

Vertex2022 研究会を終えて

筑波大学数理物質系・宇宙史研究センター

原 和彦

hara@hep.px.tsukuba.ac.jp

2022 年（令和 4 年）11 月 1 日

1 はじめに

Vertex 研究会(International Workshop on Vertex Detectors) はシリコンを主とした半導体飛跡検出器の運転・開発に関する研究会で、1992年にフィンランドのBastö島で1回目、以降毎年開催され、31回目の今年は10月24日～28日に房総半島の先端の館山リゾートホテルに67名の参加者を集めて開催された。

会議はIAC(International Advisory Committee)により選定された招待講演が主であるが、数年前よりポスター発表が追加され、コロナ禍では短い講演となり、Vertex2022では36の30分招待講演、アブストラクトによる選定を経た17の15分講演を数え、活発な議論が行われた。

2 Vertex2022 研究会の概要

2.1 Running Detector

最初のセッションRunning Detectorでは、LHCおよびBelle II 実験グループから、それぞれピクセル型とストリップ型について報告された。LHCでは、予定通りの改修を経てRun3が開始された(LHCb実験のUpstream Trackerは半分がインストール済み)。特にALICE実験の全面MAPS(Monolithic Active Pixel Sensor)によるITS2(Inner Tracking System)や、LHCbのTimepix3チップに基づくVELO(Vertex Locator)は初稼働である。Belle II 実験では全20ラダー入った完全版のPixel Detector 2が来春設置、Silicon Vertex Detectorはタイミング測定も優れ、また放射線によるシリコン型変換が起きた際の特性の評価結果も報告された。

今回初めてATLAS検出器の超前方に設置したFASER実験が順調に稼働開始したことが報告された。また、J-PARCのg-2/EDM実験のシリコン検出器についても最終設計が示された。

2.2 Detector Upgrade

高輝度LHCでの検出器についてLHC各実験グループから準備状況が報告された。ATLAS実験からはピクセル(予備量産を一部開始)やストリップ(センサーの本量産進行

中)など量産・検査体制が確立し、CMS実験からデザイン最終設計中との報告がされた。特にATLASピクセルでは最終設計の様々なモジュールを設置した状態でノイズ評価され、ストリップでは良好な品質検査結果が目された。ALICEからはウェハー自体を曲げるITS3用MAPSセンサーの評価報告、LHCbからはHV(High Voltage)-MAPSによるMightyPixチップのテストビーム結果が示された。

2027年に予定されるBelle IIのupgrade用候補としてDMAPS(Depleted MAPS)によるOBELIX検出器、SOI(Silicon on Insulator)によるDuTipチップ、Thin-fine pitch DSSD(TFP)が示された。TFPについては試作で波高、ノイズの改良が必要との結果が示された。

2.3 ASIC

CMSのupgradeでは飛跡からLevel-1のトリガーを発行するためのASICの設計が示された。来年量産を開始する。

ATLASとCMSのピクセルは65nmのASICをCERN RD53グループと共通開発してきたが、初期評価を経て、ATLASITkPix-V2チップは間もなく、CMS CROC-v2チップは2023年上四半期にサブミットの予定で、これらが最終版となる予定である。

2.4 Monolithic Detector

ALICE等で既にモノリシックが使われているが、実用中や開発中のいくつかについて報告された。

Mu3e実験用のToA(Time of arrival)を含めたHV-CMOSセンサーは6nsの時間分解能を示した。DMAPSで開発したMonopix2センサーは、LFoundry製、TowerJazz製ともに現行実験に必要なレベルの放射線耐性(NIEL:10¹⁵ n/cm² TID:1MGy)を示した。

TPA(2光子吸収)過程により半導体ドーパ分布をレーザー焦点に限定して測定できるシステムがRD50グループで開発され、深さ分布を含めた測定例が示された。

ALICE ITS3用のセンサーdigital MAPSの放射線耐性がALICEの要求(10¹³ n/cm²)を満たす。

SOIを用いた Belle II upgrade 用 DuTip はピクセル毎に 7 ビットカウンターを 2 個搭載したものの機能が実証され、全機能を搭載した DuTip2 を評価中。

