采用嵌入式 Timepix4 专用集成电路作为像素化阳极的混合型微通道板光电倍增管的研制与表征

R. Bolzonella[a, b, *], J. Alozy[c], R. Ballabriga[c], N. V. Biesuz[a], M. Campbell[c], V. Cavallini[a, b], A. Cotta Ramusino[a], M. Fiorini[a, b], E. Franzoso[a], M. Guarise[a, b], X. Llopart Cudie[c], G. Romolini[a, b], A. Saputi[a]

[a]意大利国家核物理研究所费拉拉分部，*via G. Saragat 1，44122*，意大利费拉拉[b]费拉拉大学物理与地球科学系，*via G. Saragat 1，44122*，意大利费拉拉[c]欧洲核子研究中心 *EP* 部，瑞士日内瓦 *1211，23* 号

arXiv:2602.01886v1 [physics.ins-det] 2 Feb 2026

摘要

我们介绍一种新型单光子探测器。该探测器基于一根真空管，集成了光电阴极、微通道板（MCP）和用作像素化阳极的 Timepix4 CMOS专用集成电路。该探测器专为处理每秒高达 10 亿个光子的速率而设计，覆盖 7cm^{2}有效面积，其空间分辨率和时间分辨率分别达到出色的 5 – 10 μm 和低于 50 ps r.m.s.。

Timepix4 专用集成电路包含约 230,000 个像素，每个像素均集成了模拟和数字前端电子学。这使数据驱动采集成为可能，并支持最高 160 Gb/s 的数据传输速率。外部基于 FPGA 的电子学负责管理配置和读出。

为了测试 Timepix4 专用集成电路的计时性能，我们使用脉冲红外激光器，对一个键合到厚度为 100 μm 的 n-on-p硅传感器上的组件进行了初步表征。结果表明，单像素计时分辨率为 110 ps；采用基于簇的平均方法后，分辨率可提高至 50 ps 以下。

滨松光子学制作了六个原型探测器，它们采用不同的微通道板堆叠配置和末端抑制深度。我们报告了对这些探测器的表征结果，包括暗计数率、增益以及空间分辨率和时间分辨率；这些指标是在实验室条件下和欧洲核子研究中心 SPS 设施的束流测试活动中进行评估的。

关键词：光　子计数探测器，混合像素探测器，Tim　　epix4

1. 引言

4DPHOTON 是一项由欧洲研究委员会（ERC）资助的项目，隶属于欧盟“地平线 2020”研究与创新计划（资助协议编号 819627）。该项目由意大利国家核物理研究所（INFN）承办，并由 Massimiliano Fiorini 教授担任首席研究员负责协调。欧洲核子研究组织（CERN）和费拉拉大学（UNIFE）也在项目中发挥着重要作用。

该项目旨在开发一种新型大面积光电探测器，能够以出色的空间和时间分辨率探测单个光子，同时即使在室温下也能保持较低的噪声水平 [1, 2]。这些前所未有的性能特点解决了许多光子成像应用中的一项主要局限：这类应用往往缺少能够同时提供高空间精度和高时间精度的探测器。

除了结构紧凑、具备高计数率能力外，该探测器在高能物理应用中也具有巨大潜力。它为环形成像切伦科夫探测器提供了一种创新解决方案，可在高亮度环境中实现高效的粒子鉴别。

*通讯作者电子邮箱：riccardo.bolzonella@cern.ch (R. Bolzonella)

2. 混合探测器结构与工作原理描述

该“混合型”组件的横截面如图1所示，其基于一根真空管，管内装有微通道板光电倍增管的各组件，并处于超高真空条件下（约为 10^{-10}mbar）。

在管体顶部，一块对红外光、可见光和紫外光透明的硅酸盐窗口用作光子入射窗。其内表面涂覆高量子效率（QE）光电阴极，将入射光子转换为光电子。

在光电阴极下方，放置微通道板（MCP）堆叠——通常采用人字形或Z型堆叠几何结构——以放大信号。微通道板通过二次电子发射，对光电阴极发射的单个光电子进行倍增。

最后一级放大由裸片Timepix4 CMOS专用集成电路构成，用作嵌入式像素化阳极。Timepix4凸点键合到构成真空管组件底部的陶瓷载板上。该陶瓷载板具有双重作用：为真空环境提供机械密封，并在真空封装组件与空气中的外部电路之间提供电气接口。

