DC-LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器の構造

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。

2.3.1 タイムウォーク

図 2.8a 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。入射した粒子が検出器内で落とすエネルギーの違いによって波形に違いが生じる。図 2.8a 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 2.8b 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。

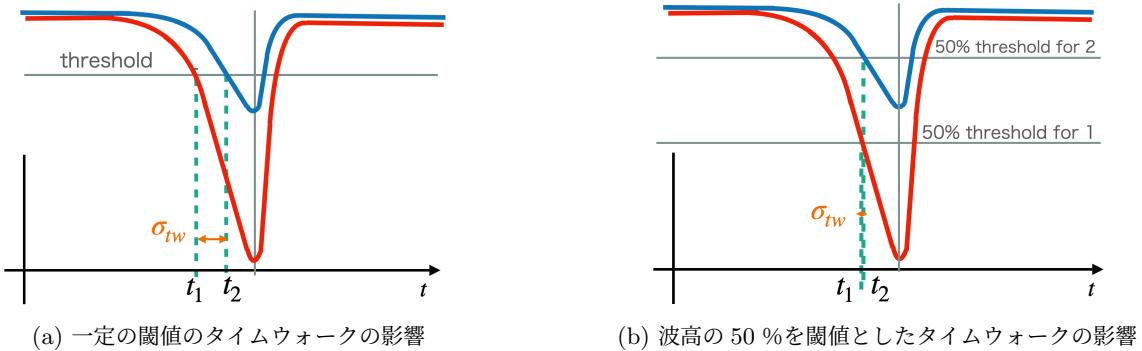


図 2.8: タイムウォークの影響

(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抑制できる。

2.3.2 ジッター

図 2.9 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 2.3.2 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、 $\frac{dV}{dt}$ が信号の傾きを示している。

$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} \quad (2.3.2)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} \\ &= \frac{t_r}{\left| \frac{S}{\sigma_n} \right|} \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

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 2.3.3 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 検出器は増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。

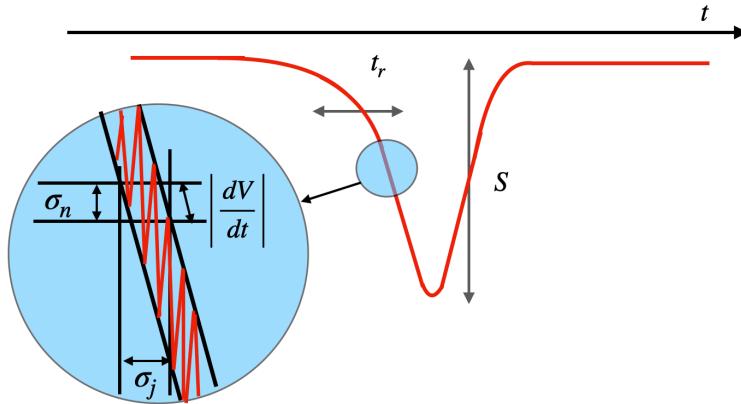


図 2.9: ジッターの影響
ノイズにより到達時間にばらつきが生じる。

2.3.3 ランダウノイズ

図 2.10 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い、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。

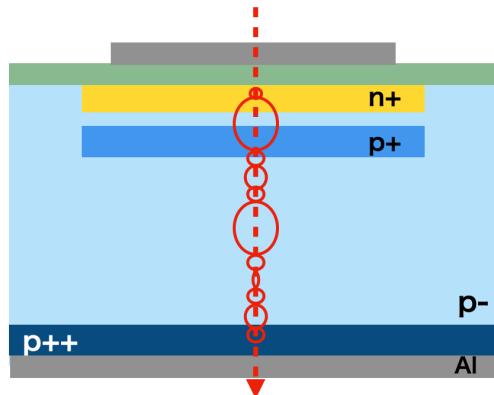


図 2.10: ランダウノイズの影響
赤丸が荷電粒子が落とすエネルギーの大きさを示している。

2.3.4 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 2.3.4 のように表すことができる [6]。 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。

$$dI_p = (\alpha I_n + \beta I_p + g) dx \quad (2.3.4)$$

また、過剰ノイズ係数 $\phi/2eI_{in}$ は式 2.3.5 で表すことができる [6]。 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 2.3.5 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。

$$\phi/2eI_{in} = M^3 \left[1 + \frac{1-k}{k} \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right] \quad (2.3.5)$$

式 2.3.5 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 2.11 で示すことができる。図 2.11 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、過剰ノイズ増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。

LGAD 検出器の時間分解能は増幅率の増加に従って信号のサイズが大きくなるため、式 2.3.1 より導出される時間分解能は良くなるが、増幅層にかかる電圧をあげると過剰ノイズが増加する。つまり、時間分解能の性能が最大になる最適な印加電圧が存在する。この電圧に関しては、4.4 章で詳しく述べる。通常、過剰ノイズが支配的になる領域より十分低い電圧での運転を行う。

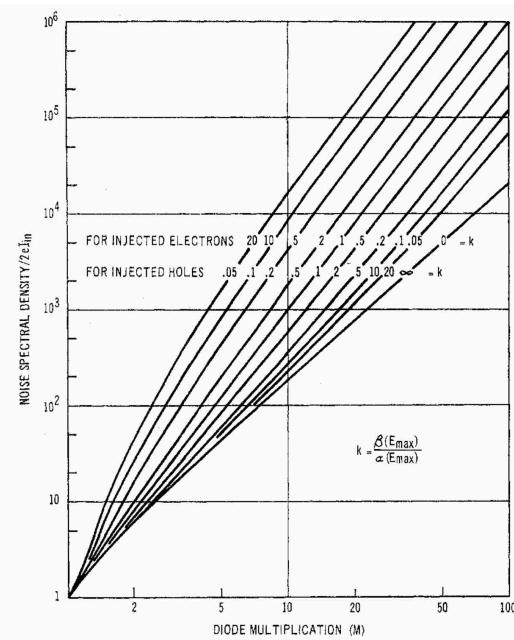


図 2.11: 過剰ノイズ係数の増幅率依存性 [6]

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。

2.3.5 時間分解能の電圧特性と研究目的

先行研究 [7] 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 2.12 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。

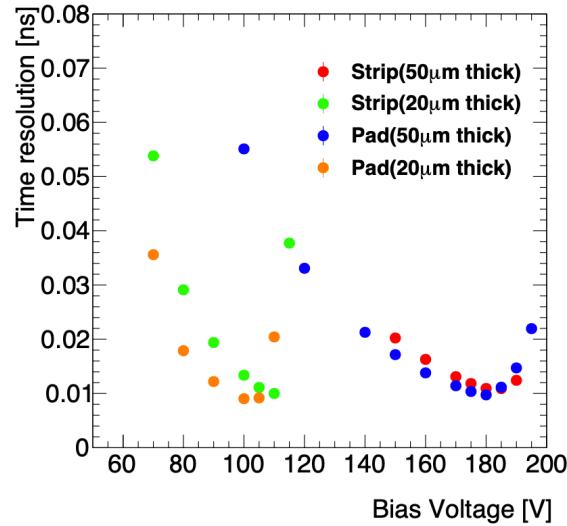


図 2.12: レーザーで測定した時間分解能（ジッター）[7]

