

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) LGAD (low-gain avalanche diode) 検出器は、通常の  $n^+ \cdot \text{in-p}$  接合型半導体センサーの  $n^+$  インプラント直下に高濃度の  $p^+$  層を埋め込む CMOS プロセスで製作できる半導体センサーである。 $n^+ \cdot p^+$  接合部の高電場でアバランシェ増幅が局所的に起きるために、30ps 程度の高い時間分解能をもつ粒子センサーとして検討され始めていた。原形の LGAD では読み出し電極を区切るために、 $n^+ \cdot p^+$  接合部も区切る。その部分は増幅されない領域となるが、例えば 1.3mm 角の電極サイズではほぼ無視でき、CERN の次期高輝度 LHC での ATLAS や CMS 実験では、時間分解能に優れた特色を生かして前方カロリメータ直前に LGAD での粒子検出を行う設計が進められた。
- (2) 我々グループも浜松ホトニクス社と共同で LGAD 検出器を設計・試作し、80 $\mu\text{m}$  ピッチに細分化したストリップ型 LGAD で応答一様性を評価した。原形の LGAD では電極細分化は不可能であることを明らかにした (文献①)。
- (3) 時間分解能に優れた LGAD で位置分解能にも優れた検出器を作成できれば、将来の高輝度加速器実験における粒子数密度が高い環境下でも動作する飛跡検出器として有望な候補となる。そのような位置・空間分解能に優れた 4 次元飛跡検出器が実現できれば、飛跡再構成での誤飛跡を低減できるだけでなく再構成を簡素化・高速化でき、また、重い新粒子を飛行時間から計測できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

- (1) 高粒子密度環境下で高位置分解能を実現するには、電極の細分化が不可欠である。LGAD で一様な増幅を保ち電極を細分化する方法を TCAD シミュレーションにより設計する。
- (2) 電極細分化のための設計・試作を進め、4 次元飛跡検出器として使えるセンサーを開発する。この開発には、放射線耐性の向上も含む。
- (3) 読み出しアンプを表面実装で開発し、センサー評価に用いる、とともに、いくつかの読み出し ASIC の情報を入手し、多チャンネル読み出しに必要なエレクトロニクスの開発に必要な情報を集める。

## 3. 研究の方法

- (1) 高粒子密度環境下で高位置分解能を実現するには、電極の細分化が不可欠である。LGAD で一様な増幅を保ち電極を細分化する方法として、トレンチ加工と電極の AC 結合化 (AC-LGAD) の 2 つを候補とし、TCAD シミュレーションによる設計を行う。
- (2) 製造会社と検討の結果、AC-LGAD が候補となった。電極細分化に伴い、信号量を高く保つこと、隣接電極への信号のもれ (クロストーク) を低く保つことを目標に、センサーの製造パラメータを変えた試作を行い、 $\beta$  線やテストビームを用いて評価を行う。
- (3) 赤外レーザーも用いて時間分解能を評価し、分解能を決めている要素の寄与を定量的に評価する。
- (4) 放射線耐性の改善を目標に試作し、照射実験を行う。

## 4. 研究成果

- (1) 電極の細分化法の検討と AC-LGAD の試作

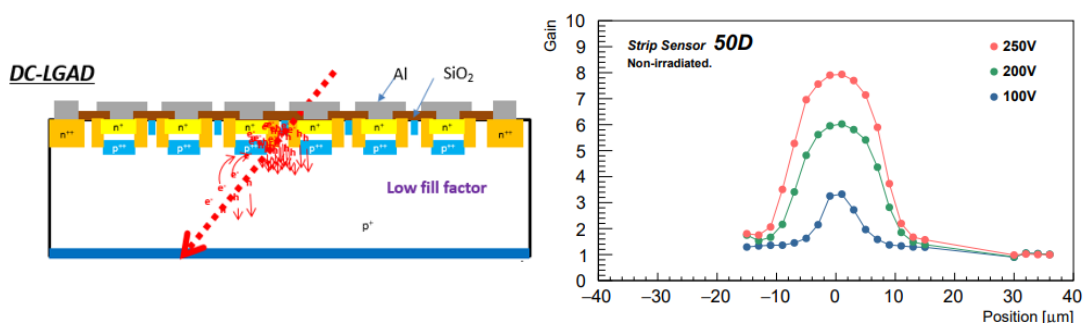


図1 (左) 従来型 LGAD での電極細分化。(右) 80 $\mu\text{m}$  ピッチの電極に細分化したセンサーの応答分布をレーザーで測定した結果 (文献①)。

原形の LGAD (DC-LGAD) では、 $n^+$ 電極に誘起された信号は DC 結合した電極を介して読み出す。電極の細分化に伴い、 $n^+$ 電極を細分化して隣接電極との干渉を止めるための構造が必要であり、図 1 に示すように電極間に増幅部はないために、ゲインが得られる領域は 20% 以下になる。

