■ 研究紹介

高時間分解能半導体飛跡検出器 (AC-LGAD) の開発

KEK 素粒子原子核研究所
中 村 浩 二
koji.nakamura@kek.jp

2025 年 (令和 7 年) 2 月 16 日

1 はじめに

約 10 年前の 2015 年頃，シリコン半導体飛跡検出器に関する国際会議では，増幅機能を備えた Low Gain Avalanche Diode (LGAD) が活発に議論されていた。当時の LGAD 開発の主な動機は，10-30 倍の増幅率を達成することにあったと記憶している。最小電離作用を受けた粒子（MIP 粒子）がシリコン空乏層を通過する際，1 µm あたり約 80 個の電子・正孔対が生成されるが，10 倍の増幅率を有する LGAD 検出器では約 800 個/µm として観測され，後段の増幅器に依存せずとも高い信号・ノイズ比を実現する検出器が可能になる。この増幅は，シリコンに 300 kV/m 以上の高電場をかけることで，PN 接合においてなだれ増幅（アバランシェ増幅）を引き起こすというシンプルな原理に基づいている。一般的な n^+-in-p 型半導体検出器の電極付近に p^+ をドープし，高電場を意図的に生成することで，アバランシェ増幅を利用して増幅機能を持たせた検出器が LGAD である (図 1(a))。

このアイデアはすでにシリコンフォトマルチプライアー（Si-PM）などの光検出器で実現されており，浜松ホトニクス製の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) は光電子増倍管に代わる光検出器として広まりつつあった。LGAD はこの光検出器の技術を飛跡検出器用に最適化したものである。

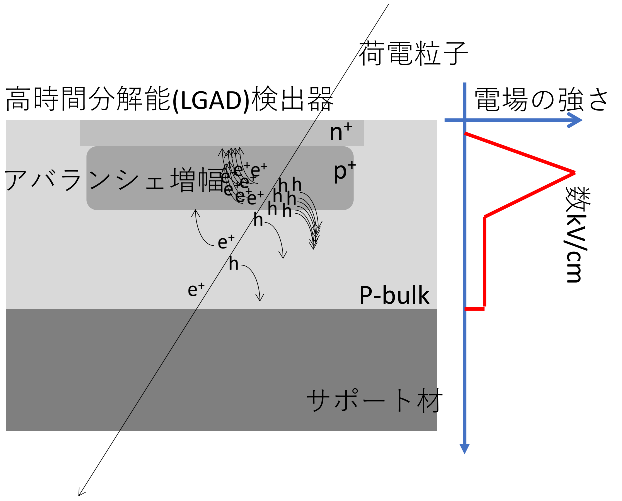
2015 年当時，浜松ホトニクス社と共同で，LHC ATLAS 実験の高輝度化アップグレード用検出器の開発を進めていたが，浜松ホトニクス社がすでに MPPC 技術を確立していたことから，LGAD の開発にも協力してもらい，最初のプロトタイプセンサーを製造するに至った。最初に製造されたのは，図 1(b) に示すように有感領域 1 mm 角のセンサーと 80 µm 間隔で 10 mm 長のストリップ型検出器で，有感厚は 50 µm であった [1]。基本的な電流・電圧特性，静電容量・電圧特性，増幅率の測定を行い，基本性能を確認した後，フェルミ国立加速器研究所のビームラインに持ち込み，時間分解能を測定した。その結果，この最初の 1 mm 角のセンサーの試作品で 31 ピコ秒 (ps) の時間分解能を達成した。一方，ストリップ型センサーの性能には多くの課題が残った。80 µm ピッチの電極に対し，増幅率が十分に得られる領域（以下，有感領域）は全体の約 20%にとどまり，残りの領域では電場が不十分で増幅率を得られず，一様性も非常に悪い検出器であった。

本稿では，こうした課題を踏まえ，高い時間分解能を維持しつつ，不感領域の解消と応答の一様性向上を目指した研究開発について紹介する。

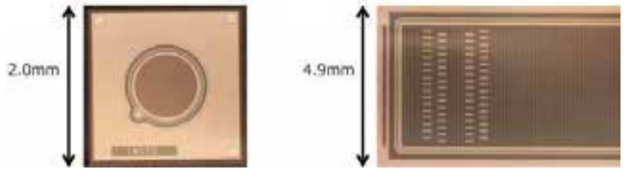
2 飛跡検出器の時間分解能

素粒子標準理論の検証はこの 10 年で飛躍的な成果を上げてきた。CERN 研究所で世界最高エネルギーで運転中の LHC 実験では，ヒッグス粒子の発見以来，ヒッグス機構がゲージボソンの質量の起源であること，同じ機構がフェルミ粒子にも質量を与えることを，ヒッグス粒子と素粒子の相互作用を観測することで検証してきた。一方で，ヒッグス場を形成する過程で起こった電弱相転移，暗黒物質の起源，力の統一，物質優勢宇宙の理由等，現在までに未検証な問題が多く存在する。これらの問題を解決すべく，現在運転中，または将来計画されている高エネルギー加速器実験では，さらなる高輝度化，高エネルギー化が必要不可欠となっているだけでなく，衝突点に置かれる検出器にも高性能化が強く求められている。

検出器の高性能化において最も重要な要素の一つは，飛跡検出器における時間分解能の向上である。飛跡検出器は，粒子の通過位置を精度良く測定することで，粒子の飛跡を再構成する検出器であるが，飛跡の密度の増加やより高精度な飛跡の再構成には限界がある。時間情報を付加できる検出器を導入することでこの再構成の効率や精度を飛躍的に改善することが可能である。飛跡検出器において，O(10) ps の時間分解能が実現すると，(1) 4 次元飛跡再構成による背景事象やパイルアップ事象の



(a) LGAD検出器の概略



(b) 最初の浜松ホトニクス社製LGAD検出器

図 1: LGAD 検出器の概略。(a) 一般的な n^+-in-p 型半導体検出器の電極付近に p^+ をドープし，意図的に高電場を作り出した検出器の構造。(b) 浜松ホトニクス社で試作した最初の LGAD 検出器の写真。