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3章

LGAD 検出器の増幅率の測定

3.1 サンプルの作成

今回の測定で使用する LGAD 検出器は、1 chPad と呼ばれる電極が 1 つの AC-LGAD 検出器の 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作成した。E600 タイプとは n^+ 不純物濃度で決定する抵抗値が $1600 \Omega/\text{sq}$ 、電極間の接合容量が 600 pF/mm^2 のサンプルである。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 LGAD と PIN の構造

本実験のために、増幅層がなく増幅機構を持たない PIN ダイオードを作成した。図 3.2 は LGAD、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。PIN は LGAD 検出器と増幅層以外、同じ構造になっているため、LGAD と PIN の信号の大きさを比較することで、増幅層での信号の増幅率を求めることができる。

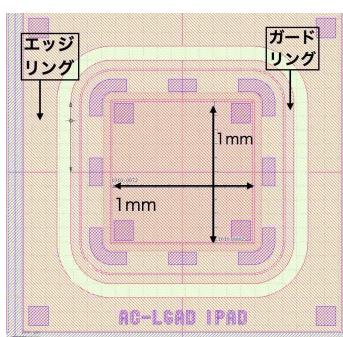


図 3.1: LGAD の表面図

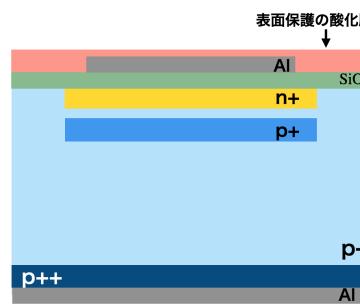


図 3.2: LGAD 検出器
増幅層有り

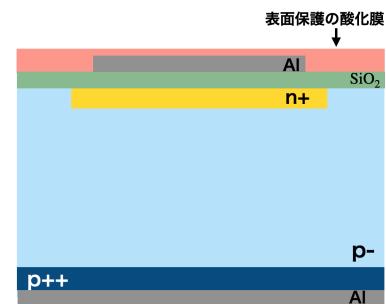


図 3.3: PIN の検出器
増幅層無し

3.1.2 酸化膜とアルミニウムの除去

LGAD 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、レーザーが表面と裏面のアルミニウムに反射することを防ぐために、それ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する必要があるため、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問題なく除去できたが、LGAD については除去作業中に、検出器内部を傷つけてしまい、暗電流が約 1000 倍になってしまった。そのため、LGAD に関してはワイヤーボンディングのウェッジを使って酸化膜の除去を試みたところ、検出器への損傷を抑える

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 LGAD の表面の様子を 図 3.4 に、裏面の様子を 図 3.5 に示す。サンプルの中心に色が変わっている部分がある。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。

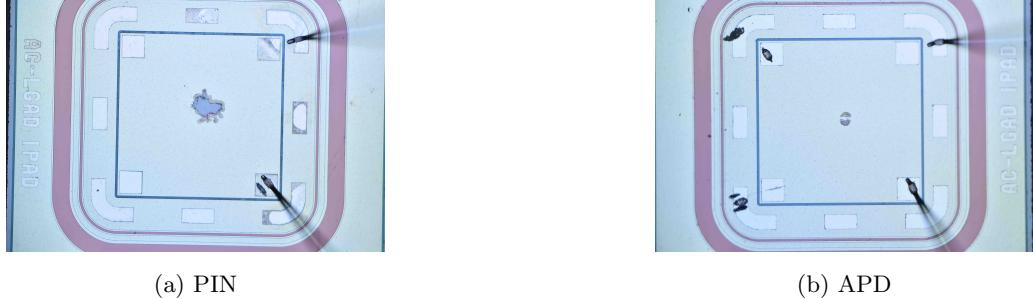


図 3.4: 表面の剥離後の様子

LGAD と PIN の中心の色が変わっている部分がアルミニウムを剥離して作成したレーザー窓。

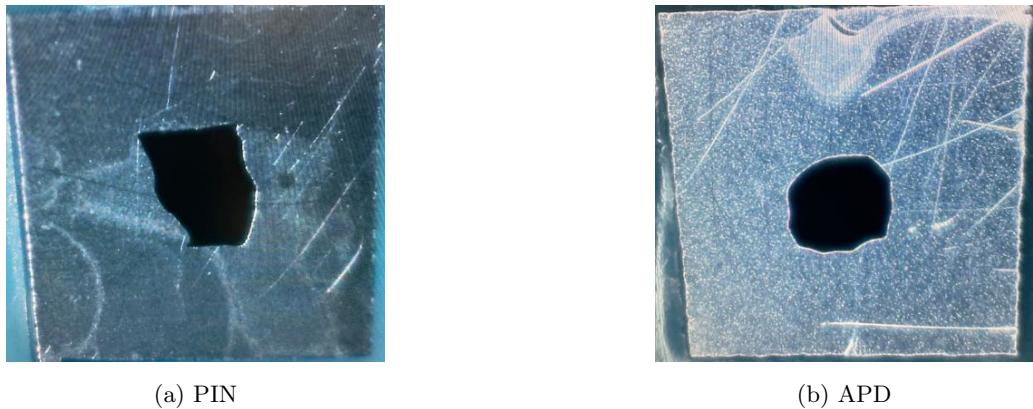


図 3.5: 裏面の剥離後の様子

LGAD と PIN の中心の色が変わっている部分が裏面反射を防ぐためにアルミニウムを剥離した。

3.2 レーザー測定の方法と使用装置

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。このレーザーはトリガーを発行することができる。レーザーのタイミングジッタは 10 ps 未満である、時間分解能に影響があると考える。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。

赤外線パルスレーザーから 1 秒間におよそ 5×10^{16} 個の光子が出力されるため、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損失が一様な粒子を模擬することができる。そのため、ランダウノイズの効果が少ない状況で時間分解能を測定することができる。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。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の角度を変えることで、レーザーの強度を調整することができる。本実験では、PIN 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。レーザー装置内にあるハーフミラーで参照光の進む方向を、レー

レーザーと同じ光軸上にすることができる。その参照光を使って、レーザーの入射位置を知ることができる。

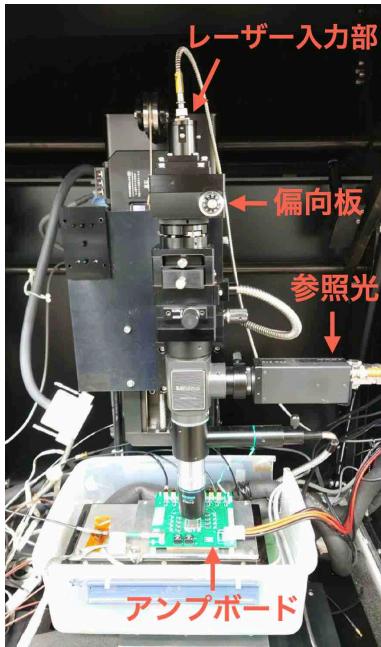


図 3.6: 赤外線パルスレーザー本体

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	$> 10 \text{ mW at } 1 \text{ MHz}$
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	$< 10 \text{ ps}$

3.2.2 使用するセンサーとアンプボードの接続

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 検出器であるため、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。この時、電流値は 0.5 A だった。

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。赤外線パルスレーザーをセンサーに入射し、センサーからの信号をアンプボードで增幅を行い、オシロスコープへと信号を送る。トリガーはレーザー本体からオシロスコープへ送っている。トリガーと信号を受け取ったオシロスコープは PC へとデータを送り出す。使用するオシロスコープは、TELEDYNE LECROY 社の WaveRunner 8000HD 8 チャンネル 高分解能オシロスコープで、サンプリングレートは最大 10GS/s である。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。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上限値である。

