

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04393

研究課題名(和文) 高時間分解能を併せもつ高位置分解能4次元半導体検出器の実現

研究課題名(英文) Realisation of 4D Semiconductor Tracker with Fine Spatial and Time Resolutions

研究代表者

原 和彦 (Hara, Kazuhiko)

筑波大学・数理工学系・准教授

研究者番号：20218613

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：位置分解能に優れた半導体検出器に高い時間分解能を併せ持たせた新型のAC-LGAD飛跡検出器を開発した。位置+時間を測定できる4次元検出器は、粒子数密度が高い将来の高輝度加速器実験環境下でも飛跡再構成を可能にできる検出器候補となる。一様なアバランシェ増幅層からAC結合した細分化電極により信号読み出しを行うAC-LGADでは、増幅層の抵抗率やAC電極との接合容量で信号量が決まるため、また、センサー厚に時間分解能が依存するため、これらを最適化し、ピクセル型で100 μm 角、ストリップ型で80 μm ピッチのものでも十分に高い信号を得た。注入ボロンの部分活性化により放射線耐性が向上する兆候を初めて得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子加速器の高輝度化に応じて、飛跡検出器の電極サイズは縮小され次期の高輝度LHC実験では50 μm 角のピクセルセンサーが使用される。将来の一層の高輝度化には、これ以上の細分化は限界であり、空間分解能に加えて時間分解能を飛跡検出に併せ持たせることが有効である。時間情報から正確かつ高速な飛跡再構成、速度の遅い重い粒子の検出が可能になる。LGADは30ps程度の時間分解能を実現できる検出器であるが、これをAC-LGAD方式により優れた空間分解能を併せ持たせ、実用レベルの4次元検出器を世界で初めて実現した。放射線耐性の向上は必須であるが、部分活性化ボロン法により向上を示唆する結果も得た。

研究成果の概要(英文)：A new type of AC-LGAD detector is to add high temporal characteristics to the superior spatial performance achievable by semiconductor detectors. Such a device, capable of measuring space and time, 4-dim. detector, is a good candidate for tracking sensors in future high luminosity collider experiments where the particle density will become high. In the AC-LGAD detector, AC-coupled readout electrodes are segmented over a uniform avalanche gain layer. The resistivity of the gain layer and the AC coupling capacitance are the main sensor parameters, together with the sensor thickness, which have been optimized. As a result, pixel sensors with pixel down to 100 μm square and strip sensors with a pitch of 80 μm have successfully induced large enough signals for traversing rays. Radiation hardening of LGAD has been investigated by a method of "partially activated boron", which turns out to be promising.

研究分野：素粒子実験

キーワード：AC-LGAD 4次元飛跡検出器 半導体センサー アバランシェ増幅 部分活性化ボロン

1. 研究開始当初の背景

- (1) LGAD (low-gain avalanche diode) 検出器は、通常の n^+ -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^+ - 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^+ - 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 μ 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)。
- (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、 β 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

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、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、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。

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。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。

AC-LGAD での信号読み出しの等価回路(文献)によれば、 n^+ 電極に誘起された信号は、 C_{cp} を介して読み出され、 n^+ 電極のインピーダンス R_{imp} 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_{cp} を3段階で大きくし、また n^+ 電極濃度を減らし R_{imp} 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_{cp} と R_{imp} 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^+ 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^+ 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^+ 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^+ resistivity [Ω/\square]	C_{cp} [pF/mm^2]		
	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^+ 電極抵抗 R_{imp} と読み出し接合容量 C_{cp} 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 ^{90}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)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1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1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_{cp} と R_{imp} において MPV が最大になる。

