

激光与光电子学进展

微通道板光子探测器及其时间分辨的影响因素

潘京生*

北方夜视技术股份有限公司南京分公司, 江苏 南京 211102

摘要 皮秒定时的微通道板(MCP)光子探测器,将对未来的粒子物理实验产生变革性的影响。回顾了国外大面积平板MCP光子探测器开发及商业转化历程,概述了MCP光子探测器构成的基本设计要素,分析了时间分辨的影响因素,并结合自己的观点,总结了MCP光子探测器开发及产品转化过程存在的物理限定和技术瓶颈。

关键词 探测器; 微通道板光子探测器; 微通道板光电倍增管; 微通道板; 时间分辨

中图分类号 TN105.2; TN152+.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1700006

Microchannel Plate Photon Detector and Factors Influencing its Time Resolution

Pan Jingsheng*

Nanjing Branch of North Night Vision Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211102, China

Abstract Microchannel plate (MCP) photon detectors with picosecond timing properties are expected to transform future particle physics experiments. Herein, the development and commercialization process of large-area flat-panel MCP photon detectors were briefly reviewed, the basic design elements of MCP photon detectors were summarized, and the factors influencing time resolution characteristics were analyzed. Moreover, the existing physical limitations and technical bottlenecks related to the development and commercialization of large-area flat-panel MCP photon detectors are summarized.

Key words detectors; microchannel plate photon detector; microchannel plate photomultiplier tube; microchannel plate; time resolution

OCIS codes 040.5160; 040.5250; 040.1240

1 引言

光电倍增管(PMT)是一种经典的光子探测器,利用光电效应和二次电子发射原理,由光电阴极将光子转换为光电子,这些光电子经打拿极倍增实现电子倍增,再由阳极输出电流信号。PMT可测量到非常微弱的光强度乃至单光子强度,广泛应用于从紫外到可见光的低能光子、结合闪烁体或辐射体的高能光子以及带电粒子的探测,并在过去几十年的粒子物理实验中,一直用于大面积覆盖的光子飞行

时间(TOF)的测量,但其有限的定时和定位能力,限制了系统性能的提高。对于由多个优化的打拿极构造的PMT,其时间及空间分辨率有相应的提高,但总体上其时间和空间分辨及抗磁场干扰能力仍存在严重的不足。基于微通道板(MCP)倍增级的大面积平板MCP-PMT有望在未来的粒子物理实验升级装置中成为传统PMT的替代品^[1-4]。

MCP起始于为像增强器开发的一个紧凑式通道阵列电子倍增器。像增强器与PMT具有相近的历史及原理,MCP的成功开发并应用于像增强器,

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-18; 录用日期: 2021-01-02

通信作者: *pjs@nvt.com.cn

使像增强原理从早期的电子加速转为二次发射的电子倍增,并随之演变成双近贴式薄片管结构,使紧凑、轻便和低功耗的可穿戴夜视装备成为可能,由此奠定了像增强器近五十年来服务于军用夜视的技术基础。得益于军用夜视的需求,像增强器和 MCP 得到很好的发展,越来越多的光子探测器开始利用 MCP 及像增强器来实现超快时间和精细化像素的光子探测^[5-8]。

MCP 的特征尺寸及探测器的紧凑结构决定 MCP PMT 拥有超快的时间响应和精细的位置分辨能力,使其即便在 2 T 磁场中工作也不受影响。借助于专用集成电路(ASIC)的低功耗多通道前端电子学元件,与探测器阳极直接耦合,由基于现场可编程门阵列(FPGA)的可扩展前端和数据采集系统读取数据,可提供全数字的数据输出。皮秒定时 MCP 光子探测器的实现,将对未来粒子物理实验产生变革性的影响^[1, 9-10]。与此同时,作为超快时间分辨、多通道像素化的单光子灵敏计数成像探测技术,在核医学影像诊断的时间飞行正电子发射断层扫描(TOF-PET)等领域,也极具应用前景^[11-12]。

2 大面积平板 MCP 光子探测器

MCP 光子探测器,也称平板 MCP-PMT,始于美国 Burle 公司受美国能源部(DOE)资助于 2005 年推出的多阳极 MCP-PMT Planacon,其外形尺寸为 60 mm×60 mm,有效面积为 50 mm×50 mm,其由双碱光电阴极和金属-陶瓷组件钢封构造,具有石英玻璃或硼硅酸盐玻璃端窗和 8×8 矩形阳极,可提供 10^6 的增益,0.6 ns 上升时间,1.8 ns 半峰全宽(FWHM)展宽。DOE 随后将粒子物理升级实验所需要的经济型大面积平板 MCP-PMT 列于下阶段资助开发计划中。但 Burle 在推出 Planacon 的当年就被法国 Photonis 公司收购,后续开发计划也由此被搁置。

平板 MCP-PMT 是理想的切伦科夫(Cherenkov)光探测器。MCP 的特征尺寸及探测器的紧凑结构决定 Cherenkov 光探测器具有超快的时间响应,并且即便在 2 T 磁场中工作,其也不会受到影响。熔石英玻璃窗口本身就是一个良好的辐射体,Cherenkov 光甚至可在探测器窗口中直接产生,然后由光电阴极和 MCP 转换和放大,消除了闪烁过程随时间的变化,同时极大地缩减了光路。MCP 的方形平板窄边框结构,以及每个探测器能够提供