レーザー光は 50 倍の対物レンズを用いて、直径約 $1.3 \mu\text{m}$ に絞ることができる。レーザーと同じ光軸上を進む参



図 3.7: KEK16 チャンネルアンプボード

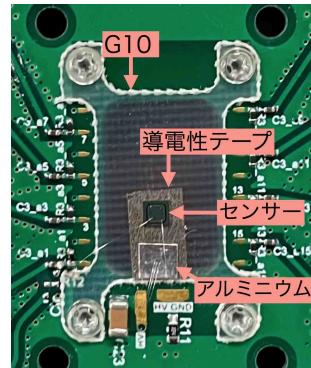


図 3.8: アンプボードにセンサーを設置した様子

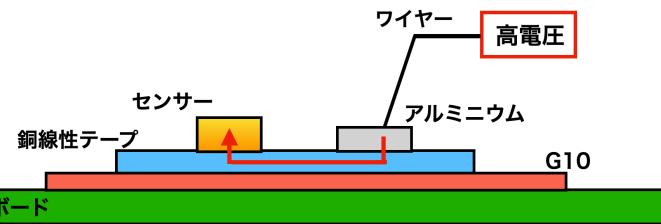


図 3.9: センサーに高电压を印加させる様子

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

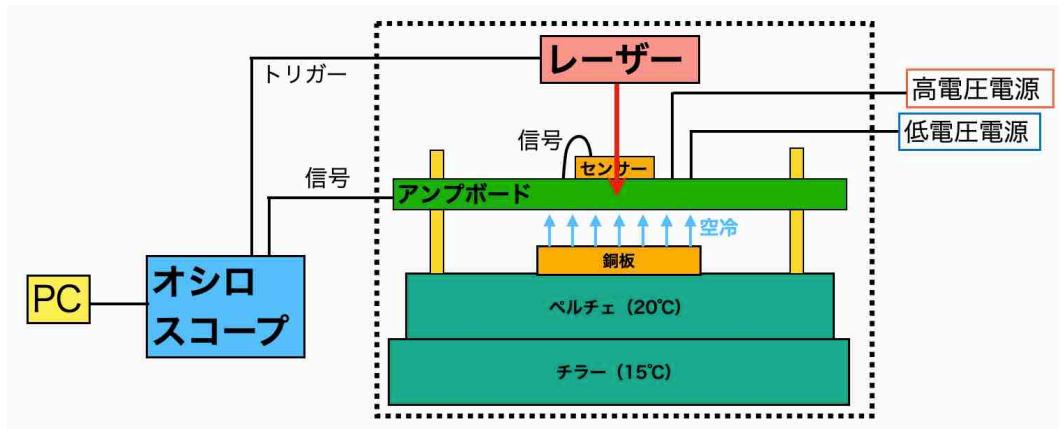


図 3.10: レーザー測定のセットアップ

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（点線部）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。

照光を用いて、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。位置と焦点の調節は、ステージコントローラを使って、 $0.1 \mu\text{m}$ 単位で xyz 軸方向に動かすことができる。図 3.11 にあるように、xy 軸がビーム軸に対して垂直方向に、z 軸がビーム軸と同じ方向に動かすことができる。xy 軸を動かすことでレーザー窓の中心に参照光が来るように調節でき、z 軸を動かすことで、レーザーの焦点を調節することができる。

今回の測定系では低电压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た。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。

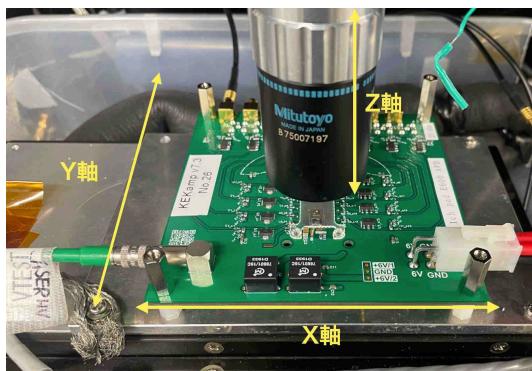


図 3.11: レーザーの入射位置と焦点の調節
xyz 軸を動かして、位置と焦点を調節できる。

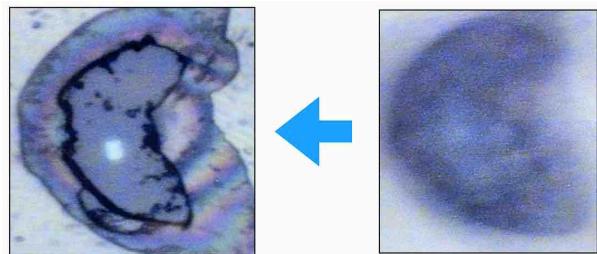


図 3.12: レーザーの焦点の様子
右が焦点を合わせる前、左が焦点を合わせた後

3.2.4 LGAD 検出器の電流電圧特性を用いた温度測定

レーザー測定で使用する装置は、恒温層よりも大きいので、恒温層を使ったセンサーとアンプボードの温度調節・測定ができない。そのため、 20°C に設定した恒温層内の LGAD 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。図 3.13 に LGAD 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 增える [7]。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 198 V で恒温層内での降伏電圧が 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。

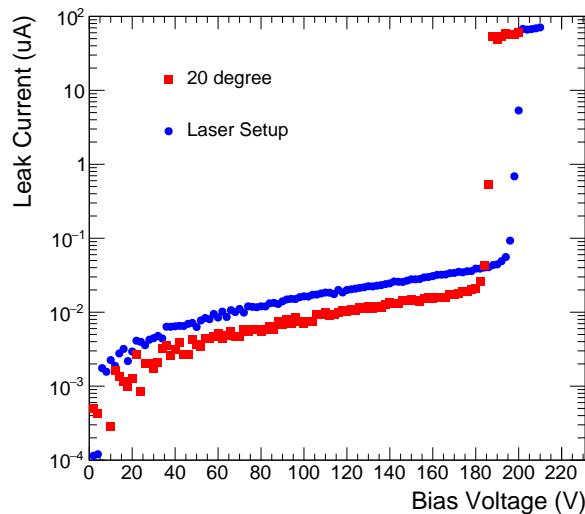


図 3.13: AC-LGAD 検出器の電流電圧特性

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

図 3.14 にオシロスコープの出力を示す。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てから約 55 ns 後に見られる黄色の信号が LGAD の信号である。LGAD の信号はアンプボードのノイズによって、0 mV 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 % を閾値とした。レーザーのトリガーと波高の 50 % を越えた時間差を信号の到達時間とした。

