

ALICE FoCal 中 ALPIDE 像素层的预期性能

Jie Yi^{a,*}, Max Philip Rauch^b, on behalf of the ALICE FoCal Collaboration

^aInstitute of Particle Physics, Central China Normal University, Wuhan, China

^bDepartment of Physics and Technology, University of Bergen, Bergen, Norway

Abstract

ALICE 实验旨在研究大型强子对撞机 (LHC) 中的超相对论重离子碰撞。作为其第四轮运行的主要升级的一部分, 前向 calorimeter (FoCal) 将在第三次长时间停机期间 (LS3) 安装。FoCal 能够精确测量正向快速度下的直接光子产生, 为探测质子和原子核中的胶子分布提供了敏感的探针。

本文介绍了前向电磁 calorimeter (FoCal-E) 的预期性能, 并提出了一些潜在策略以缓解 FoCal-E 的像素层中的占用率和 BUSY 违规挑战。束流测试结果表明, 反向偏压有效降低了像素占用率。同时, SystemC 模拟探索了其他缓解策略——如网格屏蔽和区域触发——以进一步减少 BUSY 违规并提高高亮度条件下的探测器性能。

Keywords: 前向量热计, 电磁量热计, ALPIDE, 探测器性能

1. 介绍

大型离子对撞机实验 (ALICE) 在 LHC 中研究极端能量密度下的强相互作用物质, 重点关注重离子碰撞形成的夸克-胶子等离子体 (QGP) 的性质。正在为第四运行周期开发高精度前向量热仪 (FoCal), 通过测量直接光子、中性强子、喷注及其在前向快速度 ($3.4 < \eta < 5.5$) 的相关性, 以及超外周重离子碰撞 [1] 中的 J/ψ 生产来研究质子和原子核的小- x 胶子结构。

及一个金属-闪烁体设计的强子量能器 (FoCal-H)。为了实现 $\gamma - \pi^0$ 的精细空间分辨率区分, 选择了最初为 ALICE 内部跟踪系统 (ITS2) 开发的 ALICE 像素探测器 (ALPIDE) 用于像素层。

然而, 在高亮度、高占用率环境下操作 ALPIDE 传感器会带来挑战。高占用率可能触发 BUSY 违规 (当内部 ALPIDE 缓冲区被填满时), 这会影响数据完整性和触发效率。因此, 开发缓解策略对于确保 FoCal-E 在 LHC 第四轮运行条件下的性能至关重要。这项工作通过 SystemC 仿真和束流测试数据研究了 FoCal-E 像素层中的占用率和 BUSY 违规问题。

2. FoCal-E 的像素层

对于 FoCal-E, 较小的横向 Shower 尺寸对于优化光子分离和减少占用率至关重要。钨 (W) 因其较小的 Molière 半径 ($R_M = 0.9\text{cm}$) 和短辐射长度 ($X_0 = 3.5\text{mm}$) 而被选中, 允许使用厚度为 $\sim 1 X_0$ 的紧凑几何结构, 这在给定 FoCal-E 适度的能量分辨率要求下是足够的。此外, 这种紧凑的设计最大限度地减少了横向 Shower 扩散, 有助于在高多重性环境中区分重叠的光子 Shower。虽然传统的量热器设计可能将横向单元尺寸设置在 R_M 左右, 但模拟表明, ~ 0.3 毫米的粒度显著有助于 π^0 识别 [3], 改善电磁淋浴重建, 并能够从 π^0 衰变中分离出

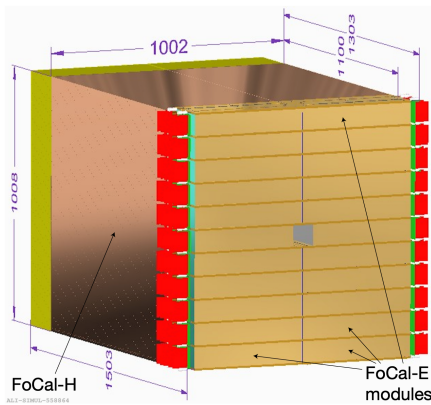


Fig. 1. FoCal 的示意图, 包括 FoCal-E 及其中心开口 ($84 \times 84 \text{ mm}^2$) 用于束管。尺寸单位为毫米 [2]。