接近相同的性能,便于多个探测器拼接,形成大面积覆盖。目前收归 Photonis 名下的 Planacon 系列保持原有外形尺寸,但有效面积提高到 53 mm×53 mm,填充面积达 80%,如图 1 所示,并增加了 10 μm 孔径 MCP 和 32×32 阳极的配置,渡越时间弥散(TTS)也从原来的约 45 ps 减小到约 30 ps。其中的 Planacon 85012,可提供 500 ps 的上升时间,700 ps 的 FWHM 展宽,30 ps 的单光子时间分辨率和 12 ps 的多光子时间分辨率^[13]。

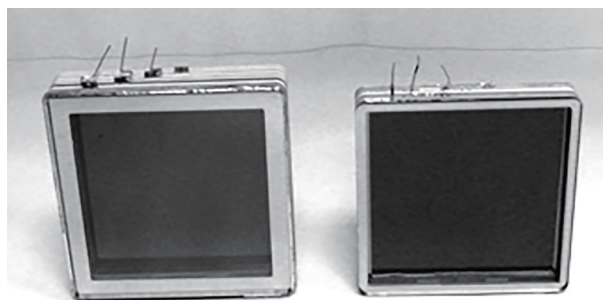


图 1 Planacon MCP-PMT 85011 和 85012 照片

Fig. 1 Photos of Planacon MCP-PMT 85011 and 85012

由 4 个国家实验室,包括阿贡实验室(ANL)的 5 个分部、芝加哥大学费米实验室(Fermilab)、加州大学伯克利分校的太空科学实验室(SSL)和斯坦福直线加速器中心(SLAC),及 3 家美国小公司作为工业合作伙伴,会同夏威夷大学的电子学专家,在 DOE 的 3 年发展规划资助下,于 2009 年建立大面积皮秒光子探测器(LAPPD,见图 2)的合作关系,旨在开发可以在平方米单位探测覆盖面积内实现 ps 时间分辨和亚 mm 空间分辨的经济型 LAPPD,寻求从大面积 MCP,到大面积光电阴极和阳极的探测器组件,直至完全一体化的全玻璃封装结构和金属陶瓷封装结构的 200 mm×200 mm 的大面积经济型 MCP 光子探测器的解决方案^[14]。

粒子物理实验中大面积覆盖 TOF 的探测,不仅涉及大面阵探测器,同时涉及可管理数量的读出通道。采用条带传输线阳极的一维阵列,来实施 MCP 脉冲信号的多点采集,相比于采用离散多阳极垫的二维阵列,可实质性地减少读出通道数量,其更具经济性。如图 2(b)所示,条带传输线收集的 MCP 电荷脉冲,以相反方向沿传输线传播到两端,时间信息由脉冲到达两端的平均时间给出,位置信息通过到达两端的差分时间和横向相邻条带传输线上电荷的加权重心来确定。而电阻屏构造的容性取

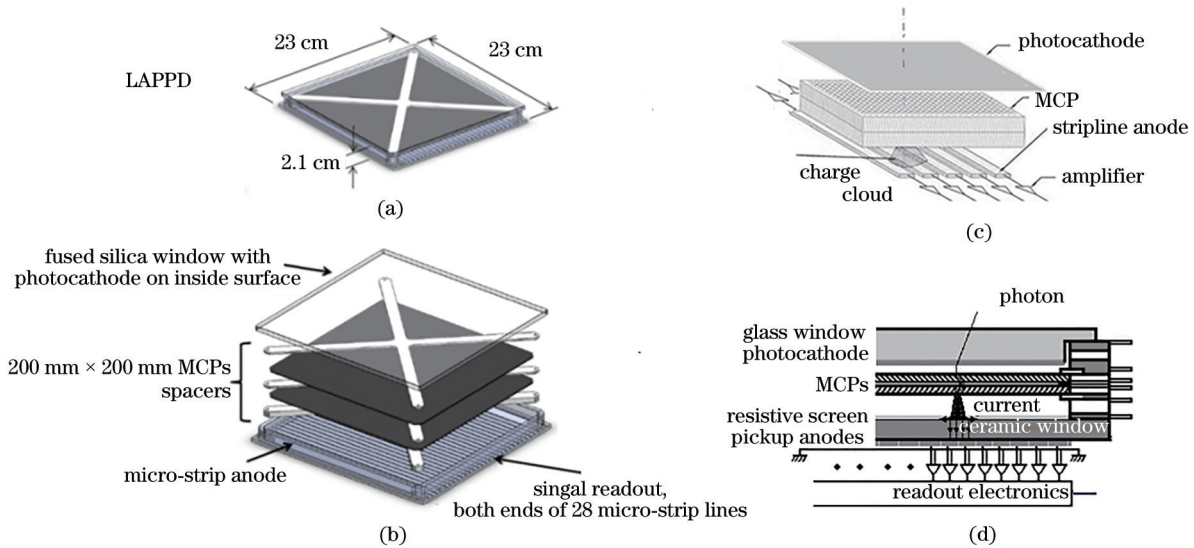


图2 LAPPD及其结构示意图。(a)外形尺寸;(b)组件结构;(c)条带传输线阳极读出示意;(d)容性取样的电阻屏构造
Fig. 2 LAPPD and its structure schematic. (a) Boundary dimension; (b) component structure; (c) stripline anode readout; (d) schematic of capacitive coupled sample resistance screen