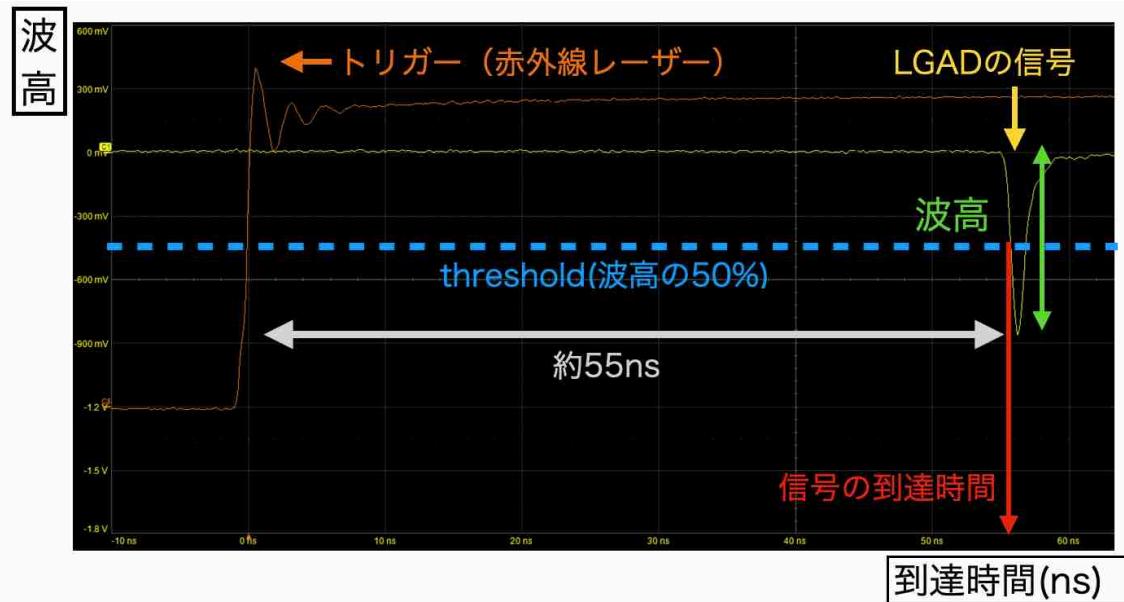


図 3.14: オシロスコープの出力とデータの取得方法

横軸が時間、縦軸が波高である。トリガー（橙色）の 55 ns 後に LGAD 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 3.15a の到達時間のヒストグラムと図 3.15b の波高のヒストグラムを作成した。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、ガウス分布でフィッティングすることで求めた。時間分解能には、レーザーのトリガーの 10 ps 未満のタイミングジッタの影響も含まれている。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、非対称ガウス分布をフィットすることで求めた。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。

LGAD に関しては、逆電圧を印加し初めてから増幅層が空乏化するまで、信号は見えない。したがって、バルク部の空乏化が始まる 70 V 程度から、信号は見え始める。そのため、LGAD 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 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。

LGAD の信号の大きさを S_{LGAD} 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、LGAD 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を求めることができる。

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

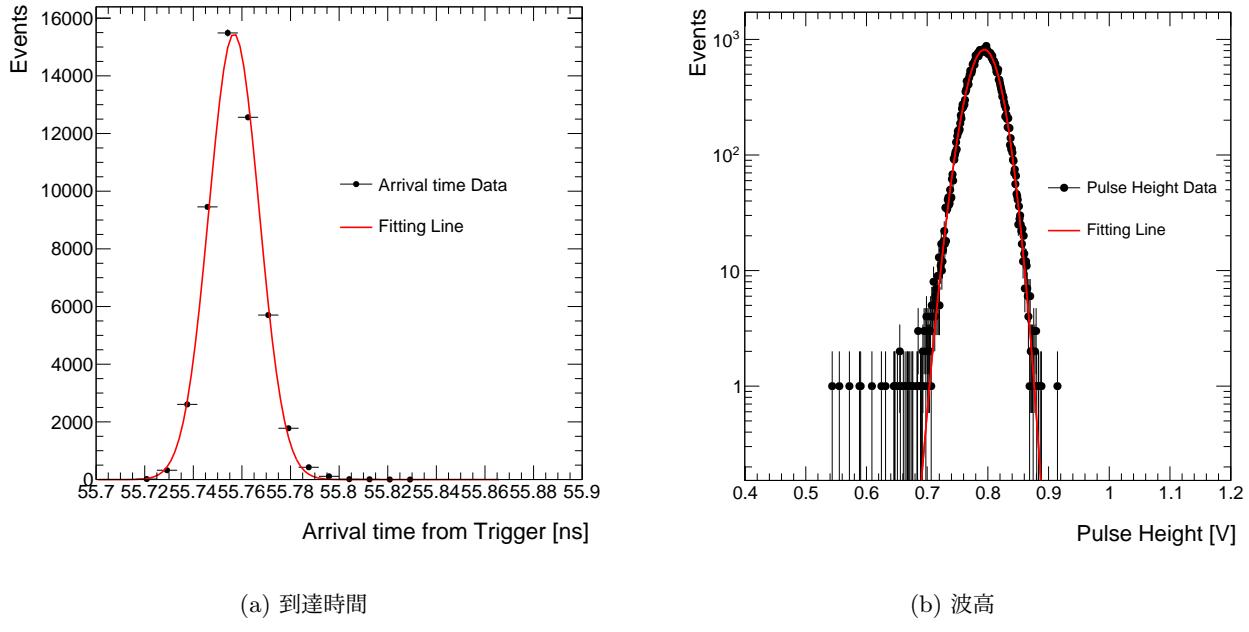


図 3.15: (a) が到達時間のヒストグラムで標準偏差を時間分解能とした。

(b) が波高のヒストグラムで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

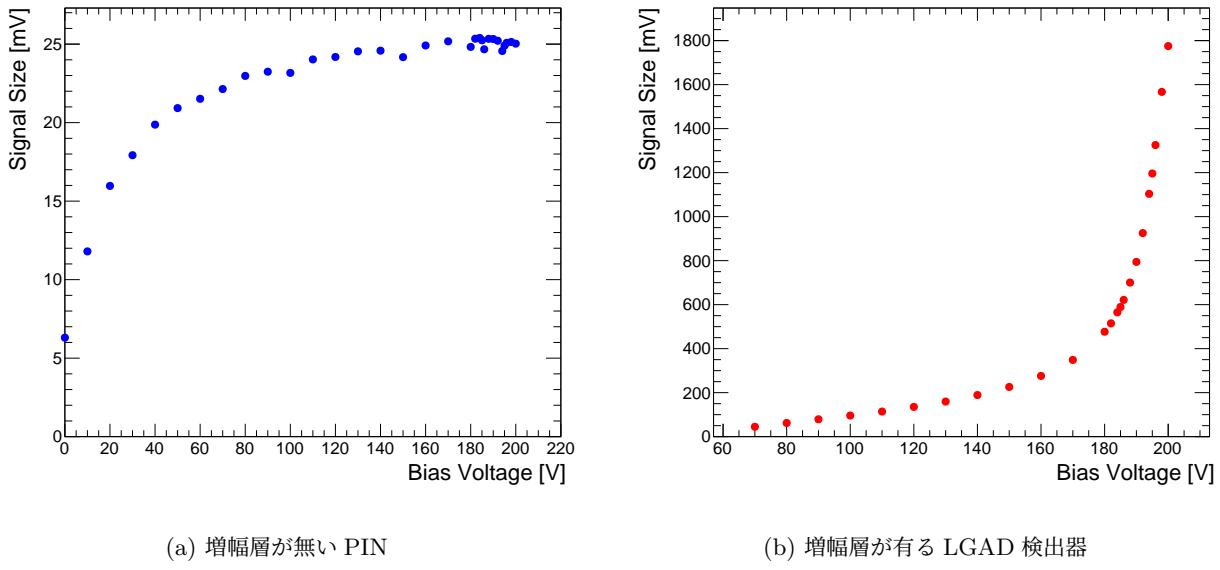
3.4 測定結果

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 3.16a は增幅層の無い PIN の信号の大きさの電圧依存性で、図 3.16b は LGAD 検出器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、バルク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、バルク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。LGAD 検出器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された電子正孔対が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 3.17 に示す。青点が PIN と赤点が LGAD 検出器の測定結果を、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こらなくなつたためであると考える。LGAD 検出器の時間分解能は 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