FoCal 有两个主要组件 (Fig. 1): 一个高颗粒度电磁量能器 (FoCal-E), 由两层像素和 18 层硅垫组成, 以

*Speaker

两光子，精度约为 1 毫米。这种更细的粒度最终增强了直接光子识别。

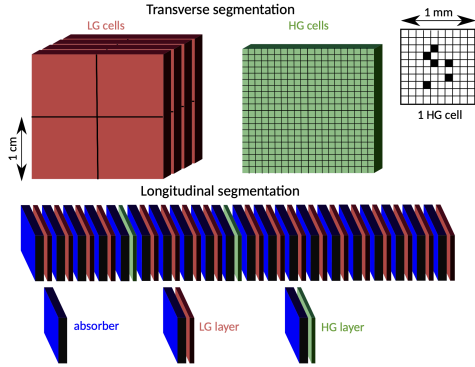


Fig. 2. FoCal-E 的草图，显示了 20 层 Si-W：18 层垫传感器和位于第 5 和第 10 位置的 2 层像素传感器，每层单独读出 [2]。

在 Fig. 2 中，展示了 FoCal-E 的高粒度像素层位于第 5 层和第 10 层，使用了 ALPIDE。其余的 18 层由低粒度垫层组成，横向单元大小为 1 厘米²，并通过高粒度量热计读出芯片 (HGCROC) 对硅垫传感器进行读出和数字化。图中的蓝色区域代表吸收材料，每层包含一块厚度约为 1X₀ 的钨 (W) 板，随后是基于活性硅传感器的结构。

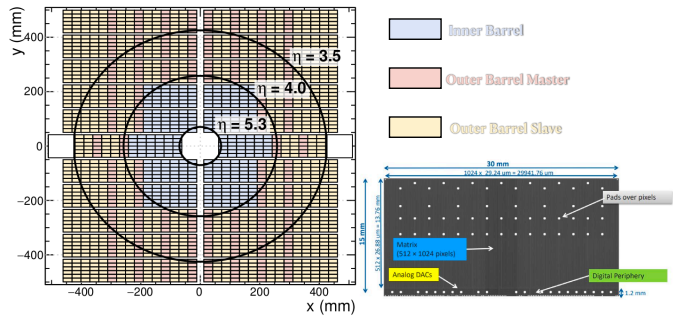


Fig. 3. (左) FoCal-E 像素层平面，展示了不同的 ALPIDE 传感器模式：IB (内筒)、OB (外筒) 从机和 OB 主机。(右下) 展示关键组件位置的 ALPIDE 布局 [2]。

每个像素层由 22 个补丁 (每边 11 个) 组成，每个补丁由 6 条 ALPIDE 字符串形成，总计有 3,888 个 ALPIDE 传感器。在高占用中心，传感器以 IB 模式 (960 Mbps) 运行，而 OB 主从模式 (共享链路 320 Mbps) 覆盖外围 (Fig. 3)。每个 ALPIDE 的尺寸为 30 毫米 × 15 毫米，并包含一个 1024×512 像素矩阵，在其下边缘有数字读出电路。每 29.24μm × 26.88μm 的像素由一个电荷收集二极管、放大电路和鉴别器组成。

3. 忙碌违例

每个 ALPIDE 包含一个多事件缓冲区 (MEB)，有三个槽用于存储击中信息。在操作过程中，ALPIDE 打开一个门控窗口，如果在此窗口期间粒子击中像素并超过阈值，则该击中会被存储在一个可用的槽中以备后续读取。然而，在局部占用率高的区域，击中的存储速率可能超过读取速度。如果 MEB 中的所有三个槽在任何槽被清空前都被填满，则会触发 BUSY 违规，阻止芯片接受额外的击中直到至少有一个槽被清除。芯片无法注册击中的这一时期被称为死帧。

最小化中心区域的 BUSY 违规对于优化探测器性能、确保高效记录碰撞和减少高占用环境中的死时间至关重要。

4. 系统 C 仿真中的预期性能

为了评估高亮度条件下像素层的性能，开发了一个基于 SystemC 的专用仿真框架，该框架最初是为 ITS2[4] 开发的。此框架能够详细地模拟基于 ALPIDE 的读出链路，允许研究关键性能参数，如占用率、BUSY 违例率和数据吞吐量。

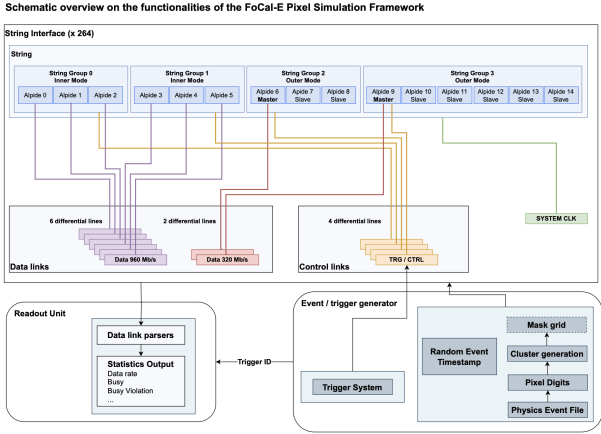


Fig. 4. 系统 C 仿真框架概述，用于 FoCal-E 像素层。该模型模拟了每包含 15 个 ALPIDE 的 264 个像素串，并包括一个统计读出分析模块 [2]。