信号和电源通过高速引脚传输

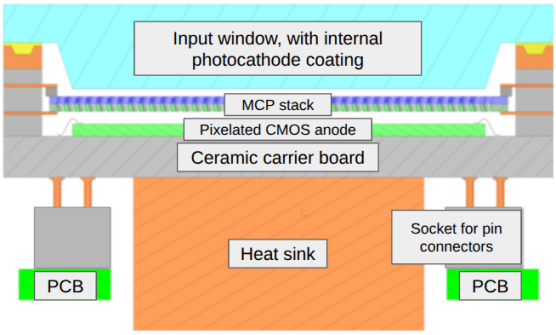


图1：混合式MCP-PMT组件的简化剖面图。

集成在定制的针栅阵列（PGA）中，使探测器能够插入印刷电路板（PCB）上的专用插座。PCB将组件连接到定制的基于FPGA的数据采集系统，该系统负责配置Timepix4并管理数据读出。

运行期间，Timepix4 的功耗最高可达 5W。为确保热稳定性并防止过热（这可能影响探测器性能），需在专用集成电路上安装散热器，并使用冷水机系统主动冷却。

混合探测器的工作原理如下：

- 光子穿过入射窗，被高量子效率光电阴极吸收，从而发射出一个光电子；
- 光电子在电漂移场的作用下加速，朝微通道板堆栈移动，并在其中引发二次电子雪崩；
- 放大的电子云进一步漂移至裸片 Timepix4 专用集成电路的凸点键合焊盘，并由读出电子学检测；
- Timepix4 对信号进行放大、甄别和数字化处理，从而提供精确的时间和电荷信息。

3. Timepix4 表征

Timepix4 是 Medipix 系列最新一代的专用集成电路（ASIC），由 Medipix4 合作组开发。它主要用于混合像素探测器中的单粒子探测 [3, 4]。Timepix4 采用65纳米CMOS工艺制造，凭借精细的 55 µm 像素间距和 bin 大小为 195 ps 的时间数字转换器（TDC），实现了高空间分辨率和高时间分辨率。此外，通过过阈时间（ToT）技术，可实现分辨率约为 1 keV 的能量测量。

该专用集成电路包含约 230,000 个独立像素，按 a 448×512 矩阵排列，每个像素均配备模拟和数字前端电子学。它采用数据驱动的读出架构，能够支持高达 160 Gb/s 的数据带宽。为处理这一数据吞吐量，采用了基于FPGA的外部电子学，不仅用于高速数据采集，还可灵活配置和控制专用集成电路。

全面表征 Timepix4 专用集成电路，尤其是其时间分辨率，对于评估目前正在研发的基于微通道板的混合型光子探测器的性能至关重要。要达到预期性能，必须进行细致的校准流程，包括通过逐像素精细调节本地阈值来实现阈值均衡，以及对 ToT 响应与沉积电荷之间的关系进行逐像素校准。

时间分辨率测量采用测试组件进行，其中 Timepix4 凸点键合至厚度为 100 µm 的 n-on-p硅传感器 [5]。击穿电压为 −180 V，本次测量中传感器的偏置电压设为 −150 V。传感器背面镀有金属化层，其图案由直径为 300 µm 的圆形开口组成，并以 1 mm 节距排列成三角网格。使用皮秒红外激光器 [6]照射传感器。实验装置向多个像素同时发送信号，并测量它们之间的时间差，以评估时间分辨率。一个脉冲直接发送至 Timepix4 上的一个数字像素，另一个脉冲则触发脉冲二极管激光器（PicoQuant PDL-800 B驱动器搭配 LDH-P-1060激光头）。红外脉冲的能量为 40 pJ，经衰减后通过光纤跳线传送至传感器。激光衰减量在 15 dB 至 30 dB 之间变化，并利用多光子探测估算不同输入电荷下的时间分辨率，覆盖每个像素 1 ke^- 至 200 ke^- 的范围；由此得到的总簇电荷最高可达 ~ 3200ke^-。