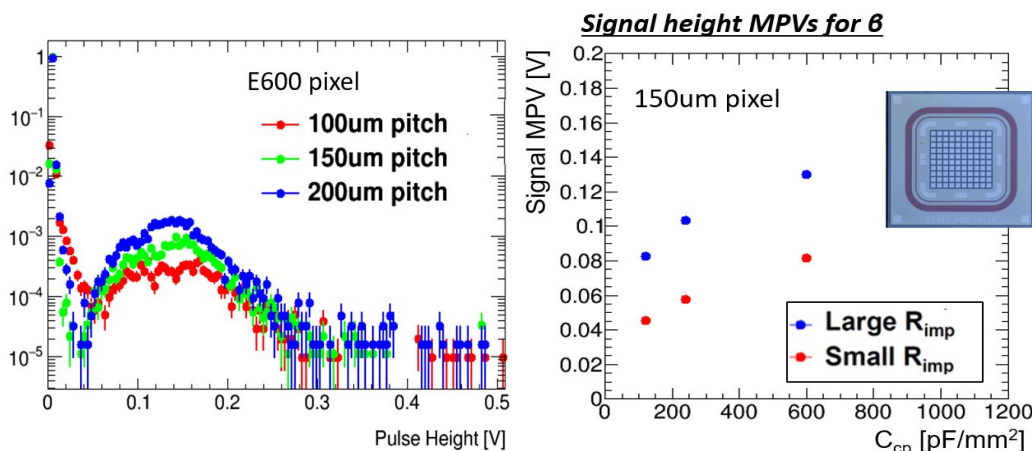


図1 (左)表1のE600型のピクセルセンサーの β 線に対する波高分布。3種類のピクセルピッチの比較。(右)150 μm ピッチのピクセルセンサーに対して、波高分布のMPVを表1の全組み合わせについて示す。青がE型、赤がC型。(文献)

図1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。表2の2つの R_{imp} の値別に C_{cp} が最大であるピクセルセンサーの場合についてMPVのピッチ依存性を求めたが、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が100 μm よりは大きく分布しないことを意味する。

(3) AC-LGAD ストリップ型センサーの応答

80 μm 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 β 線に対する応答を評価した。図2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2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 μm)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。ピクセルサイズ(100~200 μm)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。

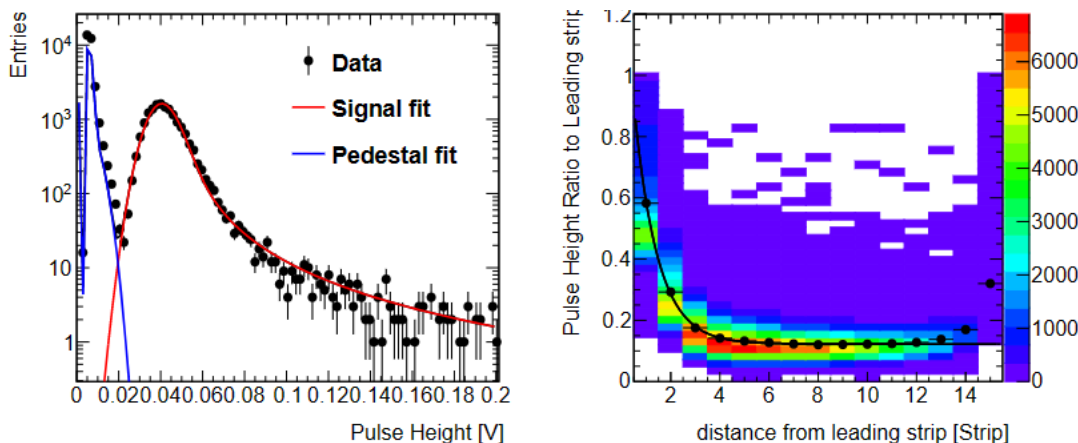


図2(左) E600型のストリップセンサーの線に対する波高分布。(右)ストリップセンサーでのクロストーク量を最大波高チャンネルの比として距離の関数で示す(80 μm ピッチ)。(文献)

(4) AC-LGADの試作評価(時間分解能)

AC-LGADの時間分解能を500 μm 電極幅のセンサーに対して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)は事象ごとにくらぶ)。