Fig. 4 说明用于建模 FoCal-E 像素层的仿真框架。它处理来自 PYTHIA 的模拟最小偏置事件，包括时间戳分配和像素簇生成，以实现真实的占用率建模。

字符串接口类处理输入/输出，事件生成器类使用默认交互频率为 1 MHz 的概率模型给交互打上时间戳。粒子撞击被映射到 ALPIDE 坐标系统中，簇生成模型产生高斯分布的簇 (平均大小 $n_{cl.size}=4$ 像素，宽度

$\sigma_{cl.size}=1.4$), 并通过束流测试验证进行优化。触发器生成器类支持周期性触发, 默认频率为 $f_{trg}=100$ kHz, 以及外部导出的触发, 允许潜在地与快速交互触发 (FIT) 或 FoCal 自触发电路集成。为了在高亮度运行下确保真实条件, 该模型考虑了 ALPIDE 活跃时间窗口 ($5 \mu s$), 模拟像素活动和数据链读取具有束流交叉时间戳 (25 ns) 的粒度。

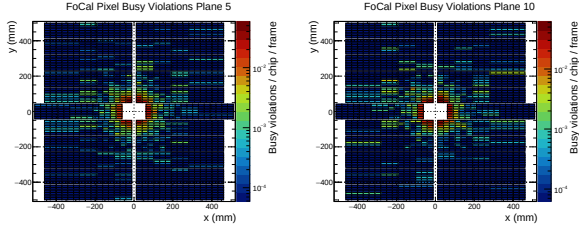


Fig. 5. 每 ALPIDE 在质子-质子碰撞中的 BUSY 违规率

基于默认的模拟设置, 像素层在周期性触发下进行建模, 由此产生的像素层 BUSY 违规率分布如 Fig. 5 所示。最高 BUSY 违规出现在围绕束管的芯片中, 达到约 6%, 而随着径向距离的增加, 违规率迅速下降。

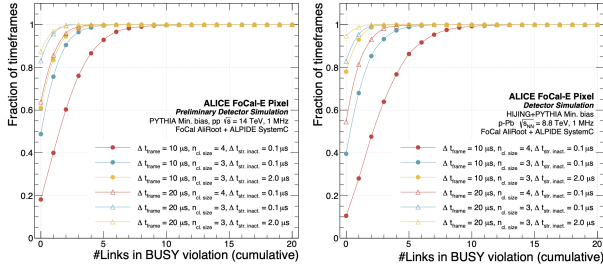


Fig. 6. 处于 BUSY 违规状态的多链接帧的比例 [2]。

各种措施被调查以减少由于 BUSY 违规导致的帧丢失, 包括对 ALPIDEs 进行反偏置 (将平均簇大小从 4 降低到 3, 从而减少了 25% 的占用率), 延长时间帧长度 Δt_{frame} , 以及增加非激活 strobe 的时间 $\Delta t_{strobe,inactive}$ 。减小簇尺寸和延长 $\Delta t_{strobe,inactive}$ 显著提高了不受 BUSY 违规影响的帧的比例。如图 Fig. 6 所示, 结合这些设置可以实现高达 $\sim 87\%$ 的帧无违规, 并且最多有 $\sim 97\%$ 个。尽管更长的 Δt_{frame} 进一步提高了效率, 但它可能会增加堆积和芯片占用率, 需要在读出余量和事件重叠之间取得平衡。

此外, SystemC 仿真评估了 ALPIDE 读出在平均和瞬时数据率下的表现。如 Fig. 7 所示, 在考虑平均数据率时, IB 和 OB 数据链路保持了一个舒适的带宽余量。在瞬时条件下, IB 链路仍至少保留了 10% 的带宽