細分化した DC-LGAD の応答測定の結果は TCAD シミュレーションでの素子パラメータの調整に用い、物理的に溝を掘る **トレンチ加工** を施した場合の応答をシミュレーション評価した。その結果、図 2 に示すように極めて一様な応答性が期待でき、作動電圧範囲も広くとれると評価できた。しかしながら、トレンチ溝周辺の精密なシミュレーションには限界があり、製造会社も高い電圧の動作は保証できず、試作に至らなかった。

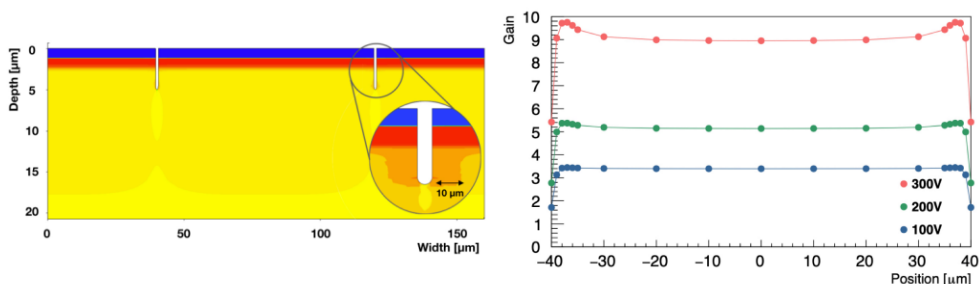


図 2 (左) トレンチ加工での電極細分化のシミュレーション。(右) 80 $\mu\text{m}$  ピッチの電極での応答シミュレーション結果 (文献②)。

次の候補として一様な増幅層と絶縁膜を介して細分化して配置したアルミ電極による AC 的に信号を読み出す **AC-LGAD** の設計を行った。クロストークは  $n^+$ 電極濃度を小さくすることで制御できることが分かった。図 3 は一様な増幅層で発生した信号を 5 本の 80 $\mu\text{m}$  ピッチの電極で読み出す場合の信号応答の位置依存性をシミュレーションしたものである。予期される製造上の問題もないために、AC-LGAD で試作を行った。

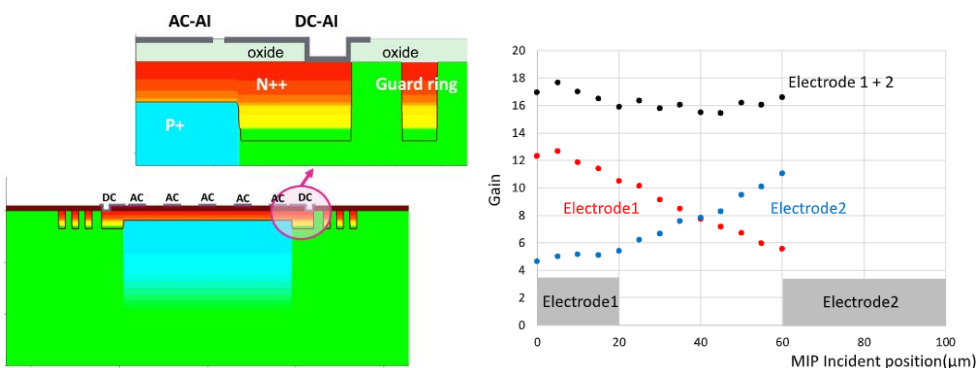


図 3 (左) AC-LGAD での電極細分化のシミュレーション。(右) 80 $\mu\text{m}$  ピッチの電極での応答シミュレーション結果 (文献③)。

#### Equivalent circuit of AC-LGAD

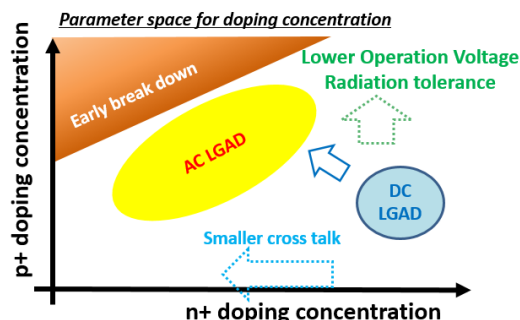
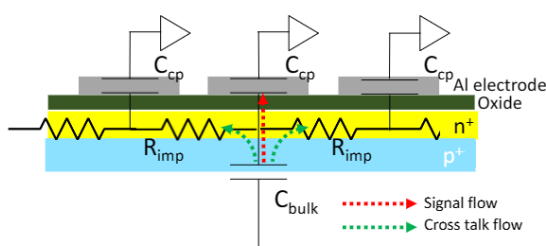