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。

センサー厚が標準の50 μm に加え30 μm と20 μm の場合で測定した時間分解能のバイアス電圧依存性を求めた。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。IRではジッターのみが影響するので、線と比較して時間分解能が小さく、両者の差は線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(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150 μm 厚がジッターは最小である。これに対して線での寄与はランダウが顕著であり、それは薄い20 μm 厚が最小となる。

	50 μm	30 μm	20 μm
電圧	190V	145V	110V
時間分解能 σ_t	38.8 ps	31.5 ps	31.2 ps
ジッター σ_j	9.8 ps	11.8 ps	15.9 ps
ランダウノイズ σ_L	37.5 ps	29.2 ps	26.8 ps

(5) 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pp+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)。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 $3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 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)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。

(6) 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、市販のデジタイザーを用いた。CAEN 社の 16ch デスクトップデジタイザー 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。(文献)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)。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。

ToT で到達時間を評価する方法では、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 の時刻を用いると、 $f \sim 0.6$ 辺りで V_{th} によらず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 T 後に元の信号と重ね、波高がゼロになる時間 (ZXC: zero crossing) を求めた。 f 依存性は弱く、適当な 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。

< 引用文献 >

- 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>
- S. Wada et al., "Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector", PoS (VERTEX2019) 057 (2020).
- 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>
- 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>
- 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>.
- S. Kita et al., Talk given at VERTEX2022 workshop at Tateyama, Oct. 2022; submitted to Workshop Proceedings.
- K. Hara et al., Talk given at TREDI2022 workshop at Trento, Feb. 2023.
- M. Morenas (ATLAS-HGTD Collab.), "Performance of ATLATIROC2 readout ASIC with LGADs for ATLAS HGTD picosecond MIP timing detector", ATL-HGTD-PORC-2022-004 (2022).
- 和田 冴, 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Onaru Kyoji, Hara Kazuhiko, Harada Daigo, Wada Sayaka, Nakamura Koji, Unno Yoshinobu	4. 巻 985
2. 論文標題 Study of time resolution of low-gain avalanche detectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164664 ~ 164664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wada Sayaka, Onaru Kyoji, Hara Kazuhiko, Unno Yoshinobu, Nakamura Koji	4. 巻 PoS(Vertex2019)
2. 論文標題 Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.373.0057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wada Sayaka, Onaru Kyoji, Hara Kazuhiko, Suzuki Junki, Unno Yoshinobu, Nakamura Koji, Hanagaki Kazunori, Ikegami Yoichi, Yamamura Kazuhisa, Kamada Shintaro, Abo Yuhei, Tokutake Hitomi, Yamamoto Daiki	4. 巻 924
2. 論文標題 Evaluation of characteristics of Hamamatsu low-gain avalanche detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 380 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.09.143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Koji, Kita Sayuka, Ueda Tatsuki, Hara Kazuhiko, Suzuki Hisanori	4. 巻 34
2. 論文標題 First Prototype of Finely Segmented HPK AC-LGAD Detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 10016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.34.010016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kita Sayuka, Nakamura Koji, Ueda Tatsuki, Goya Ikumi, Hara Kazuhiko	4. 巻 1048
2. 論文標題 Optimization of capacitively coupled Low Gain Avalanche Diode (AC-LGAD) sensors for precise time and spatial resolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 168009 ~ 168009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.168009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Heller R., Madrid C., Apresyan A., Brooks W.K., Chen W., D'Amen G., Giacomini G., Goya I., Hara K., Kita S., Los S., Molnar A., Nakamura K., Pena C., San Martin C., Tricoli A., Ueda T., Xie S.	4. 巻 17
2. 論文標題 Characterization of BNL and HPK AC-LGAD sensors with a 120 GeV proton beam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P05001 ~ P05001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/05/P05001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 O. Jennifer, (...) Goya I., Hara K., Kita S., L. Serge, Nakamura K., P. Cristien, S-M. Claudio, Ueda T., Tricoli., Xie S.	4. 巻 1045