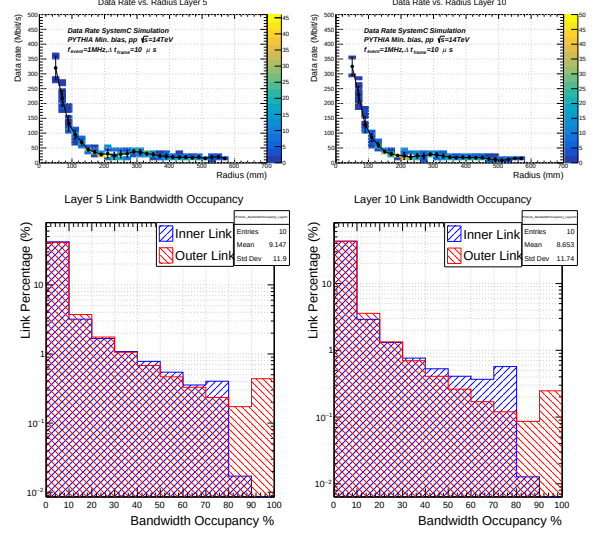


Fig. 7. (上) 平均数据速率和 (下) 默认设置下的瞬时带宽占用分布。

余量, 而 OB 链路偶尔接近饱和。

5. 束测试结果

四个 FoCal-E 像素层于 2024 年 9 月在 CERN SPS H2 束线进行了测试, ALPIDEs 的工作反向偏置电压从 0V 到 5V。主要目标是评估在不同反向偏置设置下高能电磁簇射中像素层占用率的降低情况。

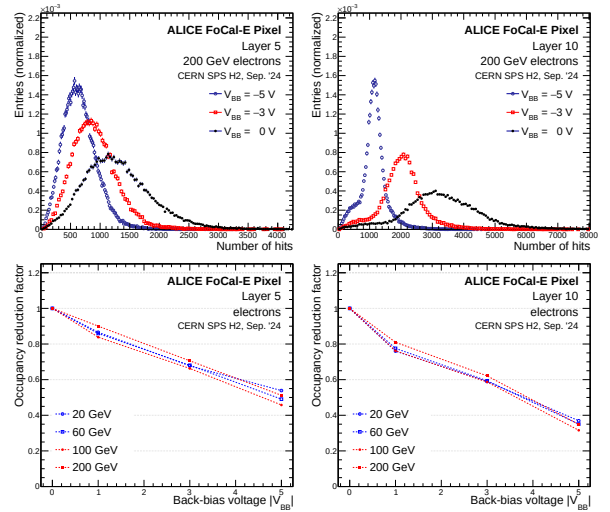


Fig. 8. (上) 第 5 层和第 10 层的归一化命中次数与 $|V_{BB}|$ 的关系, 突出显示了在较高背偏电压下记录的粒子数量减少。(下) 占用率减少因子与 $|V_{BB}|$ 的关系, 在 20–200 GeV 的束流能量下进一步下降。来自 CERN SPS H2 的 FoCal-E 束测试结果。

如 Fig. 8 所示, 第 5 层和第 10 层的归一化命中计数随着 $|V_{BB}|$ 的增加显著减少, 表明占用率有效降低。类似地, 在 20–200 GeV 的束能量范围内, 占用率降低因

子得到改善，证实了反向偏置可以显著降低高能电磁簇射的整体命中密度。

6. 探索优化选项

在最内层区域 ($r < 10$ 厘米)，高占用率会导致 ALPIDE BUSY 违规。目前正在研究两种互补策略——网格屏蔽和区域触发，以降低占用率并提高效率。

6.1. 网格掩码

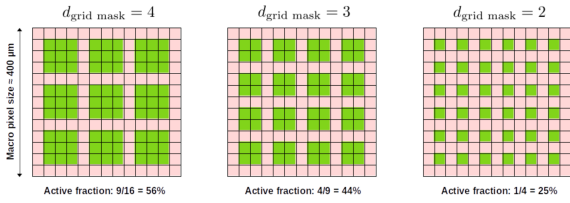


Fig. 9. 内层芯片在 $r < 10$ 厘米处的模拟网格掩模，具有周期性图案单元大小 $d_{\text{grid mask}}$ 。

一种直接的方法是屏蔽周期性的一部分像素（见 Fig. 9），从而降低最内层芯片的占用率。对于 $d_{\text{grid mask}} = 4, 3, 2$ ，活动比例分别是 56%，44%和 25%。虽然会丢失一些精细的淋浴数据，但 π^0 分离主要依赖较大的宏观像素单元，因此影响是可以接受的。正在进行的研究集中在仅在靠近束管的地方应用这种屏蔽，以平衡占用率减少与物理性能的关系。