FASEER 実験で 1 TeV 程度の π^0 崩壊を検出できるプリシャワー用に SiGe 読み出し MAPS を試作し良好な評価結果を示した。

MALTA (小電極による CMOS) センサーは 2×10^{15} n/cm² の損傷後も十分な検出効率と 1.8 ns の良い時間分解能を示した。

2.5 Other Material

このセッションでは最初に RD50 グループの活動の総括報告がされた。今の形態は 2023 年に終了し、新たに DRD3 グループが結成される。

SiC は 200 mm ウェハが産業的に利用可能となりバンドギャップの広さ、分子結合の強さ、キャリア高速性能、高熱伝導性など放射線耐性・高温環境下動作で注目される。エピで作製したセンサーの高速性が示され、今後 3D 化などが検討されている。

RD42 グループによるダイヤモンドも高放射線耐性が期待でき、多結晶 CVD ダイヤモンドは 8×10^{15} n/cm² の照射後も 10 MHz/cm² までレート依存性ないことが示された。3D 化で 10^{17} n/cm² までの耐性化を目指す。

2.6 Timing

ATLAS High Granularity Timing Detector は LGAD (Low Gain Avalanche Diode) を用い、2023 年に初期量産を開始する。放射線耐性も示され、懸念された高電荷イベントによるセンサー破壊は電圧を下げることで抑制できる。

LHCb VELO は 2030 年代に 20 ps の時間分解能を実現することで現在の事象点検出効率を維持することを目指す。

10^8 陽子/秒の GSI HADES のビームラインに LGAD を挿入し、優れた ToF・ビーム位置モニターを実現した。

AC-LGAD (AC coupled LGAD) の研究として、4DInSiDe グループは電極間電荷分割を利用し、200~1300 μ m ピッチで 10~40 μ m の位置分解能と 20 ps (G=30) の時間分解能を実現し、TCAD シミュレーションも示された。BNL (日米協



Vertex2022 : 館山リゾートホテルのプールサイドで

力) らは、EIC 実験用に 100 μ m ピッチストリップで 6 μ m, 28 ps, 筑波大/KEK は AC-LGAD プロセスを最適化し、100 μ m ピッチのピクセルや 80 μ m ピッチストリップでの信号観測に成功した。

3D による TimeSPOT センサーは 2.5×10^{16} n/cm² 後も単体 10 ps, ASIC を含めて 50ps を実現し、装置の大型化を目指す。

エピ積層に SiGe 回路を載せた PicoAD センサーは 13~25 ps をゲイン層付きで実現し、ゲイン層無しでも 21 ps を実現した。

2.7 Non HEP & Future

PicoAD を積層する 100 μ mPET では従来の PET の空間分解能を 2 桁上げた小動物用 PET の実現を目指している。

将来加速器として BNL の Electron-Ion Collider 用飛跡検出器 (MAPS や AC-LGAD) 設計が紹介され、ILC 用のセンサー候補も紹介された。また、ミューオン衝突器では 50 μ m² ピクセルと 30 ps の時間分解能でビームバックグラウンドによる低エネルギー電子の影響を抑制できることが示された。

3 さいごに

Vertex 研究会のコンセプトは水辺で隔離された場所—そのため宿泊から食事全てを賄い、最低限の移動補助が必要となる。Vertex2020, 2021 はリモートで、今回は 3 年ぶりの対面開催になった。当初、対面開催を危ぶんでいたが、一日 1 万人の入国者数と要ビザの制限下でも開催可能と 7 月 1 日に決定し、開催までこぎつけた。直前の 10 月 11 日からはビザが不要となり、多少の観光が可能となったのはビザ作業がフイとなったことよりもうれしかった。参加者には抗原検査を依頼し、マスク着用も受け入れてもらった。

ホテルの日本食は受けが良かった。エクスカーションでは誕生寺 (日蓮生誕地) での写経体験、鴨川シーワールドでのシャチの水かけなどで心も体も清浄とした後、館山市の居酒屋で鍋料理をともにした。とても高評判であった。

Vertex2022 実行委員として KEK から石川、坪山、中村浩二、原康二各氏と東大の小貫氏が会議に参加頂き、また筑波大の北氏には参加者登録時に尽力を頂いた。筑波大宇宙史研究センターは共催として資金援助、TIA 事務局や浜松ホトニクス、ハヤシレピック、東北マイクロテック、山下マテリアルからは協賛を頂き、LGAD 科研費からの援助も受けた。この場をかりてお礼申し上げる。

サマリートークは原が実行委員長ながら行った。10 年間 IAC を務めてきたが、来年のジェノバ Vertex2023 からは中村浩二氏が原に代わって IAC を務める。

[§]会議 WEB サイト:<https://indico.cern.ch/e/vertex2022>