样读出原理,如图2(c)所示,MCP电荷云的高频成分,可保持并传输到紧贴在电阻屏阳极陶瓷端窗外作为印刷电路板(PCB)的外电极上,且外电极图案也类同于直接读出的拾取电极图案,构成一个读出阳极与封装管可物理分离的MCP光子探测器模块。

粒子检测效率是表征粒子物理实验装置探测能力的最重要指标。PMT采用的双碱光电阴极,能够很好地检测水Cherenkov光的光谱范围及其对应波段的量子效率(QE)峰值。但受限于光电子逃逸深度小于光子吸收长度,传统透射式光电阴极QE已难以进一步提升。LAPPD在采用传统双碱光电阴极的同时,借助ANL在微纳制造技术上的优势,通过优化光电阴极基底表面形貌,增加了光子吸收长度但未增加电子逃逸深度,拓展了响应波长范围,同时调整介电常数,优化近表面电场,进一步降低了光电阴极表面功函数,提高了光电阴极的发射效率^[14]。

LAPPD采用原子层沉积(ALD)MCP的技术方案,借助Arradance公司的ALD优化工艺及配方,在高比表面积和高深宽比的阳极氧化铝(AAO)通道阵列基底上进行共性薄膜沉积,可以实现独立电阻层和二次发射层的高增益和鲁棒性的MCP功能化,这一度被认为是实现经济型大面积MCP的有效技术途径^[15]。但LAPPD最终采用玻璃毛细管阵列(GCA),借助Incom公司的空心玻璃毛细管阵列制造技术,开发出大面积ALD GCA MCP^[16]。

基于ASIC的低功耗快速波形取样定时电子学

读出的前端设计,也被纳入协作的一部分。来自芝加哥大学和夏威夷大学的电子学专家成功将32个通道、采样率为15 GSa/s的快速波形采样电子学元件前端设计移植到130 nm CMOS工艺的ASIC芯片上,与传输线阳极直接耦合,由基于FPGA的两级模块化数据采集系统支持并读取数据。虽然传统定时提取采用的恒比定时鉴别器(CFD)需要宽带延迟线而难于集成耦合,但多种新技术可用于信号脉冲的快速时间提取,如前沿单阈值甄别、前沿多阈值甄别后结合拟合前沿形状,以及脉冲波形取样后结合数字化和脉冲重建。其中,波形取样可提取振幅、积分电荷、波形形状及脉冲叠加或堆积的区别,时间分辨可达到数皮秒甚至更高,并能提供比时间更多的信息^[17-20]。

但直至项目结束,LAPPD协作并未成功完成具备完整功能的探测器模块的封装,无论是全玻璃构造,还是转移阴极的金属陶瓷封装构造。SSL只是利用开放式装置进行了基于这种大面积ALD GCA MCP的LAPPD封装模块简单原理验证。在项目结束后次年SSL进行的唯一一次双碱光电阴极和金属-陶瓷构造的封装试验也因真空泄漏而失败^[14]。

随后,Incom建立起相应的生产设施,构建了条件保障体系,并受到DOE的持续资助,与ANL、SSL及芝加哥大学合作,开展了全集成一体化封装LAPPD的产品中试,最终于2015年完成了LAPPD的产品中试及随后的商业转化。由转移阴极及金属陶瓷组件钢封构造的LAPPD封装模块,其有效

面积为 $200\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, 填充系数为 92%, 双碱光电阴极峰值 QE 大于 25%, 均匀性在 $\pm 15\%$ 以内, 采用 $203\text{ mm} \times 203\text{ mm}$ 的 $20\text{ }\mu\text{m}$ 孔径、 $25\text{ }\mu\text{m}$ 孔间距的 ALD GCA MCP, 增益可大于 10^7 , 可提供 $50\sim 60\text{ ps}$ 的单光子时间分辨, 5 ps 的电子学时间分辨, 在两个方向的空间分辨率都优于 1 mm 。基于 GCA 的 ALD MCP 功能化, 不仅消除了离子反馈对工作

寿命的影响, 而且在 6×10^6 增益下的暗计数率低至 $100\text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。而 Incom 正在开发的第二代 LAPPD, 将采用电阻屏构造的容性取样读出, 结合二维阵列阳极垫和一维阵列的条带传输线两种阳极配置, 如图 3(a) 所示, 同时还将采用更小孔径的 ALD GCA MCP, 以实现优于 10 ps 的粒子飞行时间的差异测量^[21-24]。