除去 (2) 相対論的速度の測定による粒子の種類の同定 (3) 長寿命新粒子の質量スペクトラムの測定など，非常に大きなインパクトがある。一つの例として，2030 年から開始予定の高輝度 LHC 実験では，1 回のバンチ衝突あたり，平均で約 200 個の陽子衝突が起こることが予想される。図 2(上) は 1 回のバンチ衝突による典型的な陽子の衝突点および飛跡を衝突点付近の断面図として示したものである。約 10 mm の領域に多数の衝突点 (パイルアップ) と飛跡が観測されることがわかる。それに対し，図 2(下) は，再構成する飛跡に 30 ps の時間分解能があると仮定したときの，主要衝突が観測された時間付近の衝突のみを選択した際の衝突点と飛跡を示す。再構成される飛跡数が圧倒的に少なくなり，主要衝突点からの粒子のみが選択できていることがわかる [2]。

時間分解能を有する飛跡検出器によってパイルアップ事象の除去が可能になるとほぼすべての物理解析の発見感度の向上が見込まれる。特に，飛跡再構成を用いた同定を行うボトムクォークやタウ粒子の同定は，時間分解能による恩恵が大きい。高輝度 LHC 実験で最重要な結果の一つであるヒッグス粒子の自己結合定数の測定に関しては，二つのヒッグス粒子が存在する事象の生成断面

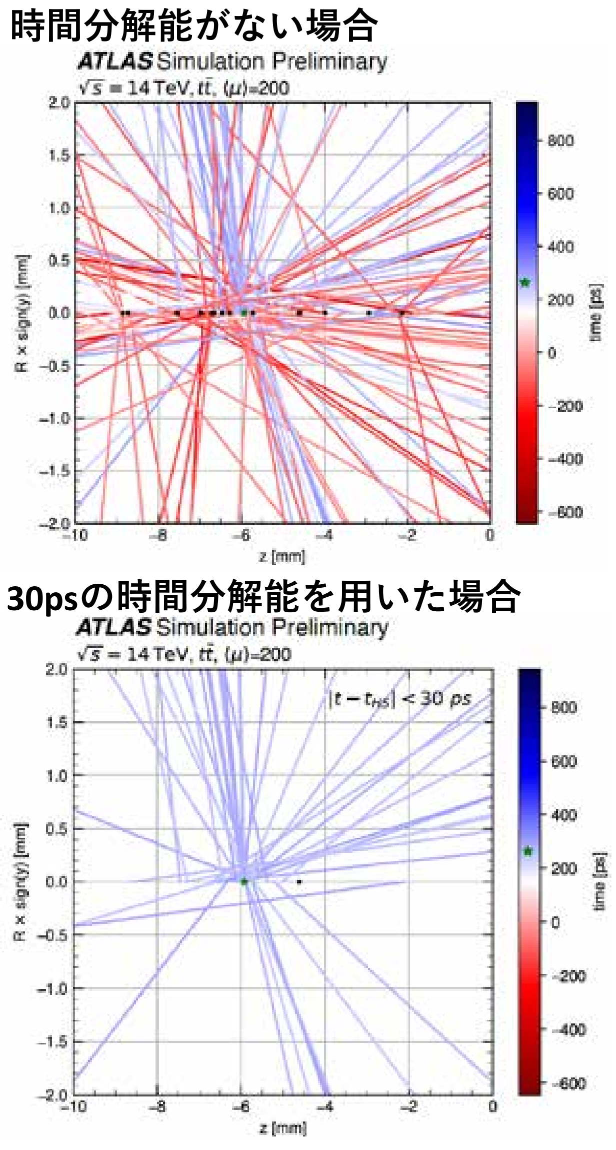


図 2: 時間分解能を持つ検出器によるパイルアップ事象の除去 [2]

積を測定することで行われる。ヒッグス粒子の崩壊過程の中で最も崩壊分岐比が大きいボトムクォーク対への崩壊事象が重要であり，30 ps の時間分解能を持つ検出器の導入で 10%程度の感度の改善が見込まれる。これは，約 20%程度の追加データを取得したことに相当する感度の上昇であり，非常に重要である。ただし，高輝度 LHC 実験に用いられる飛跡検出器のデザインはすでに決定しており，Inner Tracker (ITk) と呼ばれる検出器は時間分解能を有しておらず，高輝度 LHC 実験後半の検出器への導入が可能な最速のタイミングとなる。

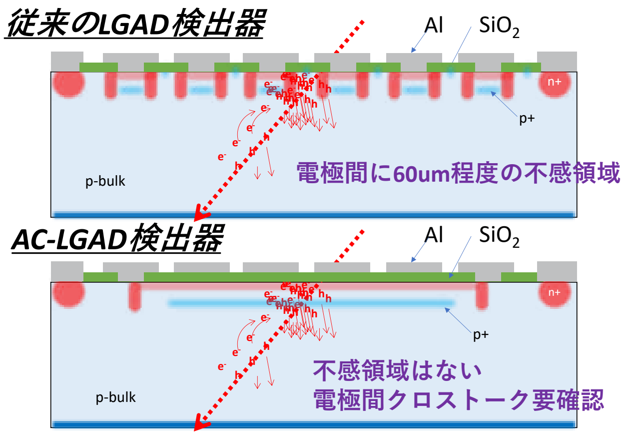
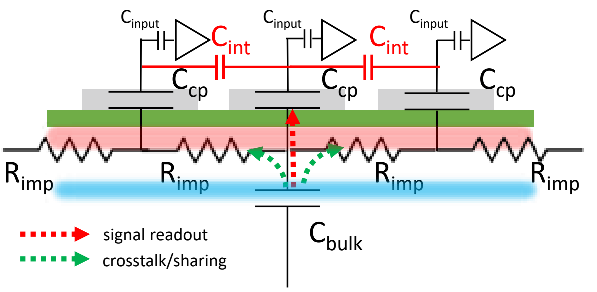