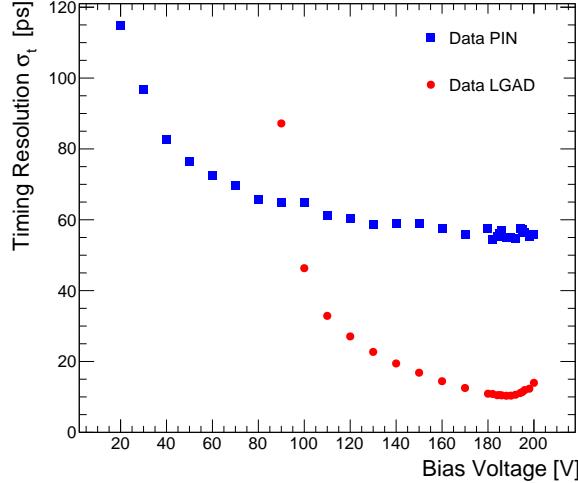
(a) 増幅層が無い PIN

(b) 増幅層が有る LGAD 検出器

図 3.16: 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

ると、時間分解能が悪化してしまう原因については第4章で詳しく調べる。LGAD 検出器と PIN の時間分解能の比較から、検出器に增幅効果があることで時間分解能が5倍程度に改善することがわかった。

図 3.17: 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 LGAD

3.4.3 増幅率

LGAD 検出器と PIN の信号の大きさから、AC-LGAD 検出器の信号の増幅率を求めた。図 3.18 は、求めた増幅率と LGAD 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。この図を見ると、増幅率は電圧を上げることで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、LGAD 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。

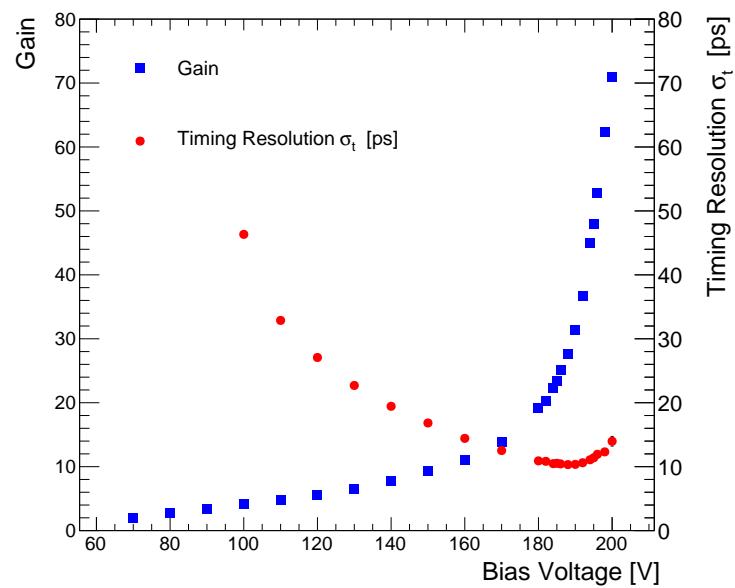


図 3.18: AC-LGAD 検出器の増幅率と時間分解能の電圧依存性
x 軸が電圧で y 軸が増幅率と時間分解能、赤点が増幅率、青点が時間分解能

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2.3.1で示すことができる。ジッターを構成する要素のノイズ σ_n 、立ち上がり時間 t_r 、信号の大きさ S を測定して、式2.3.3からジッターを計算して求めることができる。ジッターが時間分解能に影響しているという推測の元、レーザー測定で求めた時間分解能と、計算から求めたジッターを比較することで、時間分解能を悪化する原因を調べる。本章ではまず、ジッターを構成するノイズ、立ち上がり時間、信号の大きさを測定した。その結果から、ジッターと時間分解能の増幅率依存性を評価し、増幅率が大きい時の時間分解能の悪化の原因について考察していく。

4.1 立ち上がり時間の測定

4.1.1 解析方法

図4.4にオシロスコープの信号の出力を示す。横軸が時間、縦軸が波高で、黄色線がセンサーからの信号である。最大波高の60%と40%の時の波高と時間の差を取ることで、最大波高の60%から40%の立ち上がり時間と波高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、その時の最頻値を最大波高の60%から40%の立ち上がり時間 t_r と波高差 S とした。PINの信号雑音比が小さいため、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。