Timepix4 的时间分辨率受到像素矩阵中压控振荡器（VCO）振荡频率变化的显著影响。我们实施了一套自动校准流程，以修正所有像素中的这些变化。此外，还针对每个像素进行了额外校正，以补偿时间游走效应。

经过这些校准后，扣除估算为$\sigma_{ref} = 72 \pm 1$ ps r.m.s.的参考信号贡献后，单像素时间分辨率在 $\sigma_{\text{pixel}} = 107 \pm 3$ ps r.m.s.处达到平台 [6]。如图2所示，合并同一簇中多个像素的时间信息后，得益于多像素采样，分辨率分布的平台显著降低至 $\sigma_{\text{cluster}} = 33 \pm 3$ ps r.m.s.。簇平均分析采用了两种方式：一是合并每个簇中所有受照像素（平均规模接近30个像素），二是仅选取最受照像素周围较小范围内的像素 [6]。

4. 微通道板光电倍增管表征

陶瓷载板由意大利国家核物理研究所定制设计，并由京瓷制造。为确保

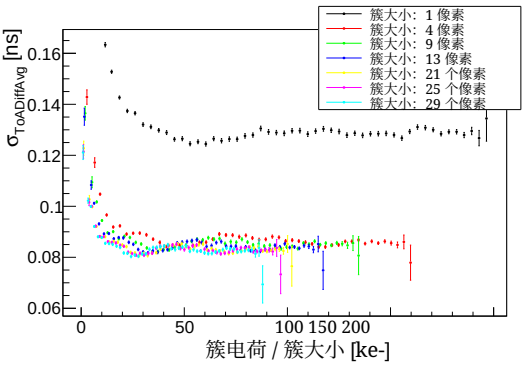


图2：簇时间分辨率与按簇大小归一化的簇电荷之间的关系。不同颜色表示不同的簇大小。参考像素的时间分辨率尚未扣除 [6]。

载体符合首批微通道板光电倍增管原型组件的严格要求，我们进行了一系列全面的电气、机械和热测试，包括泄漏率评估和平面度验证。

此外，欧洲核子研究中心和滨松光子学日本分别启用了两套质量控制装置。这些装置用于对与 Timepix4 专用集成电路键合后的陶瓷载体进行表征。表征内容包括基本性能检查和专用集成电路级诊断，以确保陶瓷载体与像素化读出的可靠集成。

2024年第二季度，滨松光子学（HPK）生产的首批微通道板光电倍增管原型交付。这些初始器件采用光电阴极，在 380 nm 波长处的峰值量子效率超过 30%，并使用通道直径为 6 μm、节距为 7.5 μm 的微通道板堆叠。为开展完整的表征活动，制造了若干原型变体，它们在微通道板级数（2 级或 3 级）以及端部电极深入几何形状（1D、2D 或 3D 深度）方面有所不同。本文所述测量使用的是采用 3 块微通道板和 3D 端部电极深入设计的原型。

为最大限度地减少背景光并降低输出噪声，每个光电倍增管均安装在暗箱内，以抑制光电阴极上不必要的光子击中。通过与冷水机相连的专用冷却系统，可将探测器温度降至约 0℃。冷却基础设施由两个主要部件组成：带有循环冷却液的空心铜板与陶瓷载体底面的中央区域进行热耦合；此外，铜制空心环与石英入射窗进行热连接，以增强对光电阴极的冷却，并改善微通道板堆叠两侧的散热。

为防止因冷却至低于环境温度而产生冷凝，干燥空气会持续通入暗箱内。这使相对湿度保持在约 5%，对应的露点约为 −20℃，从而有效避免冷表面形成水分。

4.1. 暗计数率与增益

通过在暗态条件下进行数据驱动采集，估算了探测器的暗计数率和增益下的参数。通过调整关键组件之间的电压差，在各种偏置方案下进行了测量（微通道板与 Timepix4 之间以及光电阴极与微通道板之间的电压差为 50 V 至 300 V，两个微通道板表面之间的电压差为 2000 V 至 2400 V）。