図 3: 従来の LGAD 検出器と AC-LGAD 検出器。AC-LGAD 検出器は増幅層を一様に配置することにより不感領域をなくす工夫を施している。

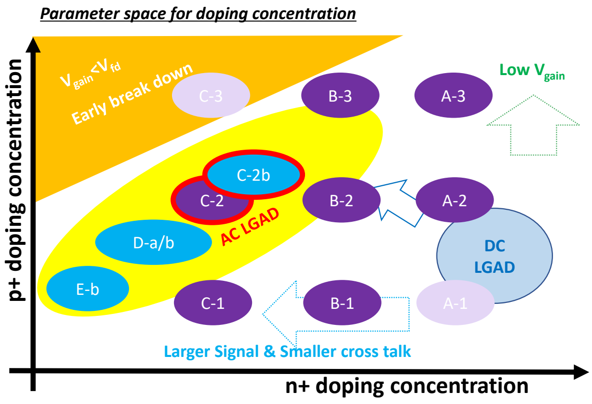
3　位置分解能を持つ LGAD 検出器

第 1 章で述べたように LGAD 検出器の電極を細密化していくと有感領域が小さくなることが高時間分解能と高位置分解能を併せ持つ検出器の開発で一つの致命的な問題であった (図 3(上))。この問題を解決する様々な方法が提案されていた。例えば，電極間にトレンチと呼ばれる非常に狭い溝を掘り，電場を強制的に止めることで電極間の不感領域を最低限にする方法，読み出し面と逆の裏面に一様な増幅層を作り表面から読み出す方法，増幅層を埋め込む方法などである。しかし，我々が電場シミュレーションを行い最適と判断した方法は，増幅層を一様に配置し，酸化膜を介した微細化されたアルミ電極から読み出す，静電容量型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) であった。構造を図 3(下) に示す。増幅された信号は酸化膜の静電容量を介して読みだされるが，一様に配置された電極の影響で，隣接する電極にも電荷が流れる可能性がある (クロストーク)。これは Resistive Plate Chamber (RPC) と似た原理であり，クロストークを抑えるためには n^+ 層の抵抗値を大きくする必要がある。2019 年に浜松ホトニクス社とともに最初のプロトタイプ AC-LGAD センサーを製造し，初めて信号を観測し，国際会議 VERTEX2020 で報告した [3]。

さらなる性能の理解と高性能な AC-LGAD 検出器の開発のため，約 2 年の年月をかけて試作を繰り返し行った。図 4(a) に示す等価回路から，アバランシェ増幅で生成された電荷 (Q_0) は，AC 電極の静電容量 ($C_{\rm cp}$) のインピーダンス ($Z_{C_{\rm cp}}$) を介して読みだされる電荷と，n^+ ドープ層の抵抗値 ($R_{\rm imp}$) のインピーダンス ($Z_{R_{\rm imp}}$) を通って隣接する電極に流れるクロストークに分かれる。読みだされる電荷 (Q) は，それぞれのインピーダンスを



(a) AC-LGAD検出器の読み出し等価回路



(b) ドープ量のパラメータスペースと試作点

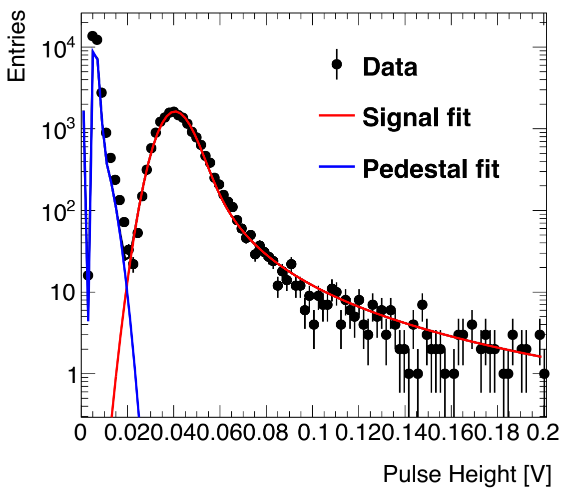
図 4: 読み出し原理とドープ量の最適化。(a) 信号の読み出し原理を示す等価回路。(b) 試作を行ったドープ量のパラメータスペース。

用いて以下の式のように決まる。

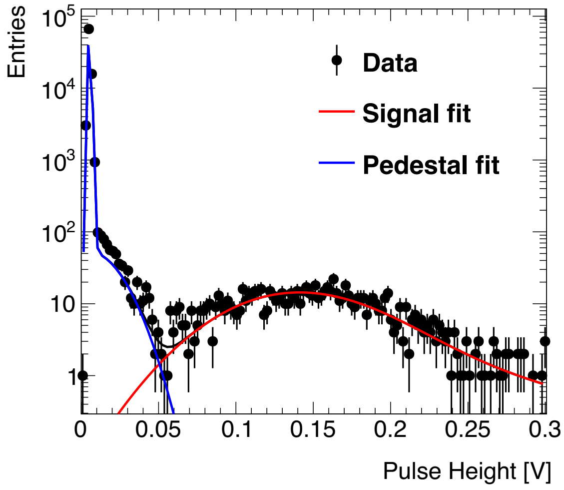
$$Q = \frac{Z_{R_{\rm imp}}}{Z_{C_{\rm cp}} + Z_{R_{\rm imp}}} \times Q_0 \qquad (1)$$

$$= \frac{R_{\rm imp}}{\sqrt{1/(2\pi f C_{\rm cp})^2 + R_{\rm imp}^2}} \times Q_0 \qquad (2)$$

ここで f は信号パルスの実行周波数である。以上のことから，$R_{\rm imp}$ が大きいほど，また $C_{\rm cp}$ が大きいほど読み出し電荷量は大きくなることがわかる。$R_{\rm imp}$ は n^+ のドープ量で，$C_{\rm cp}$ は酸化膜の厚さでそれぞれ制御が可能である。また，p^+ ドープ量を用いて，増幅が得られる際の逆バイアス電圧 ($V_{\rm gain}$) を調整することが可能である。p^+ ドープ量が高いほど低い逆バイアス電圧で増幅が得られるが，高時間分解能を達成するにはキャリアの速度が飽和する電圧を超える電圧を印加する必要があり，$V_{\rm gain}$ はある程度高く設定する。50 μm 厚のセンサーでは約 190 V 程度，20 μm 厚のセンサーでは 120 V 程度が最適である。$V_{\rm gain}$ がこれより低いと，時間分解能が一定となる運転電圧の領域が少なくなり，実機での運転が困難となる。図 4(b) にドープ量のパラメータスペースと試作を行った点を示す。従来の LGAD 検出器 (DC-LGAD) と比較して AC-LGAD のパラメータスペースはより n^+ ドープ量が小さい領域が良い。しかし，