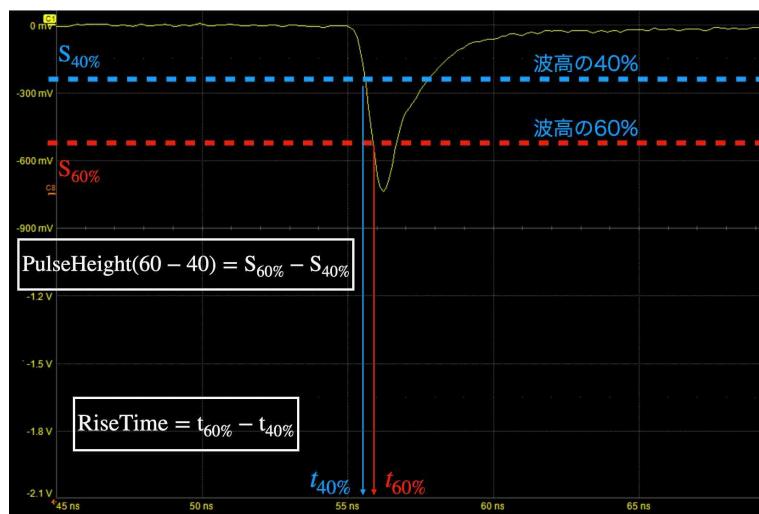


図4.1: 立ち上がり時間の解析方法

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。

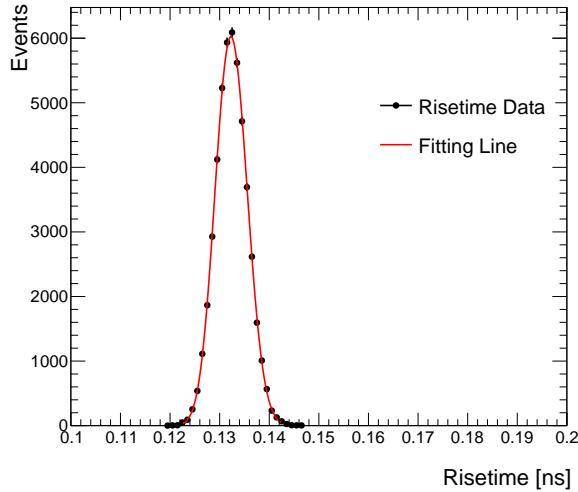


図 4.2: 立ち上がり時間のヒストグラム

最頻値を立ち上がり時間とした。

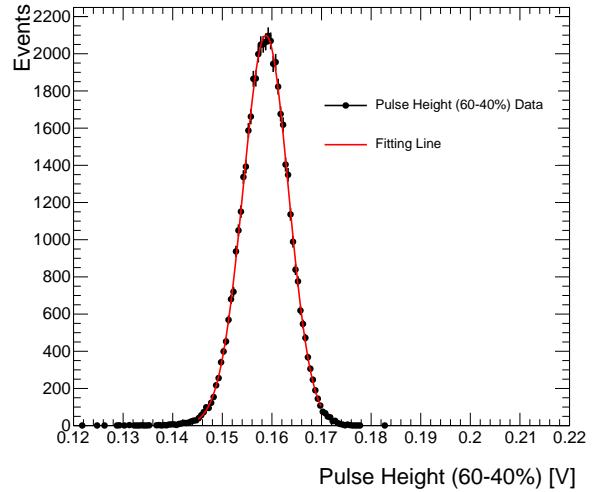


図 4.3: 波高差のヒストグラム

最頻値を波高の 60 %から 40 %の波高差とした。

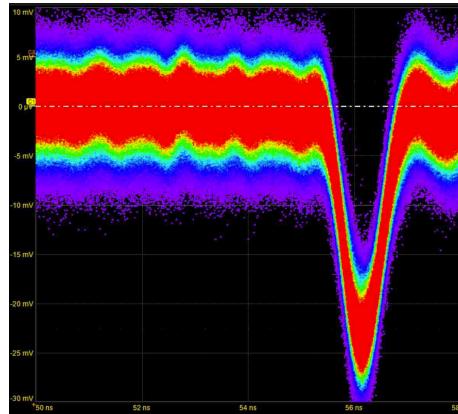


図 4.4: PIN の波形

PIN は信号雑音比が小さいため、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

LGAD と PIN の立ち上がり時間の電圧依存性を 図 4.5 に示す。横軸が電圧で、縦軸が立ち上がり時間で、赤点が LGAD 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。LGAD 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 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。

4.1.3 波高差の測定結果

LGAD と PIN の波高差の測定から、x 軸が印加電圧、y 軸が波高差のグラフを作成した。図 4.6a は PIN の波高差の電圧依存性で、図 4.6b は LGAD の波高差の電圧依存性である。PIN のグラフは、図 3.16a 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。LGAD のグラフは、図 3.16b の信号

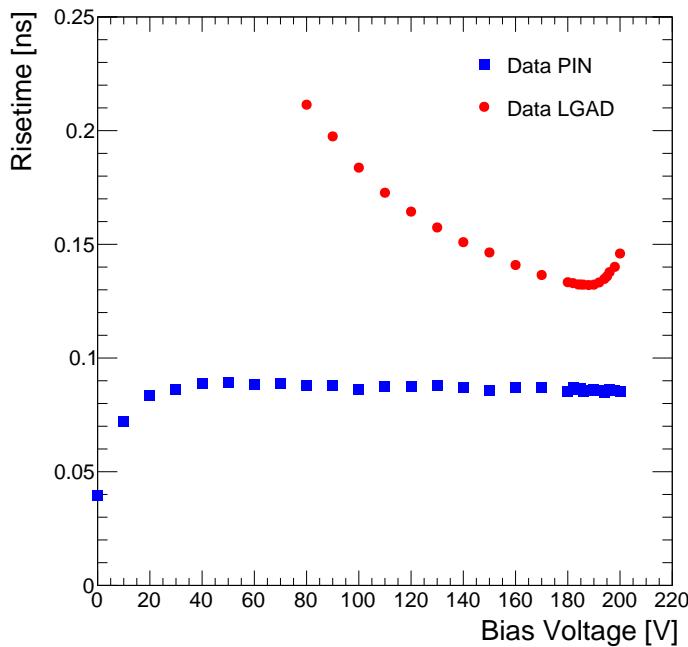
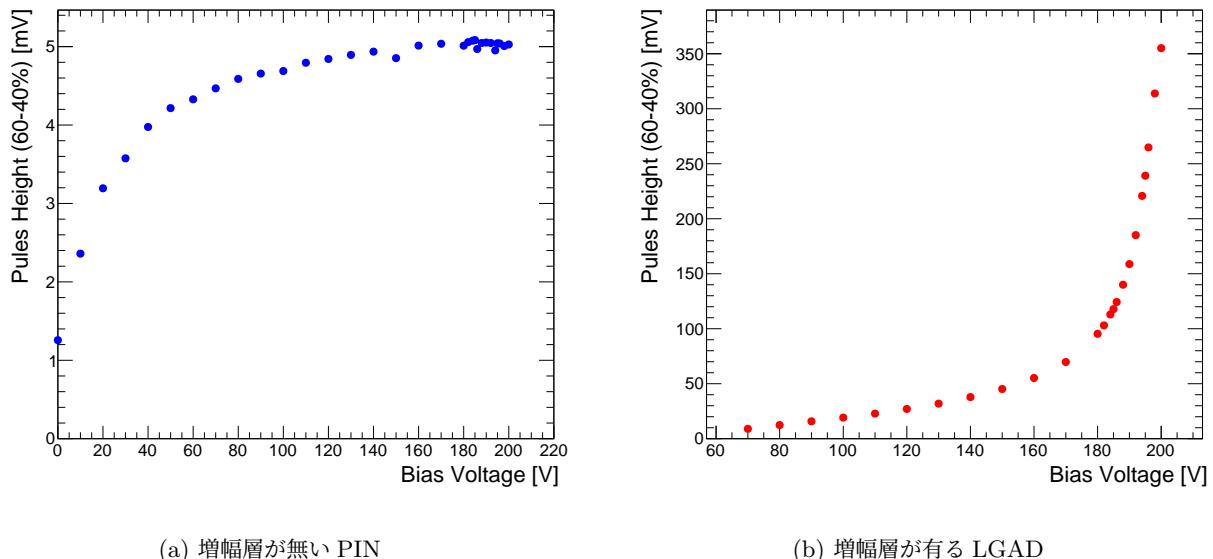


図 4.5: AC-LGAD 検出器の立ち上がり時間の電圧依存性
横軸が電圧で縦軸が立ち上がり時間、赤点が LGAD で青点が PIN の測定点

の大きさの電圧依存性のグラフと同様に、增幅層による電子正孔対の増幅による、波高差の増加が見られた。



(a) 増幅層が無い PIN

(b) 増幅層が有る LGAD

図 4.6: 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 LGAD 検出器で、青点が PIN の測定点

4.2 ノイズの測定

4.2.1 解析方法

図 4.7a は、横軸が時間で縦軸が波高のグラフに、LGAD から得られる信号をプロットした 2 次元ヒストグラムである。このヒストグラム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グラムが図 4.7b である。このヒストグラムの標準偏差をノイズとして、LGAD と PIN のノイズの電圧依存性を測定した。