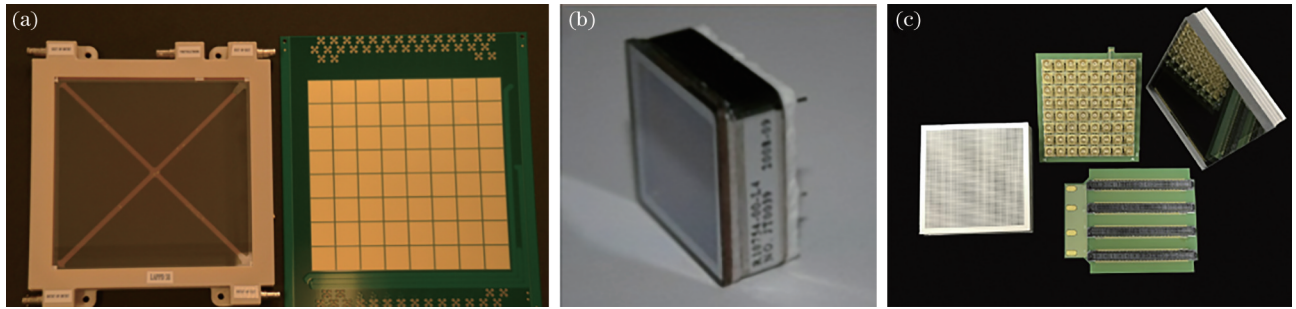


图 3 MCP 光子探测器的商业化产品。(a) Incom 的第二代 LAPPD 及其制作在 PCB 板上的多阳极垫阵列外电极; (b) 滨松 MCP-PMT R10754-00-L4; (c) Photek 的可具多种阳极配置的新一代 MCP-PMT AuraTek MAPMT253

Fig. 3 MCP photon detector commercial products. (a) Incom's GEN II LAPPD and its multianode pad array of electrode readout on PCB board; (b) Hamamatsu's MCP-PMT R10754-00-L4; (c) Photek's AuraTek MAPMT253 with several anodes

但基于 ALD GCA MCP 的 LAPPD 并没有按照预期转化为比基于传统 MCP 的 MCP-PMT 成本更低的产品, 实际上 ALD GCA MCP 的生产方法和成本效率与传统 MCP 并无实质性差别, LAPPD 完全沿袭了 MCP-PMT 的转移阴极及金属陶瓷钢封构造, 且在封装量产效率上也无实质性改进, 这与经济型大面积光子探测器的初衷已相去甚远。为此, Incom 正在与芝加哥大学合作, 开发一种可在空气中转移光电阴极输入窗并在已完成封装的探测器壳体内制作光电阴极的原位阴极封装大面积平板 MCP 光子探测器量产技术^[25]。

基于传统 MCP 改进的中小尺寸 MCP-PMT 仍不失为权宜之选。Photonis 的 Planacon 更是成为行业的标杆产品。不过, 欧洲多国和日本的粒子物理实验升级, 他们仍选择与本土制造商的合作开发, 但都采用基于传统 MCP 改进的中小尺寸 MCP-PMT, 且都取得了预期的应用效果。

高能加速器研究机构 (KEK) Belle II 的 iTOP (imaging-Time-of-Propagation) 计数器, 采用了滨松 MCP-PMT (型号 R107544-07-M16), 如图 3(b) 所示, 其外形尺寸为 $27.6\text{ mm} \times 27.6\text{ mm}$, 有效面积为 $23\text{ mm} \times 23\text{ mm}$, 4×4 矩阵多阳极^[26]以 $36 \times 16 = 512$ 拼接。基于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 13° 倾角的传统 MCP, 结合 ALD 的二次发射特性优化覆层和离子阻挡膜, 其工作寿命从原来的 1 mC/cm^2 提高到 $3\sim 14\text{ C/cm}^2$, 光

电阴极 QE 的平均峰值为 28, 增益大于 10^6 , 上升时间为 200 ps , TTS 在 $30\sim 40\text{ ps}$ 之间^[26-28]。

Photek 的 MCP-PMT (型号为 AuraTek MAPMT 253), 源于欧洲核子研究中心 (CERN) 于 2012 年为大型强子对接机底夸克探测器 (LHCb) 新一代 RICH (Ring Imaging Cherenkov) TOF 计数器的 TORCH (Time of internally Reflected Cherenkov light) 探测器开展的一项为期三年的合作研发。TORCH 的覆盖面积达数十平方米, 要求单光子时间分辨率为 40 ps , 并在一个方向有亚 mm 空间分辨, 以满足 LHCb 升级实验的 Cherenkov 光锥角重建, 在 10 m 飞行距离实现了 $2\sim 10\text{ GeV}/\text{C}$ 动量的粒子识别, 且预计的光子事件率高达 $36 \times 10^6\text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 而必须采用全并行读出。TORCH MCP-PMT 的外形尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$, 有效面积为 $53\text{ mm} \times 53\text{ mm}$, 采用熔石英玻璃窗口, 64×64 阳极的宽度为 0.73 mm , 间距为 0.828 mm 。为应对极高事件率对探测器寿命的巨大影响, 采用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP, 结合 ALD 的二次发射优化覆层, 增益大于 1×10^6 , 工作寿命达到 5 C/cm^2 的累积电荷输出。同时, 利用各向异性导电膜 (ACF) 来实现阳极触点与 PCB 板接口的互连, 并在一个方向采用电荷分享技术将分辨率从 64 pixel 提高到 128 pixel , 另一个方向的 8×8 组合将 64 pixel 降低到 8 pixel , 满足了有效面积为 $53\text{ mm} \times 53\text{ mm}$ 的 TORCH 探测阵列单元只有