(a) ストリップセンサーの波高分布



(b) ピクセルセンサーの波高分布

図 5: (a)80 µm ピッチ 10mm 長のストリップ型電極をもつセンサーの波高分布 (b)100 µm 角電極を持つピクセル型電極を持つセンサーの波高分布。ピクセルセンサーの方がストリップセンサーと比較して波高が大きい [5]。

ある一定以上 n^+ ドープ量を小さくすると，pn 接合の空乏層領域が n^+ 側に広がり表面に達してしまい早いブレークダウンが起こってしまう。その限界まで n^+ ドープ量を下げた領域が最も細密電極を作ることができるパラメータであった [4]。ただし，RPC 同様に電極をある程度大きく作って，電荷共有を用いて位置分解能を得ることも可能であり，その場合，意図的に n^+ ドープ量を高くしたサンプルが最適となる。

また，アルミ電極間の静電容量 ($C_{\rm int}$) が大きいと，クロストークが大きくなる。長い電極を持つストリップ型検出器は $C_{\rm int}$ が大きくなるため，電極が細密化されたピクセル型検出器と比べて収集電荷効率が悪くなる。これは一般的な半導体検出器に共通する問題ではあるが，AC-LGAD 検出器はより立ち上がりの早い信号であるため，電極間容量に相当するインピーダンスが非常に小さくなり，より顕著なクロストークが観測される。

これらの最適化の結果，80 µm ピッチで 10 mm 長のストリップ型検出器および 100 µm 角のピクセル型検出器が完成した。図 5(a) および 5(b) にそれぞれ出力波高分布を示す [5, 6]。アメリカで計画中の Electron Ion Collider (EIC) や，将来の電子陽電子衝突型実験などの占有率の低い実験用の検出器として，電荷共有法を用いて読み出す 500 µm 角のパッド型検出器も製造していて位置分解能が 10 µm 程度まで達成している。特に，100 µm 角のピクセル型 LGAD 検出器は世界で初めての検出器であるだけでなく唯一我々のグループが製造に成功している。

4　LGAD 検出器と時間分解能

高時間分解能検出器を製造し運転する際には，信号の大きさのばらつきによるタイムウォークおよび読み出し回路のノイズに関して注意深く設計する必要がある。タイムウォークは，パルス信号の到達時間をある定閾値を用いて定義すると，信号サイズが大きいほど到達時間が早くなってしまう問題である。通常，到達時間を信号サイズで補正したり，閾値を波高に対する定比閾値 (Constant Fraction Discriminator, CFD) にすることで影響を最小限にすることが可能である。読み出し回路のノイズは高時間分解能検出器で非常に重要であり，我々の行ってきたセンサー開発だけでなく読み出し集積回路 (ASIC) の性能が大きく影響する。読み出し回路のノイズが時間分解能に与える影響 (ジッター，$\sigma_{\rm j}$) は，ノイズの大きさ ($\sigma_{\rm n}$)，閾値付近での信号の傾き ($|\frac{dV}{dt}|$)，信号のサイズ (S)，立ち上がり時間 ($t_{\rm r}$) を用いて以下の式のようになる。

$$\sigma_{\rm j} = \frac{\sigma_{\rm n}}{|\frac{dV}{dt}|} \sim \frac{\sigma_{\rm n}}{|\frac{S}{t_{\rm r}}|} = \frac{t_{\rm r}}{|\frac{S}{\sigma_{\rm n}}|} \qquad (3)$$

つまり，信号ノイズ比 $\frac{S}{\sigma_{\rm n}}$ が大きいほど，ジッターが小さくなることが分かる。LGAD 検出器は，半導体センサー内で約 10-30 倍の増幅率を持つため，同様の読み出し回路を用いてもジッターが約 1/30-1/10 程度に抑えられることがわかる。これが LGAD 検出器が高時間分解能を実現可能な理由である。

一方で，アバランシェ増幅の増幅率をさらに大きくする，もしくはガイガーモードと呼ばれる領域まで高電圧をかけると，信号増幅の過程での非一様性やショットノイズ (これらをアバランシェノイズと呼ぶ) により時間分解能が悪化する。LGAD 検出器に 1064 nm の赤外線レーザーを入射すると深さ方向に一様なエネルギー損

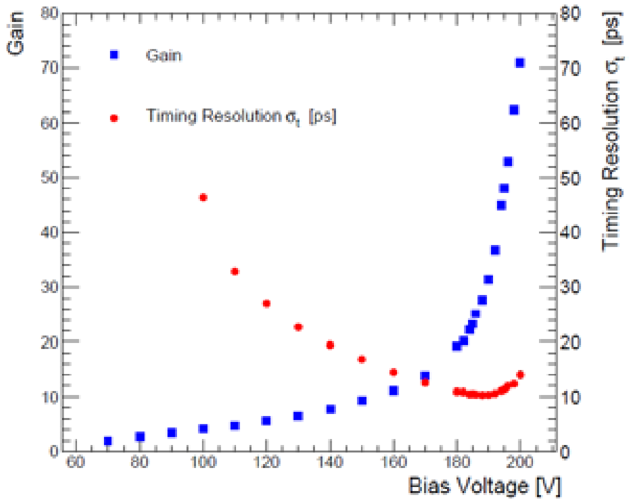


図 6: 信号の大きさと時間分解能の印過電圧依存性

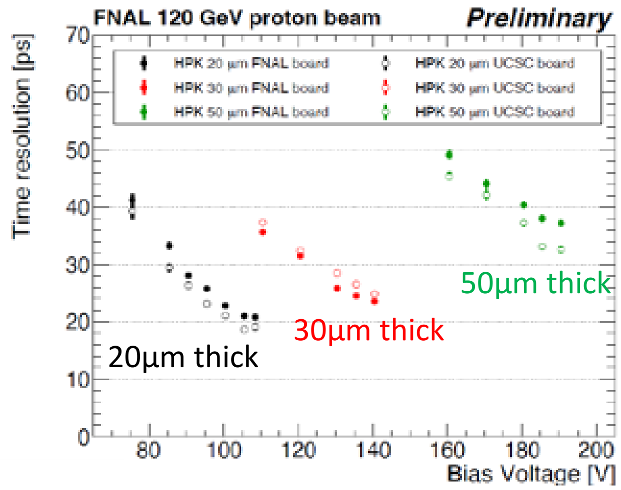


図 7: センサーの有感厚に対する時間分解能。測定はアンプのノイズに敏感なため，フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) およびカリフォルニア大サンタクルーズ校 (UCSC) が作成した 2 種類のアンプ基板を用いて測定した [7]。