2. 論文標題 Investigation of signal characteristics and charge sharing in AC-LGADs with laser and test beam measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167541 ~ 167541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Kazuhiko Hara
2. 発表標題 Improvement of timing resolution and radiation tolerance for nely segmented AC-LGAD sensors
3. 学会等名 19th "Trento" workshop on advanced silicon radiation detectors (TRED2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北彩友海
2. 発表標題 Recent results of timing resolution and radiation tolerance of nely segmented LGAD sensor (AC-LGAD)
3. 学会等名 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北彩友海
2. 発表標題 新型LGAD 飛跡検出器(AC-LGAD) の電極細密化と時間分解能の研究
3. 学会等名 日本物理学会2023 年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sayuka Kita
2. 発表標題 Development of AC-LGAD detector with ner pitch electrodes for high en- ergy physics experiment
3. 学会等名 The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村友香
2. 発表標題 新型LGAD 検出器(AC-LGAD) の放射線耐性の研究
3. 学会等名 日本物理学会2023 年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原和彦
2. 発表標題 時間分解能にも優れた高位置分解能 半導体飛跡検出器AC-LGADの開発 - 4 D飛跡検出器 -
3. 学会等名 第1回TIA光・量子計測MG研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sayuka Kita
2. 発表標題 Recent development of finely segmented AC-LGAD sensors
3. 学会等名 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北彩友海
2. 発表標題 新型LGAD 検出器 (AC-LGAD) の電極細密化に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2022 年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sayuka Kita
2. 発表標題 Development of finely segmented AC-LGAD sensors by HPK for precisetiming trackers
3. 学会等名 IEEE NSS/MIC Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sayuka Kita
2. 発表標題 A study of AC-LGAD structure for inner pitch readout electrodes
3. 学会等名 US-Japan Hawaii Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koji Nakamura
2. 発表標題 Development of an AC-LHAD sensor with fine time and spatial resolutions
3. 学会等名 宇宙史研究センター光量子部門シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koji Nakamura
2. 発表標題 First prototype of finely segmented HPK AC-LGAD detectors
3. 学会等名 29th international Workshop on Vertex Detectors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村浩二
2. 発表標題 高い時間分解能と位置分解能を併せ持つ新型LGAD飛跡検出器(ACLGAD)開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北彩友海
2. 発表標題 新型LGAD飛跡検出器 (ACLGAD) の信号とクロストークの評価とシミュレーションによる動作原理の検証
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植田樹
2. 発表標題 新型LGAD飛跡検出器 (ACLGAD) の増幅層の放射線耐性に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植田樹
2. 発表標題 高時間分解能半導体検出器 (LGAD) に関する基礎研究と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Wada
2. 発表標題 Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector
3. 学会等名 Vertex2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Onaru
2. 発表標題 Study of time resolution of low-gain avalanche detectors
3. 学会等名 HSTD12 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大鳴匡至
2. 発表標題 内部増幅機能つき半導体検出器(LGAD)のベータ線による時間分解能測定システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大鳴匡至
2. 発表標題 内部増幅機能つき半導体検出器(LGAD)に関する基礎研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

科研費研究 「高時間分解能を併せもつ高位置分解4次元飛跡検出器の実現」
<https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~hara/LGAD.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 浩二 (Nakamura Koji) (00554479)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・助教 (82118)	
研究分担者	海野 義信 (Unno Yoshinobu) (40151956)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他 部局等・名誉教授 (82118)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	和田 冴 (wada Sayaka)	筑波大学・数理物質科学研究科・修士 (12102)	
研究協力者	大鳴 匡至 (Onaru Kyoji)	筑波大学・数理物質科学研究科・修士 (12102)	
研究協力者	植田 樹 (Ueda Tatsuki)	筑波大学・数理物質科学研究科・修士 (12102)	
研究協力者	北 彩友海 (Kita Sayuka)	筑波大学・数理物質科学研究科・修士 (12102)	
研究協力者	五屋 郁美 (Goya Ikumi)	 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	今村 友香 (Imamura Tomoka)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計2件

国際研究集会 The 29th International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020)	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 The 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022)	開催年 2022年～2022年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Fermilab	Brookhaven	UCSC	
フランス	LAL			