128 pixel \times 8 pixel 分辨率的要求。采用由 CERN 开发的定制 ASIC 的低功耗前端放大甄别芯片 (NINO) 和可编程高性能时间数字转换芯片 (HPTDC) 构成的电子学读出, 该器件具有时间分辨为 25 ps 和读出速率为 10 MSa/s 的 1024 个并行读出通道, 能够确保 TORCH MCP-PMT 达到优于 30 ps 的单光子时间分辨^[29-35]。

Photek 推出的商业化新一代 MCP-PMT, 型号为 AuraTek MAPMT 253, 每通道暗计数率低于 2 s^{-1} , 带宽为 6 GHz, 上升时间为 175 ps, 展宽的 FWHM 为 430 ps, TTS 为 40 ps。除 64×64 的 4096 阳极外, 还可提供多种图案阳极的客户定制, 如图 3(c) 所示, 未来也将采用多层陶瓷嵌入电极构造电阻屏容性取样像素化读出方案, 以构成具有优

异真空完整性的阳极端窗^[35]。

GSI FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) 的 PANDA (anti-Proton ANnihilation at Darmstadt) 探测器, 与 iTOP 和 TORCH 探测器有着相同的设计理念, 虽然目前仍在建, 但在前期的实验中, 利用市场上商业可得的平板 MCP-PMT, 与多阳极 PMT 和 SiPM 进行对比实验, 研究 MCP 的特征尺寸和物理性能, 发现 MCP-PMT 可成为 PANDA 探测器接近完美的候选者, 这是因为 MCP-PMT 除工作寿命略显不足外, 满足绝大部分要求。但 MCP-PMT 在 2 T 的磁场下需采用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP, 而如果采用 $6\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP 时其增益和时间分辨均得到显著提高, 如图 4 所示^[36-37]。

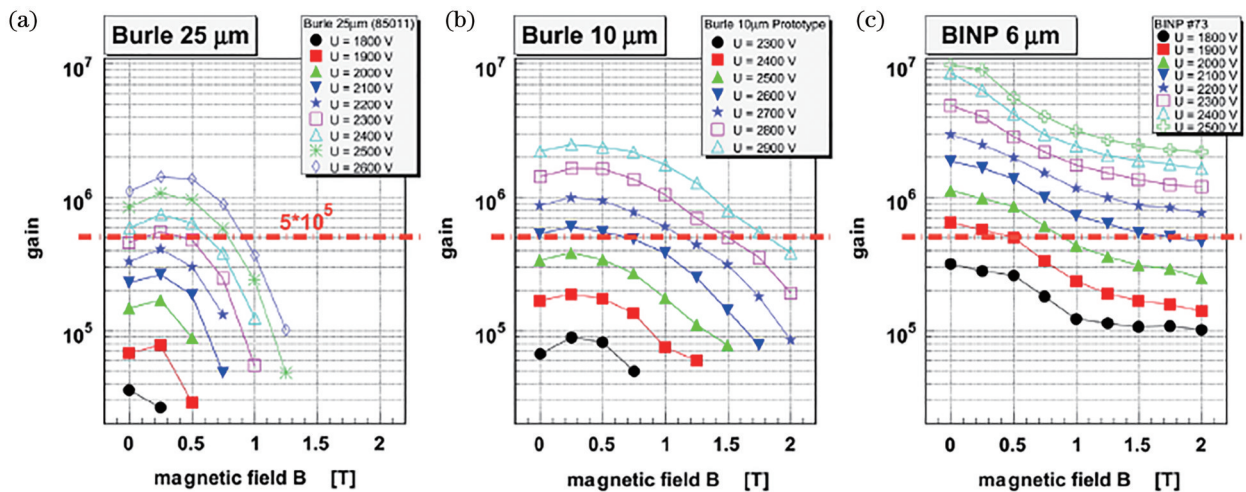


图 4 PANDA 合作前期实验的不同孔径 MCP 的 MCP-PMT 在不同偏压设置下的增益与磁场的关系^[36]。(a) $25\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP; (b) $10\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP; (c) $6\text{ }\mu\text{m}$ 孔径 MCP

Fig. 4 Gain as a function of the magnetic field under different high-voltage settings for MCP-PMTs with different MCP's pore size at the experiment by the PANDA collaboration^[36]. (a) Pore size MCP of $25\text{ }\mu\text{m}$; (b) pore size MCP of $10\text{ }\mu\text{m}$; (c) pore size MCP of $6\text{ }\mu\text{m}$