观察到暗计数率的空间分布不均匀，目前正在开展进一步研究以更好地理解这一现象。已排除电场畸变可能导致这种不均匀性的假设。通过在像素矩阵的精确位置进行局部激光照射验证了这一点，未发现可归因于电场效应的异常。

相反，矩阵中电荷分布和簇尺寸的变化表明，增益不均匀性最有可能是其成因。观测到信号的空间特征进一步支持了这一解释。目前正在开展的研究，包括详细的电场模拟，旨在深入了解这些变化。

尽管存在不均匀性，平均暗计数率仍符合滨松提供的规格；当微通道板偏置电压超过 2200V 时，其值仍低于 30 Hz/cm^2。通过分析矩阵中心区域的电荷分布（该区域的空间响应更均匀），还估算了不同微通道板偏置电压下的增益值，并得到了图3所示的增益趋势。

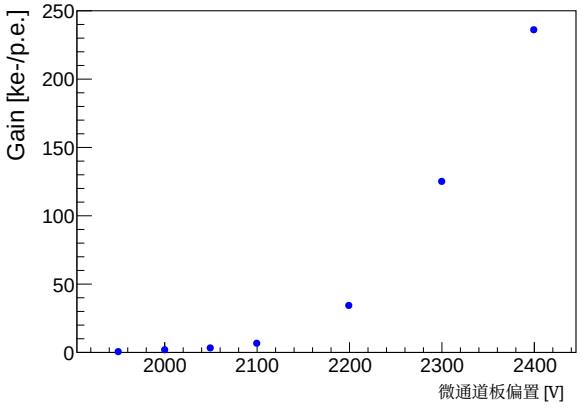


图3：在 Timepix4 矩阵中心区域测得的预估增益与微通道板偏置电压的关系。

4.2. 时间分辨率

时间分辨率测量是在与 Timepix4 键合至硅传感器时相似的条件下进行的。为最大限度提升性能，微通道板以 240 ke$^-$/p.e. 的增益工作，偏置电压设为 2400 V，如图3所示，从而增加沉积在各像素上的电荷并降低信号抖动。同时，有意尽量减少电子云聚焦，以利用先前已展示的多重采样能力。

激光器经过大幅衰减，使每个激光脉冲的光子探测概率达到 0.1，以实现单光子工作。在这种条件下，信号簇通常

表现为覆盖 3–4 个像素的电荷峰，周围环绕着低电荷晕。

采用与前文所述类似的分析方法，单像素时间分辨率在约 95 ps 时趋于稳定。对于由 4 个或更多像素组成的簇，时间分辨率可提升至约 65 ps。

整体分辨率仍主要受时间数字转换器（TDC）和参考定时信号的影响。此外，由于每个簇中记录到显著电荷的像素数量相对较少，多重采样带来的收益不如硅传感器组件明显。

5. 结论

4DPHOTON 项目由 ERC 资助，由意大利国家核物理研究所承办，并得到欧洲核子研究中心和费拉拉大学的支持，致力于研发一种探测器，能够在大面积有效区域内以高空间分辨率和高时间分辨率测量单光子，同时在室温下保持低噪声。

该探测器采用“混合式”组件，包含一根真空管，内部装有光电阴极、微通道板（MCP）以及用作像素化阳极并集成读出的 Timepix4 专用集成电路。光电阴极将光子转换为光电子后，光电子被引导至微通道板并在其中倍增。随后，产生的电子云扩散至 Timepix4 的各个像素，在那里感应信号经过甄别、数字化并读出。

采用皮秒激光装置对与硅传感器键合的 Timepix4 组件进行了表征。结果表明，Timepix4 专用集成电路的时间分辨率保持在 100ps 以下，并证实，与单像素到达时间相比，通过估算簇质心到达时间可提升时间分辨率。

已在滨松和费拉拉启用质量测试装置，用于表征微通道板光电倍增管。光电倍增管置于暗箱内，并连接至外部数据采集系统。基准测试包括暗计数率（DCR）和增益测量。此外，费拉拉的装置配备了激光系统，可用于表征时间分辨率和空间分辨率。