図 4 (左) AC-LGAD での信号読み出しの等価回路④。(右)  $n^+$ 電極濃度と  $p^+$ 電極濃度のパラメータ空間。

図4はAC-LGADでの信号読み出しの等価回路である(文献④)。n<sup>+</sup>電極に誘起された信号は、C<sub>cp</sub>を介して読み出され、n<sup>+</sup>電極のインピーダンスR<sub>imp</sub>よりも十分に大きい必要がある。試作では、酸化膜厚を薄くする等によりC<sub>cp</sub>を3段階で大きくし、またn<sup>+</sup>電極濃度を減らしR<sub>imp</sub>を大きくした6段階のサンプルを作製した。ここでは表1に示す、C<sub>cp</sub>とR<sub>imp</sub>を変えた6種類のセンサー応答の評価結果を次節に示す。尚、p<sup>+</sup>電極濃度もパラメータではあり、濃度を高くすると増幅部電場が高くなり、アバランシェが起きやすくなるために低いバイアス電圧での作動が可能になる。しかし濃度が高すぎるとn<sup>+</sup>電極も空乏化してしまうので、今回の試作では作動電圧が180V程度になるようにp<sup>+</sup>電極濃度を固定した。具体的には、表1のC型は190V、E型は160Vが作動電圧になる。

n <sup>+</sup> resistivity [Ω/□]	C <sub>cp</sub> [pF/mm <sup>2</sup> ]		
	600	240	120
1600	E600	E240	E120
400	C600	C240	C120

表1 試作した代表的なAC-LGADのn<sup>+</sup>電極抵抗R<sub>imp</sub>と読み出し接合容量C<sub>cp</sub>の組み合わせ。

## (2) AC-LGADの試作評価(電極細分化)

表1の条件で作成したピクセルセンサーの応答を<sup>90</sup>Srのβ線を用いて評価した。信号は新たに開発した16chの高速アンプ(文献⑤)で増幅したのちに、CAEN DT5742 デジタイザーで中央の4×4のピクセルを読み出した。E600型のピクセルに対する応答例を図5左に示す。図はトリガーのタイミング(30ns以内)で最大の振幅を示したチャンネルの波高値を示す。波高が0辺りの事象はβ線が読み出しチャンネルの外側を通った場合で、そのピークと信号分布がきれいに分離できている。図5右には、信号分布の最頻値MPVを表1の全組み合わせに対して比較した。予想通り、大きなC<sub>cp</sub>とR<sub>imp</sub>においてMPVが最大になる。

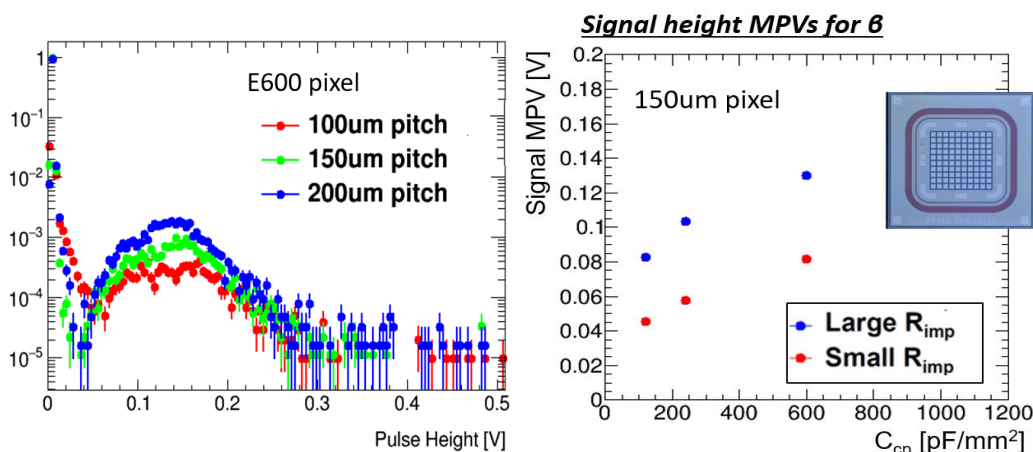


図5(左)表1のE600型のピクセルセンサーのβ線に対する波高分布。3種類のピクセルピッチの比較。(右)150μmピッチのピクセルセンサーに対して、波高分布のMPVを表1の全組み合わせについて示す。青がE型、赤がC型。(文献⑥)

図5左から、信号波高はピクセルピッチにほとんど依らず、これは、電極細分化が問題なく達成できていることを示す。図6には表2の2つのR<sub>imp</sub>の値別にC<sub>cp</sub>が最大であるピクセルセンサーの場合についてMPVのピッチ依存性を示す。いずれの場合も、細分化により信号波高の低下は見られない。これはβ線からの信号の広がり100μmよりは大きく分布しないことを意味する。