MCP 光子探测器的皮秒定时指的是其通常在数十皮秒但具有可接近甚至优于 10 ps 时间能力的光子到达时间的定时精度。时间分辨的瓶颈最来自阳极和前端电子学组件, 其终极限定则取决于探测器构造本身。MCP 是探测器的特征构成, 也是决定探测器极限时间分辨的主要因素。满足皮秒时间分辨的 MCP 必须具有足够小的物理维度。更小孔径的 MCP 可以实现更好的时间分辨。但要实现真正的皮秒时间分辨, 不仅需要探测器信号的产生过程, 包括脉冲波形和信号动态及探测器本身的噪声, 还需对探测器特别是 MCP 的构造, 有更好的理解。

3 MCP 光子探测器的构成及其基本的设计要素

MCP 光子探测器, 采用三明治式平板窄边框结构及金属陶瓷组件密封构造, 如图 5 所示, 从光电阴极到 MCP 再到阳极间的电场皆为平行电场。光电阴极受光子激发产生光电子, 产生的光电子受前电场作用逸出真空, 加速进入前级 MCP 通道, 撞击通道壁, 产生二次发射电子, 二次发射电子受由 MCP 两端高压建立的通道内电场作用, 再次撞击通道壁, 形成电子雪崩效应, 最后进入后级 MCP 通道进行放大。从后级 MCP 通道出射的电荷云脉冲, 经后电场吸引到阳极。采用一维或二维的离散电极

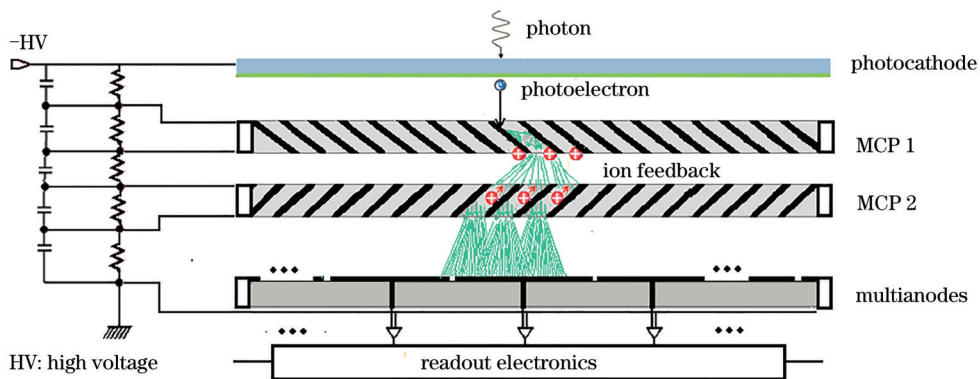


图 5 MCP光子探测器原理结构示意图
Fig. 5 Schematic of MCP photon detector

阵列组成的多阳极,接收来自MCP的电子雪崩,这不仅有助于保持MCP的时间分辨,提高探测器计数率的动态范围,同时可提供相关位置的信息数据。

粒子检测效率是探测器探测时间分辨能力的重要指标。光电阴极作为放大器的第一级,其QE和响应波长非常重要。双碱光电阴极与水Cherenkov光的光谱范围以及对应波段的QE峰值

能够很好地对应。滨松的SBA(Super bialkali)和UBA(Ultra bialkali)光电阴极QE峰值达35%甚至40%以上,如图6所示。但光阴极QE的一致性通常存在较大的偏离,其他厂家批量制造的PMT产品中存在少量产品光阴极QE峰值达到约40%的事例^[38]。而光阴极高QE的均匀性和一致性,对大面积覆盖的探测器阵列至关重要。

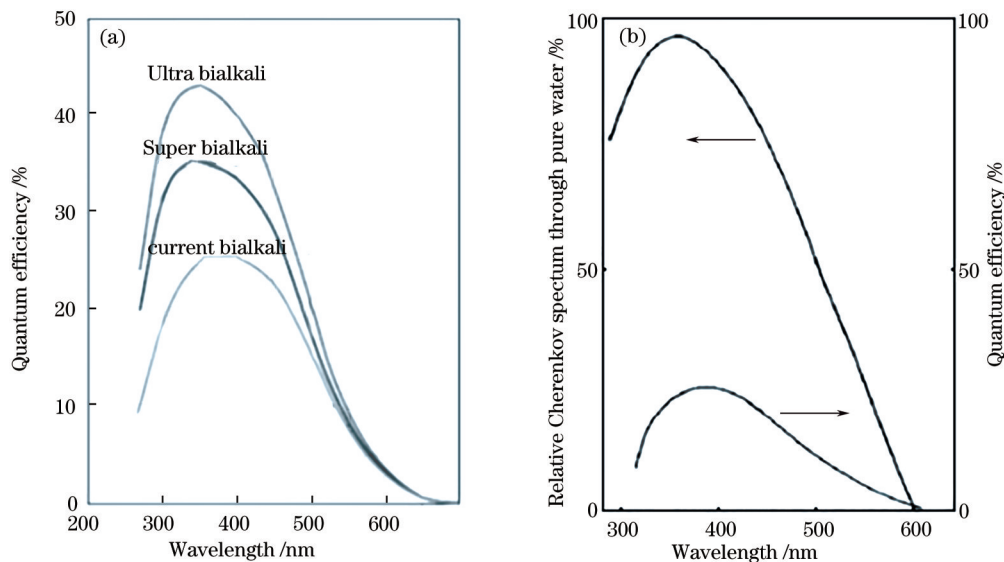


图 6 几种双碱光电阴极的量子效率及光谱响应范围。(a)SBA 和 UBA 光电阴极的量子效率;(b)双碱光电阴极与水 Cherenkov 光的光谱范围对比

Fig.6 Quantum efficiency of bialkali photocathodes and its spectrum. (a) SBA and UBA photocathodes quantum efficiency; (b) spectrum comparison for bialkali photocathode and Chevenkov light in water