失により MIP 粒子と類似した信号を観測することができる。LGAD 検出器と，同様の構造で増幅層の p^+ 層を作らない構造のダイオードの信号出力を比較して増幅率の逆バイアス電圧依存性を評価したものを図 6 に示す。増幅率は 170 V 付近から急激に増加し，200 V では約 70 倍程度になることがわかる。一方で，レーザーのトリガー信号 (ジッターが約 8 ps) との相対時間差から計算した時間分解能は 190 V 付近で最良になり，その後悪化する。これはアバランシェノイズが原因であると推測される。また，190 V 付近の ±5 V 程度の領域で時間分解能が大きく変化しない領域があることが実機を運転する上で非常に重要である。この領域での増幅率は約 20-40 倍程度である。また，$V_{\rm gain}$ が小さいところの領域が小さくなり，非常にピーキーな検出器となってしまうため，最適化が必要であった。

もう一つ高時間分解能を実現するために考慮すべき現象がある。LGAD 検出器は高時間分解能を目指した検出器であるため有感層厚を一般的な半導体検出器と比較して薄くする。典型的には 50 µm 厚の検出器で約 30 ps の時間分解能を達成できる。有感層厚が薄くなると MIP 粒子がシリコン検出器内で落とすエネルギーが深さ方向に非一様になり，信号の到達時刻にばらつきが生まれる。表面付近の増幅層付近で生成した電子正孔対は，移動量が少ないためより早く，信号は小さくなる。一方で裏面付近で生成した電子正孔対は，移動量が大きいため，より遅れて，信号は大きくなる。このばらつきによる時間分解能の悪化を収集電化ノイズと呼ぶ。収集電荷ノイズによる影響で検出器の厚み固有の時間分解能の限界値が存在することになる。Geant4 と半導体電場シミュレータ (TCAD) を用いたシミュレーションでは，収集電荷ノイズによる影響は，50 µm 厚の検出器で約 30 ps 程度，20 µm 厚の検出器で約 15 ps 程度であることと予想される。実際に我々が製造した 50 µm 厚，30 µm 厚および 20 µm 厚のセンサーをプリント基板に実装したディスクリートアンプを用いて行ったテストビーム実験では，それぞれ 35 ps，30 ps および 20 ps の時間分解能を達成した (図 7)。LGAD 検出器で 20 ps の時間分解能を達成したのは我々のサンプルが世界で最初であり，他の企業のサンプルでは現在のところ到達できていない。更なる薄化による時間分解能の向上の可能性はあるが，収集電荷ノイズは，薄くなるほど時間分解能への影響は小さくなる一方で，MIP 粒子が生成する電荷量も小さくなるため必ずしも薄い方がよいわけではない。収集電荷ノイズとジッターのバランスで時間分解能が最良となる厚みが存在するはずである。ただし，ジッターの大きさは，読み出し回路に依存するため，この厚みの最適値は接続する読み出し回路に大きく依存する (詳細は第 5.1 章で述べる)。

5 解決すべき課題

前述したように AC-LGAD センサーの開発は当初予定していたよりも非常に順調に進み，浜松ホトニクス社と共同で開発したセンサーは，世界最高レベルの性能をもつ検出器である。しかし，AC-LGAD センサーを将来建設されるコライダー実験の検出器として用いるには解決しなければいけない問題が存在する。本章では，現在問題解決に向けて取り組んでいる，読み出し回路と放射線耐性に関して紹介する。

5.1　読み出し回路の問題

高時間分解能を有する検出器をコライダー実験の内部飛跡検出器として運用するにあたり，その読み出し回路には多くの要求が存在する。プリアンプおよびコンパレータ，Time to Digital Converter (TDC) にいたるまですべての機能を細密電極内に収める必要がある。また，高時間分解能を達成するため，プリアンプには早い応答が求められ，さらにコンパレータにはタイムウォークの補正が必要となる。また，高速アンプを実装するとアンプの消費電力が増えること，細密化によってチャンネル数が増えることが原因で，冷却システムの高性能化が求められる。

以上のことを踏まえ，高速かつ低消費電力の読み出し回路の設計が必要不可欠である。誤解が無いように断っておくが，LGAD 検出器を用いることで消費電力が上がるわけではなく，一般的に高時間分解能の検出器の読み出し回路は消費電力が非常に高く，LGAD 検出器はむしろ，信号が大きいことから，低消費電力で同様の性能が得られる画期的な検出器なのである。とはいえ，高時間分解能を目指す検出器の読み出し回路を設計する際，低消費電力化が求められることには変わりはない。

近年の読み出し集積回路 (ASIC) は，電界効果型トランジスタ (FET) を基本とした CMOS 集積回路が主流である。一方で，シリコン・ゲルマニウム (SiGe) を用いたヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) は，電流増幅率を維持したまま動作速度を向上させることができるとして注目されている。一般的に高速動作にはベース層を薄くし，抵抗値を下げることが効果的であるが，エミッタ層とベース層にバンドギャップの異なる材質を選ぶことでエミッタからベースへの拡散電流がドリフト電流となりベース領域で失われる電流を最小化する構造である。

ジュネーブ大学で開発中の IHP 社のプロセスを用いた SiGe HBT の読み出し回路と，現在開発中の AC-LGAD 検出器をワイヤー接続して検出器としてのジッター測定を行った。波長 1064 nm の赤外レーザの強度を変えながらジッター測定を行った結果を図 8 に示す。結果として，MIP 相当の信号サイズに対して 8.4 ps のジッターが得られた。消費電力の最適化に関してはこれからの課題である。