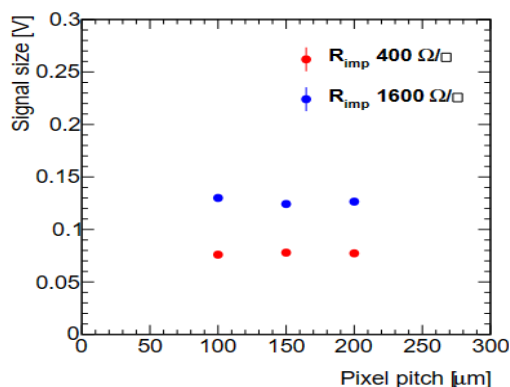


図6 信号MPVのピクセルピッチ依存性

### (3) AC-LGAD ストリップ型センサーの応答

80 $\mu\text{m}$ ピッチで10mm長の電極を配したストリップ型についても同様に $\beta$ 線に対する応答を評価した。図7左は連続する16チャンネルを読み出した際の最大信号の波高分布を示す。MPVは同型のピクセルと比較すると約1/3であるが、これはストリップ電極が長いために隣接チャンネルへのクロストーク量が無視できないためである。図7右は最大波高のチャンネルからの距離の関数としてクロストーク波高を比として示すもの（横軸単位は80 $\mu\text{m}$ ）で、隣接には平均して6割が読み出されることから理解できる。このようにストリップでは複数チャンネルに

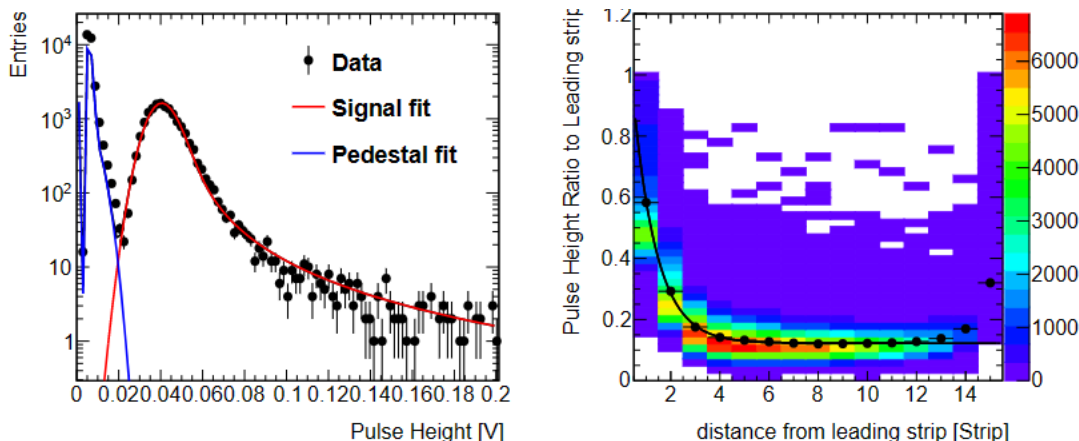


図7 (左) E600型のストリップセンサーの $\beta$ 線に対する波高分布。(右) ストリップセンサーでのクロストーク量を最大波高チャンネルの比として距離の関数で示す(80 $\mu\text{m}$ ピッチ)。(文献⑥)

信号が分割されるが、左図のようにピクセルと同様に優れた信号分離が達成できている。

実際に異なるストリップ長のサンプルを試作して、MPVとクロストーク比(=両隣り波高の和/最大波高)を測定した結果を図8に示す。ピクセルサイズ(100~200 $\mu\text{m}$ )の長さになると、ピクセルと同等の信号量と小さなクロストーク比が実現できている。

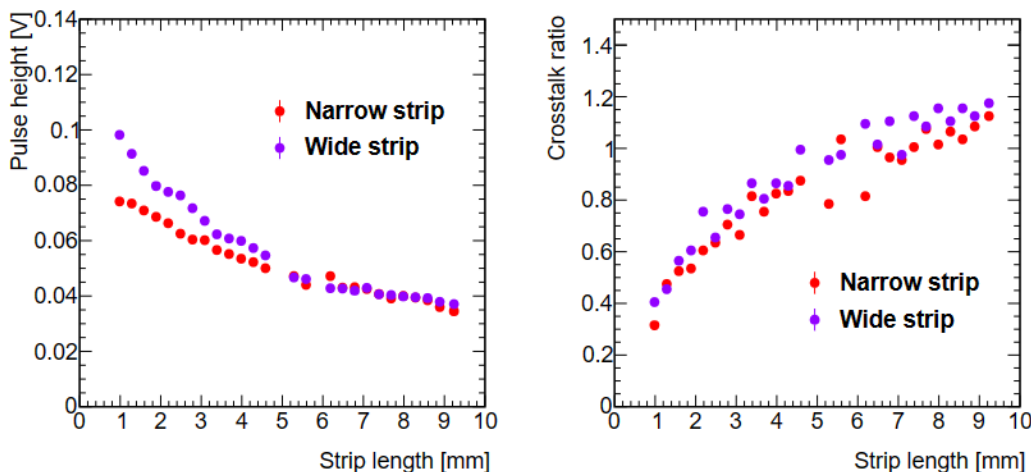


図8 (左) E600型のストリップセンサーの波高MPVおよび(右)クロストーク比のストリップ長依存性。ストリップピッチ80 $\mu\text{m}$ に対してアルミ電極幅はNarrowは40 $\mu\text{m}$ 、Wideは60 $\mu\text{m}$ 。(文献⑥)