相比于PMT采用的原位阴极生产方法,MCP光子探测器采用的转移阴极生产方式,如图7所示,不仅严重影响批量生产效率,且其光阴极效率并不具有优势。

MCP是探测器的构成特征。MCP形如一个由细微规则的通道阵列构成的玻璃薄片,上下两端面镀有金属电极,通道轴向与板面法向呈一定倾角。

当在两端施加一个近1kV的偏压时,每个通道即构成一个电子倍增通道。通道内电子倍增级联的运动轨迹和撞击能量及二次发射电子产额,与通道内电场分布和壁材料紧密相关,在通道两端还会受到边缘场效应的影响。很多文献对二次发射原理都有完整的模型描述,其与能量和角度的依存关系可以表示为^[39]

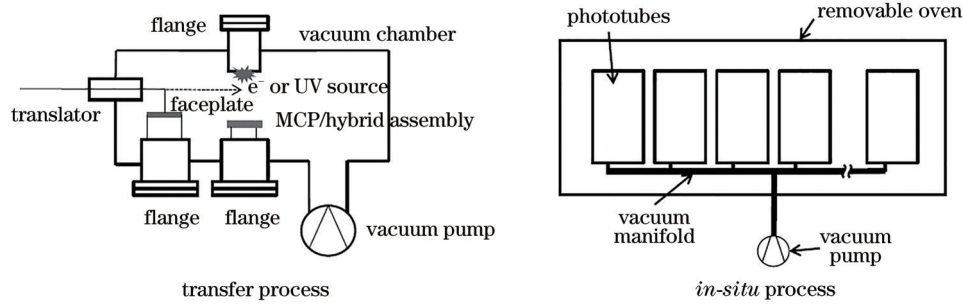


图7 MCP光子探测器和PMT的常规生产方法示意图。(a)MCP光子探测器;(b)PMT

Fig. 7 Typical produce methods for MCP photon detector and PMT. (a) MCP photon detector; (b) PMT

$$\sigma(V, \theta) = \left(\frac{V}{V_{\max}} \sqrt{C} \right)^{\beta} \exp \left[\alpha(1 - C) + \beta \left(1 - \frac{V}{V_{\max}} \sqrt{C} \right) \right], \quad (1)$$

$$C = \cos \theta \sqrt{\frac{V_0}{V}}, \beta = \begin{cases} 0.55, & V < V_{\max} \\ 0.25, & V \geq V_{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： θ 是入射角； V 是以eV为单位的撞击能量； α ， β ， V_{\max} 分别为相关材料特性的表面吸收因子、平滑因子和相应于最大二次发射产额的撞击能量。

雪崩电流沿通道径向呈指数递增，这意味着相应数量电荷会从通道壁中抽取，随着通道壁负电荷耗尽后正电荷累积，受到同时积累的空间电荷效应的影响，进一步的二次发射将被抑制。由此存在一个通道长径比及工作电压和通道长径比之比的优值，通道长径比的优值是40:1，工作电压与通道长径比之比的优值为22^[40]。一个长径比为40、孔径为10 μm 的通道在1.2 kV偏压的最大电荷输出约 10^5 电子^[41-42]。而采用2或3片MCP以倾角相反的级联方式进行V stack或Z stack构造，借助叠加的MCP间因平面度偏差存在的几十到上百微米的间距，或特意为此而增加的一个间隔装置，使MCP一个通道的出射电子云，跨越间距，进入到后级MCP的多个通道，从而可获得 10^6 以上的瞬间最大电荷输出而不至于很快达到饱和。

MCP的特征尺寸决定其具有快速的时间响应。通道内电子级联的平均渡越时间理论上取决于通道两端偏压引起的通道内电场、通道孔径及受通道孔径限定的通道长度。同时MCP还兼具模拟和计数模式。当对MCP Stack施加一个相对较低的偏压时，非饱和状态下放大信号的脉冲高度分布(PHD)呈负指数函数的关系曲线，输出脉冲振幅随输入事件增加而变化。随着工作电压的增加，通道增益饱和，导致PHD逐渐向峰分布改变，成为一个准高斯的正态分布。即便是统计时存在多光电子的情形，仍能定性区分相应的多光子峰值。不过与光子数的确切关系，还取决于光电

子进入通道的数量和通道的饱和程度。而对于饱和状态下的高增益窄PHD脉冲，每个探测事件的输出脉冲振幅都很接近，这不仅易于分离MCP背景事件，同时也可提高计数统计能力及时间分辨能力。