現在，高エネルギー業界で主に使われている CMOS プロセス細密度は 65 nm や 28 nm であり，以前と比較して，比較的高性能で省電力を実現する ASIC が製造できる可能性はある。現在，SiGe HBT と CMOS のジッター性能および消費電力量の詳細な比較を行っている。もちろん，プリアンプの性能はアンプの種類によっても大きく異なり，信号の大きさや検出器容量にも依存する。負帰還回路の種類 (トランスインピーダンスアンプかチャージセンシティブアンプかなど) 等の比較も行い，50 µm や 100 µm 角のピクセル型電極をもつ AC-LGAD 検出器に最適なアンプ回路を開発中である。

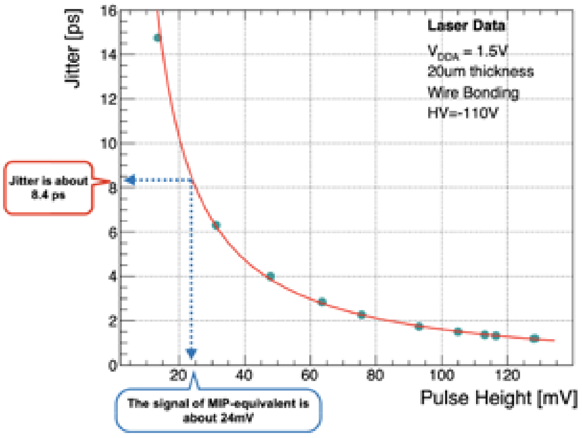


図 8: 赤外レーザーシステムを用いた SiGe HBT ASIC のジッターの波高依存性の測定。矢印は MIP 粒子相当の信号 (24 mV) におけるジッター (8.4 ps) を示す。

この検出器を実際に加速器実験の検出器として運転するには，データ転送に関しても真剣に考える必要がある。比較対象として，現在の ATLAS 実験アップグレード用ピクセル検出器の読出しは，50 µm 角のピクセル電極で 4bit の Time over Threshold (ToT) 情報の読出しが限界である。ネックになるのは，データ転送である。検出器が配置される領域の放射線量は 10 年間の運転で約 500 MRad のイオン化損傷 (Total Ionizing Dose, TID) にさらされるため，光ケーブルなどの高速通信を実現可能な技術が使用できず，フレキ基板 (ポリイミド基材に銅配線) を用いた転送を行う以外に方法はない。

時間分解能を追及すると，タイムウォークの補正が重要になる。現在，主流な方法は，ADC 情報と TDC 情報を両方読み出すことで，時間情報に信号サイズの補正を施す方法であるが，ADC 情報と TDC 情報を両方読み出すことは後段のデータ転送に大きな負担がかかる。Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) で開発中の定比閾値型のコンパレータ (CFD) は，コンパレータの段階でこのタイムウォーク補正を行うことができる画期的な技術であり，TDC 情報のみの読み出しが実現できる可能性がある [8]。

5.2　LGAD 検出器の放射線耐性

ハドロン衝突型加速器実験において，内部飛跡検出器に対する放射線耐性の要求は非常に厳しくなってきている。一般的な半導体検出器の放射線損傷は，酸化膜とシリコン結晶の界面に正電荷を蓄積するイオン化

損傷 (TID) とバルク部に欠陥をつくる非イオン化損傷 (Non-Ionizing Energy Loss, NIEL) の二種類がある。例えば，現在建設中の高輝度 LHC の検出器は，ビームから半径 3.9 cm に設置される検出器では 1 MeV 中性子換算で 1 cm^2 あたり 1.7×10^{16} 個 (以後 n_{eq}/cm^2) の NIEL 損傷まで，さらに 500 MRad の TID 損傷まで耐える必要がある。また，n^+ や p^+ を形成する不純物ドープ層は，この NIEL 損傷によって活性ドーパントが減少すると言う現象が起こる。例えば，ホウ素 (B) をドープした p^+ 層は，活性ホウ素量が放射線損傷によって徐々に減少する。この減少をアクセプターリムーバルと呼ぶ。同様にリン (P) をドープした n^+ 層も，ドナーリムーバルによって活性リン量が減少する。通常電極を構成する不純物ドープ量は 1×10^{20} atom/cm^2 程度であるため，アクセプターリムーバルやドナーリムーバルによる不純物濃度の減少率は小さく特性を変えることはない。高抵抗のバルク部は，1×10^{12} atom/cm^2 程度の不純物密度であるが，放射線損傷によって生成する p^+ 型の格子欠陥の増加量が支配的である。LGAD 検出器は，一般的な半導体同様の損傷を受けるが，増幅層を構成する p^+ 層の不純物密度が 1×10^{16} atom/cm^2 程度となっており，アクセプターリムーバルの効果を受ける。さらに増幅が得られる逆バイアスの値 (V_{gain}) は，p^+ 層の不純物濃度に非常に敏感で，10%程度のアクセプターリムーバルにおいても V_{gain} は大きく増加する。アクセプターリムーバルは，バルク部の損傷を用いてよく研究されている。図 9 に示すように，アクセプターリムーバルで不活性化されたホウ素 (B_i) は，半導体内の酸素と結合して，B_iO_i というドナーのエネルギー準位をもつ欠陥となり，これがアクセプターリムーバルを加速させるとされている [9]。このメカニズムが，不純物密度が 1×10^{16} atom/cm^2 程度の増幅層を構成する p^+ 層でも同様であるかの検証はされていないが，仮説が正しいとすると，放射線損傷は，増幅層内の酸素量に影響を受ける可能性が高いことになる。図 10(a) に放射線損傷による V_{gain} の増加を示す。放射線損傷によって増幅層のアクセプター濃度が減少すると増幅層にかかる電場が小さくなる。本来増幅層に必要な電場を与えるには，さらなる高電圧を印加する必要がある。この結果から 1×10$^{14}n_{eq}/cm^2$ あたり，約 100 V 高い運転電圧を必要とすることがわかる。時間分解能の性能は，増幅層の電場の大きさが確保されていれば放射線損傷によって大きく悪化することはない。放射線耐性の限界は，この運転電圧の上昇率と検出器の耐圧できまる。