### (4) AC-LGADの試作評価(時間分解能)

AC-LGADの時間分解能を500 $\mu\text{m}$ 電極幅のセンサーに対して $\beta$ 線と赤外パルスレーザーを用いて評価した。信号がある電圧に達するまでの時間精度が時間分解能であるが、これは主に3つの要素により決定される。

- (1) タイムウォーク(TW:信号波高が小さいと到達時間が遅くなる)、

- (2) ジッター（ノイズにより波高がぶれると到達時間もぶれる）、
- (3) ランダウ（経路に沿って信号を生成する荷電粒子の場合、場所によって異なる信号量を生成する。増幅層までの距離で時間差が異なるので、この影響により信号波形(=到達時間)は事象ごとにぶらつく）。

TW は最大波高の一定割合の波高を基準電圧にとることではほぼ除外できる。赤外レーザーでは経路により発生信号量が一定なので、ランダウ効果は時間分解能に影響しない。また、ランダウはセンサーの厚みに依存する。

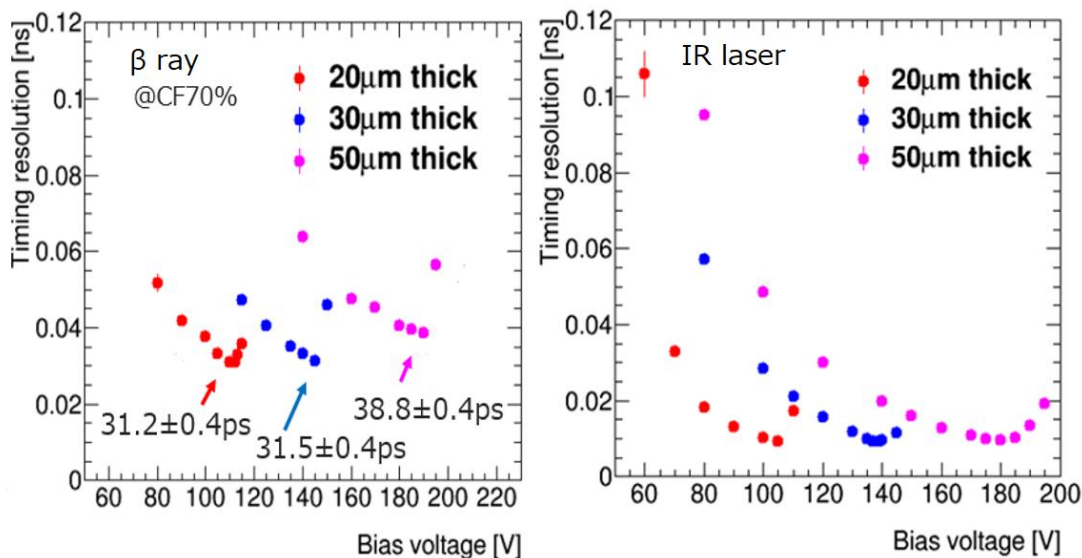


図9 時間分解能のバイアス電圧依存性を3種類のセンサー厚に対して（左） $\beta$ 線および（右）赤外レーザーを用いて測定した。

図9には、センサー厚が標準の50 $\mu$ mに加え30 $\mu$ mと20 $\mu$ mの場合で測定した時間分解能のバイアス電圧依存性を示す。バイアス電圧を上げることでゲインが上がり、信号立ち上がり速度が速くなるためジッターノイズが減少するが、上げすぎるとノイズが増え時間分解能が劣化する。（最小時間分解能領域が、low-gain avalancheの時間分解能が優れている領域である。）IRではジッターのみが影響するので、 $\beta$ 線と比較して時間分解能が小さく、両者の差は $\beta$ 線で特有なランダウの項とみなせる。

測定には時間基準の装置のふらつき（ $\beta$ 線でMCP-PMTの8ps程度、赤外レーザーでは10ps以下）も含まれているので、時間分解能を絶対量としては比較できないが、時間分解能に寄与する要素の影響の傾向は評価できる。右表にはそれぞれの厚みでの最小の時間分解能をまとめたが、ジッターは赤外レーザーでの値から評価し、ランダウの影響は $\beta$ 線と赤外レーザーでの測定値の差として求めた。信号量の多い50 $\mu$ m厚がジッターは最小である。これに対して $\beta$ 線での寄与はランダウが顕著であり、それは薄い20 $\mu$ m厚が最小となる。

	50 $\mu$ m	30 $\mu$ m	20 $\mu$ m
電圧	190V	145V	110V
時間分解能 $\sigma_t$	38.8 ps	31.5 ps	31.2 ps
ジッター $\sigma_j$	9.8 ps	11.8 ps	15.9 ps
ランダウノイズ $\sigma_L$	37.5 ps	29.2 ps	26.8 ps