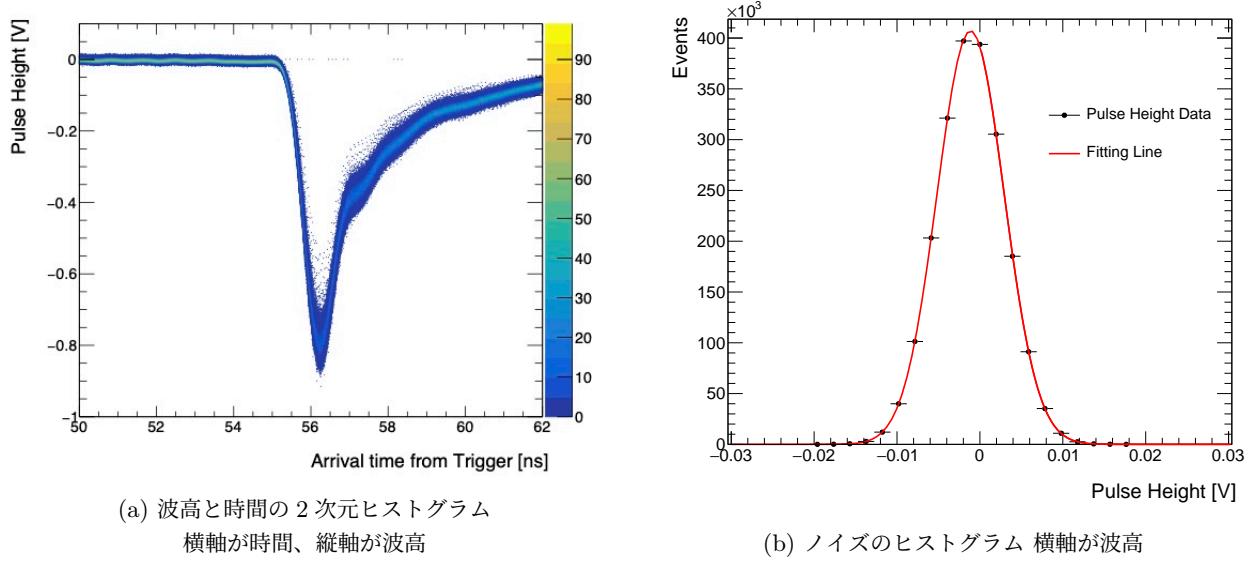


図 4.7: ノイズの解析方法

(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

LGAD と PIN のノイズの電圧依存性を 図 4.8 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 LGAD 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 2.6 mV に対して、LGAD のノイズは約 4 mV 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、200 V では LGAD 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、200 V 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、ノイズが大きくなる原因は、電子雪崩が生じることで暗電流が増加するためであると考える。

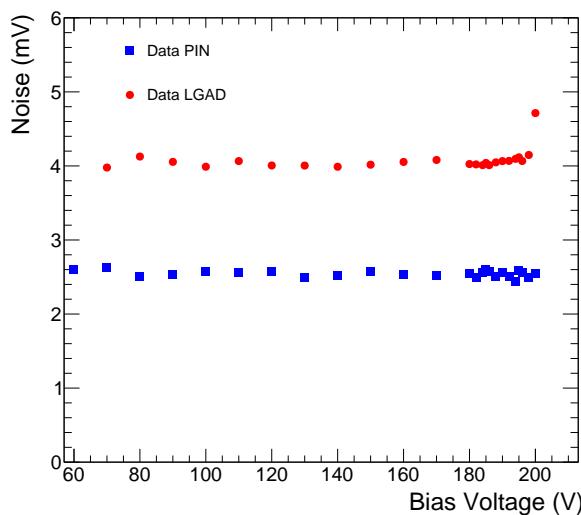


図 4.8: AC-LGAD 検出器のノイズの電圧依存性

横軸が電圧で縦軸がノイズ、青点が PIN で赤点が LGAD の測定値

4.3 ジッターの評価

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 2.3.2 を用いて、PIN と LGAD のジッター σ_j を求めた。図 4.9 に LGAD 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 LGAD 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。LGAD 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。LGAD 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。

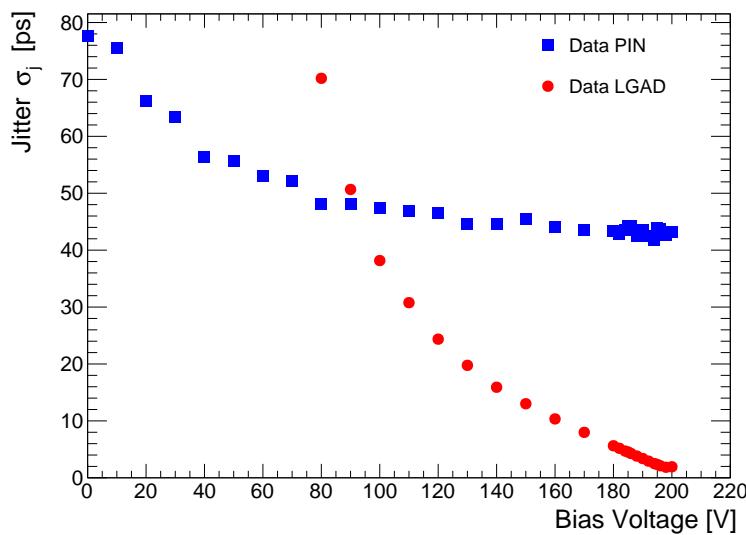


図 4.9: AC-LGAD 検出器のジッターの電圧依存性

横軸が電圧で縦軸がジッター、赤点が LGAD で青点が PIN の測定点

さらに、図 4.10 に、LGAD 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 の增幅率依存性を示す。横軸が增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。時間分解能は增幅率が大きくなると悪化するのに対して、ジッターは增幅率が大きくなると減少していることがわかる。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、特に增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。

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。図 4.11 にその結果を示す。縦軸が時間で横軸が增幅率である。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 0~20 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。增幅率が小さい領域では、時間分解能とジッターの差は增幅率が上昇とともに減少し、增幅率が 15 倍以上の領域では、增幅率の増加と共に上昇することがわかった。時間分解能とジッターの差の最小値がおよそ 15~20 倍の領域で約 9 ps あるということが、レーザーの 10 ps 未満のタイミングジッタの影響を示していると考える。

時間分解能とジッターの差の最小値 9.34 ps をレーザーのタイミングジッターとして、その影響を差し引いた結果を図 4.11 の緑点に示す。緑点が時間分解能を悪化させる要素である、增幅率が大きくなることで増加する過剰ノイズの様子を示していると考える。過剰ノイズは增幅率がおよそ 35 倍以上でジッターに対して支配的になることがわかった。以上の結果と第 3 章の時間分解能が良い増幅率が 20~35 倍という結果から、時間分解能が良い増幅率では過剰ノイズの影響が小さいと考えられる。