まず，検出器の耐圧に関してであるが，基本的には放射線損傷後の半導体センサーの耐圧は 1000 V を上回る。しかし，LGAD 検出器の持つ高い増幅率の影響で，大きなエネルギー損失に対して検出器の熱破壊が起こる現象が観測されている。この現象が観測される条件は，バルク部の厚み方向の平均電圧が 12 V/µm を超えた状態で，通過粒子が，30-40 MeV 程度の大きなエネルギーを落としたときに起こる。図 10(b) に陽子線ビームを用いたテストビーム実験において，粒子通過位置で破壊が起こった様子を示す。この電圧は 50 µm(20 µm) 厚のセンサーでは約 600 V(240 V) となる。つまり，図 10(a) より，放射線耐性は 1×10$^{15}n_{eq}/cm^2$ 程度ということになる。放射線耐性の向上には，アクセプターリムーバルによる，運転電圧の上昇率を抑えることすなわち増幅層を保護する機構を導入するしか方法がないことがわかる。

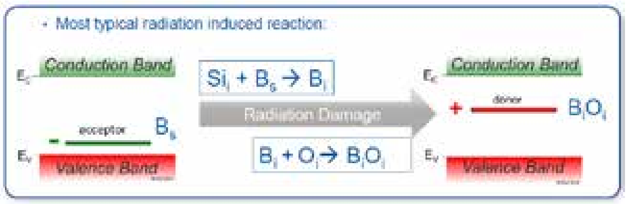
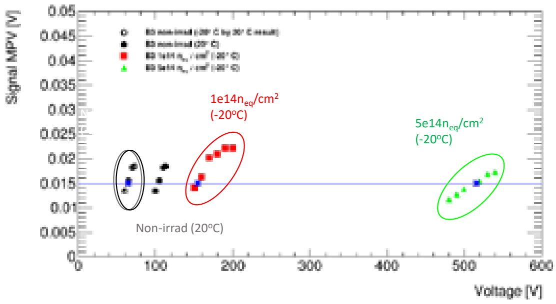
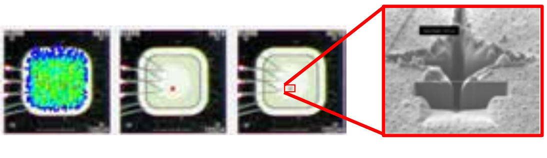


図 9: アクセプターリムーバルのメカニズム。B_i は，不活性ホウ素，B_s は活性ホウ素を示す。アクセプターリムーバルで不活性化されたホウ素 (B_i) は，半導体内の酸素と結合して，B_iO_i というドナーのエネルギー準位をもつ欠陥となり，これがアクセプターリムーバルを加速させる。



(a) 放射線損傷による運転電圧の変化



(b) 高電圧印加時の検出器の破壊

図 10: 放射線損傷後の運転電圧の変化 [4] と LGAD 検出器の破壊の様子 [10]。放射線損傷による増幅層の電場減少を補うため，運転電圧を上げる必要があるが，厚み方向の平均逆バイアス電圧が 12 V/µm を超えるとエネルギー損失の大きな通過粒子による検出器破壊が起こる可能性がある。

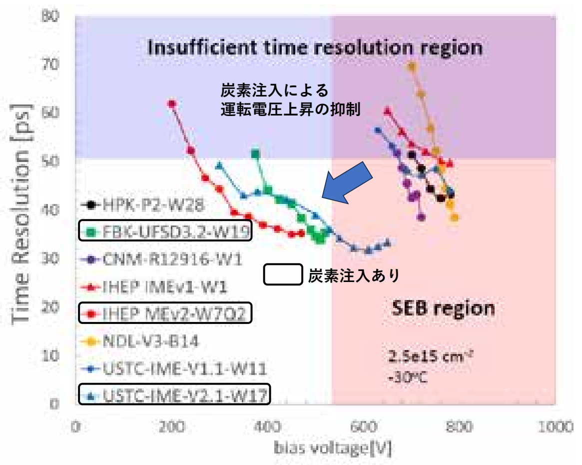


図 11: 炭素アニーリング法による放射線耐性の改善。時間分解能が 50 ps を実現する逆バイアスの値が炭素ドープがないサンプルと比較して炭素ドープを行ったサンプルで大きな改善がみられる [11]。

増幅層を保護する機構の導入は世界中で様々な研究がおこなわれている。次の 4 つの方法が候補として挙げられる 1) 炭素注入法 2)p^+ と n^+ の相殺法 3) 低酸素不純物の実現 4) ホウ素の部分不活性法。現在のところ唯一成功しているのは炭素注入法である。これは，次に示すような反応で，不活性化されたホウ素が炭素と結びつき，ホウ素を活性化するというもので，炭素アニーリングと呼ばれる現象である。

$$\mathrm{B}_i + \mathrm{C}_s \rightarrow \mathrm{B}_i\mathrm{C}_s \rightarrow \mathrm{B}_s + \mathrm{C}_i \qquad (4)$$

炭素注入法はヨーロッパの FBK 社の製造する LGAD 検出器で初めて改善が実証され，今では，中国の企業でも実用化されている。図 11 に炭素アニーリング法による放射線耐性の改善の様子を示す。時間分解能が 50 ps を実現する逆バイアスの値が 700 V~800 V 付近のサンプルは炭素ドープがないもの，500 V 以下のサンプルが炭素ドープを行ったサンプルであり，大きな改善がみられることがわかる [11]。