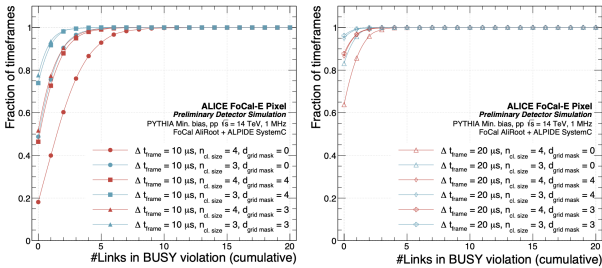


Fig. 10. 具有最多 n 个链接的 BUSY 违规帧的比例，在不同 $d_{\text{grid mask}}$ 和 Δt_{frame} [2] 下的 pp 碰撞。

在 pp 条件 (Fig. 10) 下，在 $\Delta t_{\text{frame}} = 20 \mu\text{s}$ 和 $n_{\text{cl.size}} = 3$ 处，框架效率约为 85%，没有网格遮罩时，上升到几乎 95% 当 $d_{\text{grid mask}} = 3$ 。

6.2. 区域触发器

区域触发器在靠近束管的 FoCal-E 区域内实现，以选择性地激活 ALPIDE 传感器，从而减少占用并缓解 BUSY 违规。第 4 层垫片上的晶圆由 HGCROC 芯片读

出，监测局部能量沉积。一旦沉积的能量超过预定义阈值（例如 10–30 兆电子伏特），仅触发相应的 ALPIDE 传感器，显著降低中心区域的击中率。

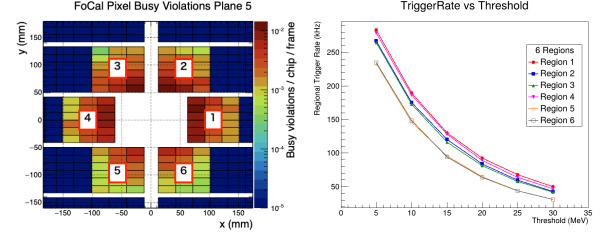


Fig. 11. (左) 靠近束管间隙的区域触发区（颜色标度显示在 30 MeV 阈值下的 BUSY 违规率）。(右) 基于 SystemC 仿真的不同阈值的触发率。

如 Fig. 11 所示，选择性触发有效降低了 ALPIDE 的占用率。将阈值从 10 MeV 提高到 30 MeV 进一步将触发率和 BUSY 违规降低至约 0.04%，大大减少了死帧 (Fig. 12)。这些结果表明，区域触发可能结合网格屏蔽可以调整以实现最佳占用性能同时保留物理信号。

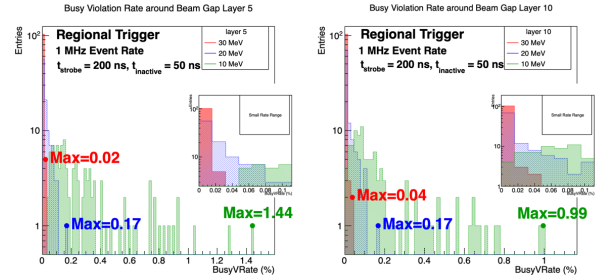


Fig. 12. BUSY 违约率在 10 MeV、20 MeV 和 30 MeV 阈值下，显示中央 ALPIDE 区域占用减少。

7. 结论

FoCal-E 采用基于 ALPIDE 的像素层，在高多重性条件下展现出稳健的性能。数据速率分析表明，读出仍保持在可接受的吞吐量范围内。束流测试和 SystemC 模拟结果证实，背偏压有效抑制了像素占用率，从而减少了死时间帧。为进一步缓解瓶颈问题，网格屏蔽和区域触发可以将最大 BUSY 违规从百分之几降低到 0.04%，使有效帧的比例提高至超过 95%。这些发现验证了在前向区域内对直接光子和中性介子进行精确测量的可行性。

承认

此 项 工 作 得 到 中 国 国 家 重 点 研 发 计 划
(2022YFA1602103) 的支持。

References

- [1] ALICE Collaboration, Physics of the ALICE Forward Calorimeter Upgrade, Tech. Rep. ALICE-PUBLIC-2023-001, CERN, Geneva, Switzerland (2023).
URL <https://cds.cern.ch/record/2858858>
- [2] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the ALICE Forward Calorimeter (FoCal), Tech. rep., CERN, Geneva (2024).
URL <https://cds.cern.ch/record/2890281>
- [3] ALICE Collaboration, Letter of Intent: A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, Tech. rep., CERN, Geneva (2020).
URL <https://cds.cern.ch/record/2719928>
- [4] S. V. Nesbø, Readout Electronics for the Upgraded ITS Detector in the ALICE Experiment, Ph.D. thesis, University of Bergen (2022).
URL <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/11250/2997116>