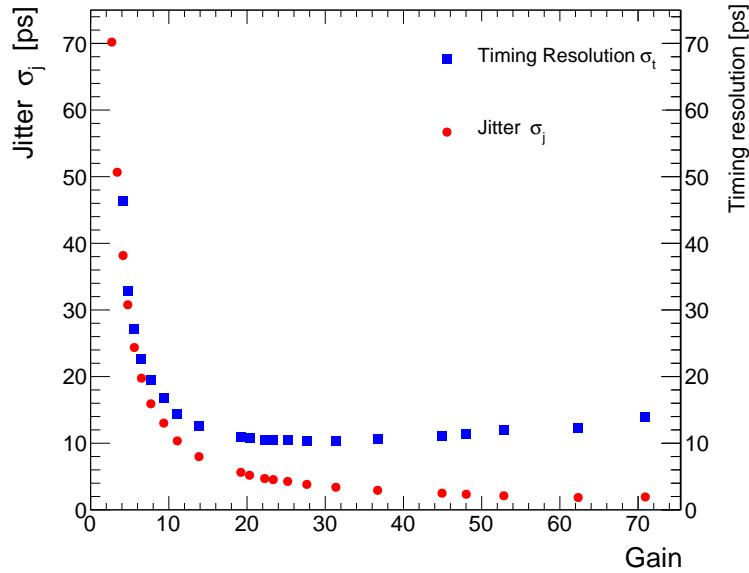


図 4.10: AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターの増幅率依存性

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

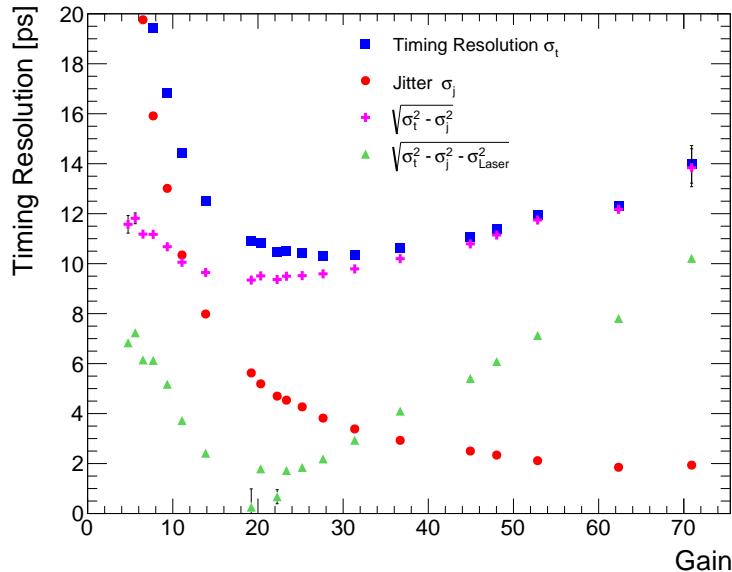


図 4.11: AC-LGAD 検出器の時間分解能とジッターとその差の増幅率依存性

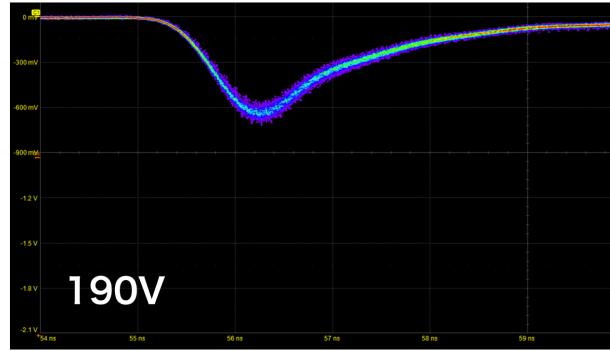
横軸が増幅率で縦軸がジッターと時間分解能、青点が時間分解能で赤点がジッター、ピンクの点が時間分解能とジッターの差、緑点がピンク点からレーザーのタイミングジッターを差し引いた結果

4.4 時間分解能を悪化させる要素の考察

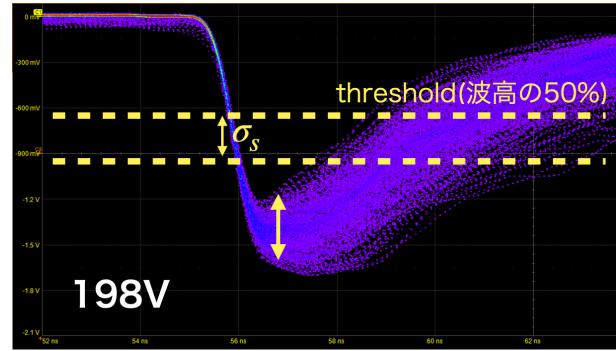
図 4.11 から、35 倍以上で過剰ノイズと考えられる影響が支配的になることで、時間分解能が悪化することを示した。時間分解能が良い 190 V と悪い 198 V の波形を比較することで、この時間分解能が悪化する要因の考察を進める。

図 4.12a に 190 V の波形、図 4.12b 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。198 V の波形を見ると、波高が小さい波形よりも波高が大きい波形の方が、波高が最大の時の時間が遅いことがわかる。これは、検出器内で生成された電子が電極に向かって進む際に、高電場による電子雪崩によって新たに電子正孔対を発生させ

る過程が何度も繰り返され、その過程の回数が多いほど、電子の数が増えることによって信号が大きくなり、その信号が電極に誘起される時間が遅くなるからであると考える。この過程によって生じる信号由来の波高の揺らぎが、最大波高の 50 % にばらつき σ_s を与え、それによって到達時間のばらつきを増加させ、時間分解能が悪化に影響していると考える。



(a) 190V の信号の波形



(b) 198V の信号の波形

図 4.12: 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、增幅率が増加すると波高の 50 % のばらつき σ_s の影響が大きくなる。

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、LGAD 検出器を作成し、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、LGAD と PIN の信号の大きさの電圧依存性を測定した。LGAD 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。LGAD 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、LGAD 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。

LGAD と PIN の時間分解能の電圧依存性の比較を行った結果、LGAD は電圧が上昇すると、時間分解能が最小値をとり、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。LGAD 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 5 倍程度に改善することがわかった。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 2.3.3 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べた。

LGAD 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。

LGAD 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。LGAD 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、LGAD 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った。

レーザー測定から求めた時間分解能から、ジッターとレーザーのタイミングジッターの影響を差し引いた結果、増幅率が大きくなることで増加する過剰ノイズと思われる影響がみられた。過剰ノイズは、増幅率が 35 倍以上になると、ジッターと比べて支配的になることがわかつた。以上の結果と第 3 章の時間分解能が良い増幅率が 20~35 倍という結果から、時間分解能が良い増幅率では過剰ノイズの影響は小さく、時間分解能にほとんど影響しないと考えら

れる。

第6章

謝辞

本研究および卒業論文の執筆にあたって、多くの方々の力添えをいただいたことをこの場で感謝申し上げます。

指導教員である廣瀬茂輝先生は、卒業論文の添削や書き方のアドバイスを始め、口頭発表や資料作成についてなど大変多くのご指導をいただきました、さらに、一人前の研究者になるために必要な考え方や、それに向けてのアドバイス等も含めて本当に手厚いサポートしていただきました。

高エネルギー加速器研究機構の中村浩二さんには、測定装置や検出器の仕組みや使い方、苦手だったデータの解析方法について、お忙しい中でも丁寧に教えていただきました。そして、研究結果について一緒に議論してくださった際には、自分では考えつかないような目線からの意見やアドバイスをいただき、新たな見方や考え方を得ることができました。

原和彦先生には、R & D ミーティングや卒業論文の中間発表の際に、LGAD 検出器の性質や偏向板の原理をはじめ、様々な知識や研究のアドバイスをいただきました。教えていただいた知識やアドバイスを生かして、測定結果や研究についての新たな考え方や結果を出すことができました。

LGAD 研究グループの先輩の北彩友海さん、今村友香さん、西野純矢さん、同期の村山由亞くんには、研究室に入つてわからないことだらけだった自分に、測定装置の使い方や解析方法、LGAD 検出器の仕組みなどを丁寧に教えていただきました。一緒に議論を行い、様々な意見をもらうことで私の研究をより深く進めることができました。

素粒子実験研究室の皆さんにはゼミやセミナーなどを通して、数多くの素粒子物理学の基礎知識や研究内容について学ぶことができました。また、LaTex の使い方について教えていただき卒業論文の執筆をスムーズに進めることができました。

卒業研究を通して、たくさんの知識と経験、考え方を身につけることができました。この1年間を乗り越えられたのは、皆さんのご支援があったからこそです。ここに卒業研究を支援していただいた皆さんへ感謝の意を表します。

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] S. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. 産業図書株式会社, 2012.
- [5] 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.
- [6] 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>
- [7] 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.
- [8] N. P. KATANA. [Online]. Available: https://www.japanlaser.co.jp/nkt-photonics_onefive-katana/