また，2) の p^+ と n^+ の相殺法は，増幅層の p^+ 層としてホウ素とリンを両方ドープし，ホウ素とリンの活性ドープ量の差で p^+ 層を形成する方法である。二つの効果を期待していて，一つはホウ素のアクセプターリムーバルに対してリンのドナーリムーバルが起こりやすい場合は，見かけのアクセプター量の減少が遅くなること，二つ目は，実効ドープ量が多いほどドナーやアクセプターのリムーバルが起こりにくいことである。サンプルを実際に試作して効果を検証したところ，残念ながらアクセプターリムーバルとドナーリムーバルの起こりやすさはほぼ同等であることが分かった。実効ドープ量が多いことでアクセプターやドナーのリムーバルが起こりにくい現象は観測されたが，実効ドープ量が増えるとアバランシェ増幅の増幅率が下がり，時間分解能が悪化するため，この方法での改善は非常に難しい。3) および 4) の実証も行っている。上述した通り，不活性ホウ素が酸素と結びつくことで $\mathrm{B_iO_i}$ というドナー準位を作るため，酸素の除去が非常に重要となる。AC-LGAD 検出器の有感層はエピタキシャル成長で形成しているため，酸素含有量は非常に少ないが，電極の製造プロセスで行われる熱拡散等の影響で基材や表面からの酸素の拡散が起こり非常に高い酸素含有量が検出されている。熱拡散のプロセスの見直しを行うことにより，低酸素含有量のサンプルの製造に成功した。さらに，ホウ素活性化のプロセスを低温で行うことで，初期状態で不活性ホウ素を残すことが可能で，この状態を作ることで初期状態の不活性ホウ素が酸素をクリーニングすることが期待された。しかし，結果として，3) および 4) の方法で製造した試験サンプルの放射線損傷結果は，この方法を行わないサンプルと比較して放射線損傷にほとんど差が見られないことが分かった。このアイデアはアクセプターリムーバルに対する酸素の影響を調べるものであり，そもそも，$\mathrm{B_iO_i}$ というドナー準位がアクセプターリムバルを加速させるという低不純物量におけるメカニズムと増幅層程度の高不純物量におけるメカニズムが異なる可能性が高く，さらなる検証を進めている。結果から推測するには，ホウ素が潤沢にある環境下では，$\mathrm{B_iO_i}$ の欠陥準位ではなく，$\mathrm{B_iB_s}$ という欠陥準位が支配的であるのかもしれない。現在では，1) と 2) の方法を同時にプロセスする試作を行っている。1) でアクセプターリムーバルが抑制されることで，アクセプターリムーバルとドナーリムバルの起こりやすさに差ができ，p^+ と n^+ の相殺法でさらなる改善がみられることが期待されている。

6　まとめと今後

時間分解能と位置分解能を併せ持つ検出器として，AC-LGAD 検出器の開発を行ってきた。センサーの開発は非常に順調で，約 20 ps の時間分解能を達成し，100 µm 角のピクセル型電極を持つ検出器が完成した。検出器の実用化に向けて，読み出し回路の開発が急務であると同時に，ハドロン衝突型加速器実験向けの放射線耐性の改善を行っている。

今後は，電子陽電子衝突型加速器等の要請も視野に，低物質量化の課題にも取り組んでいく予定である。具体的には，超薄型センサーの開発や，センサー読み出し一体型の検出器の開発である。今後も AC-LGAD 検出器の開発の行方に期待してほしい。

謝辞

この研究は，測定器開発センターおよびエネルギーフロンティアグループの協力を得て行っております。また，検出器開発を主導していただいている，筑波大学の方々，特に学生の皆様との活発な議論なしに，この結果は得られませんでした。また本研究は，科研費[19H05193,21H00173,19H04393,21H01099] および日米協力科学事業のサポートを受けています。さらに，検出器試験の機会を提供していただいた，フェルミ国立加速器研究所 FTBF ビームライン，RARiS(前 CYRIC) の放射線照射施設や ELPH ビームライン，KEK の測定器開発テストビームライン (ARTBL) にも大変お世話になりました。今後ともよろしくお願いいたします。

参考文献

[1] S. Wada, K. Ohnaru, K. Hara, J. Suzuki, Y. Unno, K. Nakamura, K. Hanagaki, Y. Ikegami, K. Yamamura, S. Kamada, et al. Evaluation of characteristics of hamamatsu low-gain avalanche detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 924, pp. 380–386, 2019.

[2] Investigating the impact of 4D Tracking in ATLAS Beyond Run 4. Technical report, CERN, Geneva, 2023. ATL-PHYS-PUB-2023-023.

[3] K. Nakamura, S. Kita, T. Ueda, K. Hara, and H. Suzuki. First prototype of finely segmented hpk ac-lgad detectors. In *Proceedings of the 29th International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020)*, p. 010016, 2021.

[4] S. Kita, K. Nakamura, T. Ueda, I. Goya, and K. Hara. Optimization of capacitively coupled low gain avalanche diode (ac-lgad) sensors for precise time and spatial resolution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1048, p. 168009, 2023.

[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. *JPS Conf. Proc.*, Vol. 42, p. 011030, 2024.

[6] T. Imamura, S. Kita, K. Nakamura, and K. Hara. Development of HPK Capacitive Coupled LGAD (AC-LGAD) detectors. *PoS*, Vol. VERTEX2023, p. 032, 2024.

[7] I. Dutta, C. Madrid, R. Heller, S. Nanda, D. Shekar, C. S. Martín, M. Barría, A. Apresyan, Z. Ye, W. K. Brooks, W. Chen, G.D'Amen, G. Giacomini, A. Tricoli, A. Hayrapetyan, H. Lee, O. K. Köseyan, S. Los, K. Nakamura, S. Kita, T. Imamura, C. Peña, S. Xie. Results for pixel and strip centimeter-scale ac-lgad sensors with a 120 gev proton beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1072, p. 170224, 2025.

[8] S. Xie, A. Apresyan, R. Heller, C. Madrid, I. Dutta, A. Hayrapetyan, S. Los, C. Pena, and T. Zimmerman. Design and performance of the Fermilab Constant Fraction Discriminator ASIC. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A1056, p. 168655, 2023.

[9] M. Moll. Displacement damage in silicon detectors for high energy physics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 65, No. 8, pp. 1561–1582, 2018.

[10] L. Beresford, D. Boumediene, L. C. García, L. Corpe, M. D. C. S. de Sousa, H. El Jarrari, A. Eshkevarvakili, C. Grieco, S. Grinstein, S. Guindon, et al. Destructive breakdown studies of irradiated lgads at beam tests for the atlas hgtd. *Journal of Instrumentation*, Vol. 18, No. 07, p. P07030, 2023.

[11] ATLAS-Collaboration. Atlas high-granularity timing detector (hgtd) public plots. 2022. `https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HGTDPublicPlots`.