### (5) 電子ビームによる検出効率評価

荷電粒子の検出効率を東北大 ELPH の 800MeV/c 電子ビームを用いて評価した。飛跡再構成用に ATLAS 実験で用いているピクセルセンサーを5セット配置した。サンプルは 100 $\mu$ mピッチの AC-LGAD ピクセルとして中央の 4 $\times$ 4チャンネルを読み出した。多重散乱のために AC-LGAD での再構成ビームの位置分解能は X 方向 (Y 方向) が 48.7 $\pm$ 7.2 $\mu$ m(105 $\pm$ 12 $\mu$ m)と評価された。図10に X,Y 方向のビーム再構成位置の関数で AC-LGAD にヒットがあった割合を示している。ここで AC-LGAD の各チャンネルはノイズによるヒット割合が 10<sup>-4</sup>以下になる電圧でヒットの有無を判断している。多重散乱のためにまた、読み出していない隣接ピクセルからもクロストークのために通過ビームに応答を示すが、読み出しているピクセルの境界からビーム多重散乱の1標準偏差内側では、検出効率が平坦となり、評価は限定的ながら信頼できる。平坦部

では、X方向で  $97.6 \pm 0.7\%$ 、Y方向で  $97.4 \pm 1.1\%$  が得られたが、この数字には多重散乱の影響がまだ含まれている。図5や7から推定できるように検出効率は十分に高い。

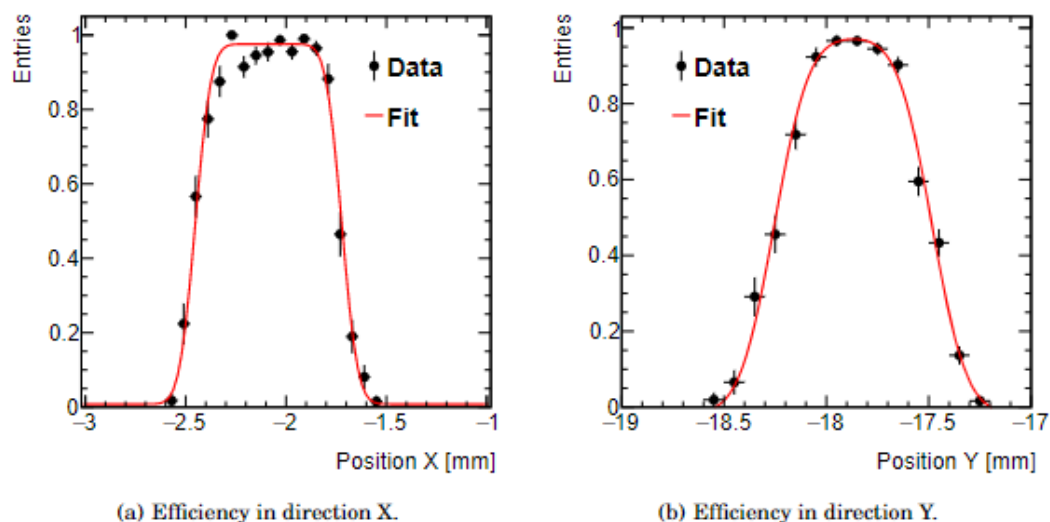


図10 検出効率のビーム再構成位置依存性 (左) X方向、(右) Y方向。

## (6) 放射線耐性

将来の加速器実験で用いるには検出器の放射線耐性は不可欠である。LGAD は増幅層であらゆる不純物密度が照射により減少しその結果、増幅に必要なバイアス電荷が照射量に比例して増加する問題がある (文献⑤)。海外研究グループの報告では、照射により格子からボロンが外れ非活性化することとそれらがウェハ内の酸素と結合してドナー準位を形成することが劣化の要因とした。実際に炭素を注入し酸素と予め結合させることで、放射線耐性の改善に成功している。実用にはさらなる耐性向上が必要である。浜松ホトニクスと協力し

- (1) 補償法：ボロン除去率は濃度を高くすると少なくなることが分かっているので、ボロン濃度を高くする。p+不純物密度を一定に保つためにリンも注入して補償させる、
- (2) 部分活性ボロン法：熱処理を調整することで最初に多めに注入したボロンの一部を非活性化させる。これらは酸素と結合しやすいので照射により酸化ボロンが増加することを防ぐ。

2つの方法による試料を東北大CYRICで  $3 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$  までの陽子線照射をしたところ、(1)は改善とならなかったが、(2)は図11に示すように極めて顕著な改善の初期評価結果を得た。今後は、より詳細に評価をし、炭素注入などもからめた改善法を研究する。