已制作多个微通道板光电倍增管原型，其微通道板堆叠数量和末端抑制深度各不相同。其中，一个采用 Z型堆叠配置和一维端部电极深入设计的原型已得到全面表征。结果证实，混合组件的表现符合预期，其增益和暗计数率均与设计相符。时间分辨率达到 100ps 以下，预计进一步优化 Timepix4 模拟前端可提升分辨率。

表征工作将继续在其他原型上进行，以比较其性能，并确定适用于生产的最佳配置。

致谢

本工作是在位于欧洲核子研究中心的 Medipix4合作组相关工作背景下，并在由 INFN CSN5 资助的 MEDIPIX4 项目框架内开展的。该项目获得了欧洲研究委员会（ERC）通过欧盟地平线 2020 研究与创新计划提供的资助（资助协议编号 819627，4DPHOTON 项目）。我们感谢 LHCb 合作组的 VELO 团队借给我们与 n-on-p硅传感器键合的 Timepix4 组件，使我们得以开展本文所述的时间分辨率测量。

参考文献

[1] M. Fiorini, J. Alozy, M. Bolognesi, M. Campbell, A. C. Ramusino, X. Llopart, T. Michel, S. Schifano, A. Trem- sin, J. Vallerga，具备 o(10) ps 计时精度和低于 10 μm 位置分辨率的单光子成像探测器，《仪器学报》13 (2018) C12005。doi:10.1088/ 1748-0221/13/12/C12005。[2] J. A. Alozy, N. V. Biesuz, M. Campbell, V. Cavallini, A. Cotta Ramusino, M. Fiorini, M. Guarise, X. L. Cudie，带像素化阳极和集成数字读出的单光子成像探测器的开发，《仪器学报》17 (2022) C06007。doi:10.1088/ 1748-0221/17/06/C06007。arXiv:2112.10636。[3] X. Llopart 等，Timepix4：一种大面积像素探测器读出芯片，可在四侧拼接，提供低于 200 ps 的时间戳分箱，《仪器学报》17 (2022) C01044。doi:10.1088/1748-0221/17/ 01/C01044。[4] V. Sriskaran 等，高速率、高分辨率单光子 X 射线成像：Medipix4，一种可在四侧拼接、具有高颗粒度和能谱分析能力的大型像素读出芯片，《仪器学报》19 (2024) P02024。doi:10.1088/1748-0221/19/02/P02024。[5] K. Akiba, J. Alozy, D. Bacher, R. B. Sune, F. de Benedetti, M. van Beuzekom, V. van Beveren, T. Bischoff, H. Boteren- brood, W. Byczynski, M. Campbell, E. Chatzianagnostou, V. Coco, P. Collins, E. Dall’Occo, R. Dumps, T. Evans, A. F. Prieto, M. Fransen, A. G. Torreira, R. Gao, R. Geert- sema, F. G. Abrantes, V. Gromov, M. Halvorsen, B. van der Heijden, K. Heijhoff, M. John, D. Johnson, U. Krämer, E. L. Cid, X. L. Cudie, M. Madurai, D. Oppenhuis, T. Pa- jero, E. R. Rodríguez, D. Rolf, A. Sarnatskiy, H. Schindler, P. V. Regueiro, A. Vitkovksiy, M. Williams, G. Wang，Timepix4束流望远镜，2025。网址：https://arxiv.org/abs/2503.15207。arXiv:2503.15207。[6] R. Bolzonella, J. Alozy, R. Ballabriga, M. van Beuzekom, N. Biesuz, M. Campbell, P. Cardarelli, V. Cavallini, V. Coco, A. C. Ramusino, M. Fiorini, V. Gromov, M. Guarise, X. L. Cudie, S. Okamura, G. Romolini, A. Sa- puti, A. Vitkovski y, Timin g 分辨率 p性能Timepix4凸点键合组件，《仪器学报》19 (2024) P07021. doi:10.1088/1748-0221/19/ 07/P07021。