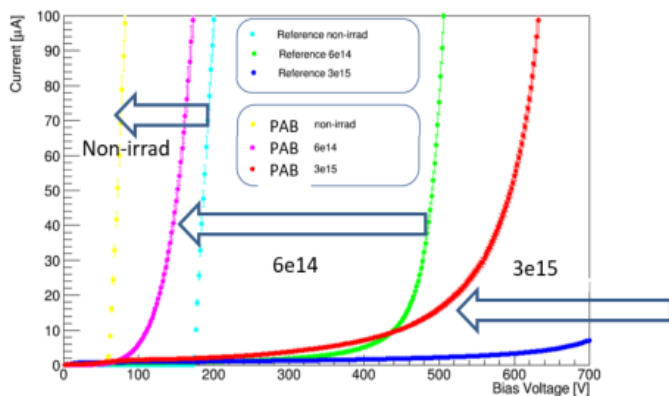


図11 部分活性ボロン法による放射線耐性向上の初期結果。電流値のバイアス電圧依存性を示す。急激に電流が増加する電圧がLGADの運転電圧であるが、部分活性ボロン法を施したサンプルは、 $6 \times 10^{14}$ 、 $3 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$ の照射後、運転電圧が顕著に低く抑えられている。(文献⑦)

## (7) 読み出しエレクトロニクス

LGAD の高速信号を読み出すためには、広帯域のアンプが必要であり、表面実装アンプ開発した。高速 RF アンプである GALI-S66+ を 2 段にし初段アンプとした。このアンプは InGaP を用い 3 GHz までの帯域がある。右にアンプボードの写真を示す。中央にセンサーがワイヤボンドされ、増幅後信号の読み出し SMA コネクタが表裏に 8ch ずつ 16ch 配置されている。6 V 電源で作動する。



アナログ信号の読み出しには、市販のデジタルタイザを用いた。CAEN 社の 16ch デスクトップデジタルタイザ-DT5742 (アナログ帯域 500MHz、12bitADC で 5GS/s) もしくは、LeCroy 社の Waverunner 8208HD (アナログ帯域 2GHz、12bitADC で 10GS/s、8ch) を用いた。時間分解能の評価は、専ら固定波高比分別 (CFD: constant fraction discrimination) 法を用いた。

多チャンネルの LGAD 信号の処理には、最終的にこれらの機能を一体化した読み出し ASIC が必要となる。時間情報も処理できる ASIC としては、ATLAS HGTD 用に設計された、130nm CMOS プロセスによる ALTILOC が代表的で、これは定閾値で測定した信号幅 (ToT, Time over Threshold) と信号到達時間 (ToA, Time of Arrival) と合わせて時間情報を得ている。具体的には 20ps (160ps) のクロック幅で波形の ToA (ToT) を測定し、35ps の時間分解能を実現している (文献⑧)。ALTILOC2 は 225ch の ASIC で、読み出し密度的には 1cm 長のストリップセンサー信号の読み出しが可能である。ただし、消費電力が 4.5mW/ch と高く、飛跡検出器に用いるためには約 1/10 に低減させる必要がある。他にもジュネーブ大が開発中の SiGe バイポーラによる ASIC も評価対象である。

ASIC 開発のために、CFD 法以外で時間分解能が評価できるかを調査した (文献⑨)。テストビームで取得した同一データを用いて、CFD 法と固定閾値を用いた場合の時間分解能を求めた。図 12 に示すように、CFD を用いない場合は、閾値とともに時間分解能が劣化し、CFD 法が有利であることが分かる。

ToT で到達時間を評価する方法を図 13 に示す。一定の閾値  $V_{th}$  を設定し、ToA の代わりに ToT で計測する一定割合  $f$  の時刻をもちいると、図 2 右のように  $f=0.6$  辺りで  $V_{th}$  によらずに安定した時間分解能が得られる。

一定割合  $f$  に縮小した信号を反転し  $\Delta T$  後に元の信号と重ね、波高がゼロになる時間 (ZXC: zero crossing) を求める。概念と評価結果を図 14 に示す。 $f$  への依存性は弱く、適当な  $\Delta T$  の範囲で安定した時間分解能が得られる。

他にも、波形を微分しゼロになる時間からも評価した (微分法)。いずれの方法も良い時間分解能を与える。より簡便で回路実装しやすい方法を選定し ASIC 設計を検討する。

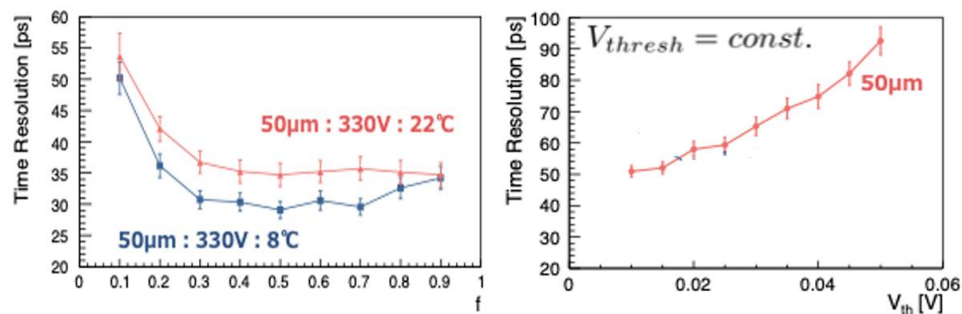


図12 (左) CFD法による時間分解能 (横軸はCFDの定数比)。(右) CFDでなく固定閾値を用いた場合 (横軸は固定閾値)。

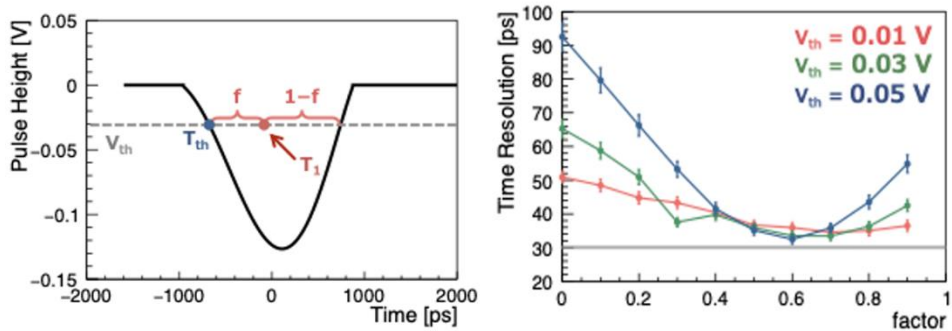


図13 (左) ToT法による時間分解能評価の概念図。(右) ToT法で得られる時間分解能。

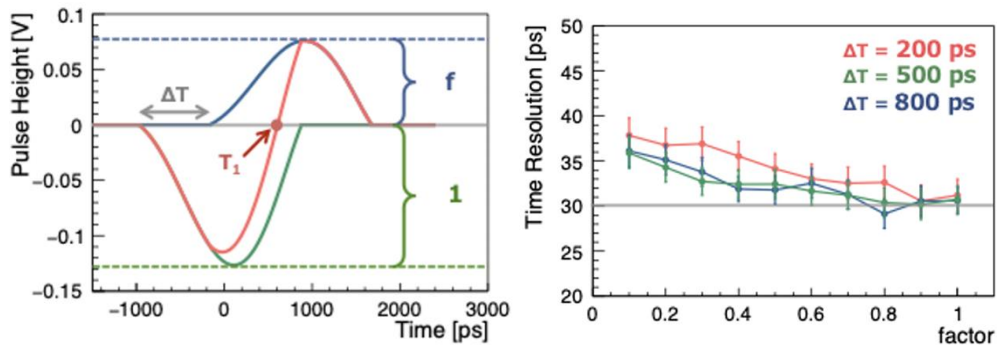


図14 (左) ZXG法による時間分解能評価の概念図。(右) ZXG法で得られる時間分解

## 謝辞

本科研究費研究の遂行において、筑波大学修士課程の和田冨氏、大鳴匡史氏、植田樹氏、北彩友海氏、今村友香氏とともに研究を推進できたことは幸いであり、優れた成果を挙げられたことに深く謝意を示します。日米科学協力事業（代表：中村浩二氏）や筑波大学宇宙史研究センターの研究費も研究遂行のための大きな要素となりました。日米協力の米国側メンバーからは、情報交換をおして多くの知見を得ることができました。照射実験のために、東北大学 CYRIC の陽子照射施設や QST 高崎研究所のコバルト照射施設、またテストビームとして東北大学 ELPH と米国フェルミ研究所 FTBF の両施設に感謝します。浜松ホトニクス（株）での高度なセンサー製造は研究成果への最大のポイントとなりました。深く感謝します。

## <引用文献>

- ① S. Wada et al., "Evaluation of characteristics of Hamamatsu low-gain avalanche detectors", NIM A924 (2019) 380-386; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.143>
- ② S. Wada et al., "Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector", PoS (VERTEX2019) 057 (2020).
- ③ K. Onaru et al., "Study of time resolution of low-gain avalanche detectors", NIM A985 (2021) 164664; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164664>
- ④ K. Nakamura et al., "First Prototype of Finely Segmented HPK AC-LGAD Detectors", JPS Conf. Proc. 34, 010016 (2021); <https://doi.org/10.7566/JPSCP.34.010016>
- ⑤ 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", NIM A1048 (2023) 168009; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.168009>.
- ⑥ S. Kita et al., Talk given at VERTEX2022 workshop at Tateyama, Oct. 2022; submitted to Workshop Proceedings.
- ⑦ K. Hara et al., Talk given at TREDI2022 workshop at Trento, Feb. 2023.
- ⑧ M. Morenas (ATLAS-HGTD Collab.), "Performance of ATLTIROC2 readout ASIC with LGADs for ATLAS HGTD picosecond MIP timing detector", ATL-HGTD-PORC-2022-004 (2022).
- ⑨ 和田冨、4次元飛跡検出のための内部増幅機能付き半導体検出器LGADの基礎研究、筑波大学数理物質科学研究科修士論文 2019. 2.