虽更多的称之为MCP-PMT，但无论原理结构，还是封装构造，MCP光子探测器都更类似于像增强器。此外，MCP也引入另一个难题，那就是正离子反馈将会导致光阴极QE退化。工作状态下的正离子反馈是MCP的固有缺陷。通道壁特别是接近输出端处吸附的气体分子，经高密度雪崩电子流撞击电离，形成正离子。受电场作用脱附反馈，形成的正离子撞击通道壁，甚至从通道逸出，撞击光阴极，产生假性信号，并导致光阴极QE退化。MCP必须工作在更高级别的真空环境中，在探测器封装过程还必须对MCP进行严格的除气处理，必要时甚至需在MCP输入面上增加一层氧化铝薄膜，以阻止反馈离子逸出通道，但这将严重削弱MCP的收集效率。

MCP以相反倾角级联，可阻挡离子的吸收，乃至中和反馈离子，其通道长径比增加到60:1时，可获得高增益，且不引发严重的离子反馈。如无须顾虑引入其他影响因素，还可增大通道倾角，进一步加强离子反馈的抑制。增大MCP级联间的间隔，并增加一个级间电压，使前级MCP输出电子云覆盖后级MCP的更多通道，可更大程度地提高增益的饱和上限，并为离子阻挡膜转移到后级MCP输入面提供可实施的空间。在这种构造中，前级MCP将以一个相对较低的增益工作，可保持对离子反馈的有效抑制，且不牺牲MCP增益级的收集效率。

MCP 采用铅硅酸盐玻璃和酸溶芯玻璃的管棒组合,通过熔合纤维光学制作方法,经酸蚀除芯,形成细微通道阵列,再经热氢气氛的铅硅酸盐玻璃表面还原,使通道内壁具有微弱表面导电特性^[43]。目前 6 μm 甚至 3 μm 孔径的 MCP 已商用化,但仅限于小尺寸 MCP。对于大面积小孔径的 MCP,其制作成本急剧增加,且其机械强度难以突破。

受限于通道壁微弱的导电特性,通道增益恢复时间在 ms 级别。MCP 可视作各自独立的密集电子倍增通道并联,计数率可高达 10⁶ s⁻¹·cm⁻² 以上。但大面积 MCP 计数率的动态范围限定于其体电阻和通道密度之间的折中权衡。更大面积更小孔径意味着需要更低体电阻,低电阻热功耗产生的热量,加之其负温度系数的电阻特性,不仅影响光电阴极的热发射,甚至会导致 MCP 的热逸溃。LAPPD 的 203 mm×203 mm 的 20 μm 孔径 ALD GCA MCP 的体电阻最低限定在 5 MΩ。

ALD 的 MCP 功能化,使通道阵列基体与通道壁表面功能材料的分离制作和单独优化成为可能,为 MCP 提供了优化改进途径。传统 MCP 借助 ALD 的二次发射优化覆层,可获得更高且持续稳定的增益^[44]。而由空心毛细管拉制制成的 ALD GCA MCP,其通道内壁平滑度及气体吸附程度得到显著改善,这不仅可有效减少离子反馈,还可缩短探测器封装过程中 MCP 除气预处理时间。只是 GCA MCP 的生产方法及成本效率与传统 MCP 没有实质性差别。

新一代 MCP 光子探测器,将更多地采用交流 (AC) 耦合容性取样读出,这类同于由每个阳极单元与一个电容器和一个电阻器并联而成的电阻屏构造的电阻电容链多阳极阵列。这种 AC 耦合的电阻屏构造,容性取样的脉冲上升时间,依然遵循电阻层累积的 MCP 输出电荷云的时间构架。MCP 电荷云在电阻层及其氧化铝衬底端窗中的空间弥散的时间关系则遵循^[45]

$$\rho(r, t) = \frac{RC}{2t} \exp(-r^2 RC/4t), \quad (3)$$

式中, r 为电荷云在衬底中的空间弥散距离, C 为电容率, R 为电阻率。这里 RC 决定于电阻层表面电阻与氧化铝陶衬底阳极端窗介电常数和厚度的电容之积。为保持与直接电荷读出方式水平相当的脉冲振幅和空间分辨,电阻屏与 MCP、与外电极或多层陶瓷嵌入电极间的氧化铝陶瓷衬底的厚度必须加以限定,特别是陶瓷衬底,通常衬底厚度需限定在 1 mm 之内,这样封装管的机械强度就成为一个亟待解决的问题,特别是对于大面积 MCP 光子探测器。而多层陶瓷嵌入式固定电极,不仅可构成一个具有优异的、真空的、完整性的阳极端窗,同时可加强阳极端窗的机械强度。而在采用 AC 耦合容性取样电阻屏结构的探测器模块中,还可将光电阴极的电位设置为地,电阻屏设置在高电位,拾取阳极仍设为地,这有利于保持对前放的低容载,且能够降低其在馈电路上电流泄漏的机会,如图 8 所示。相比于直接读出 DC 耦合阳极固定接地,可避免光电阴极高电位 (3~5 kV) 工作带来的诸多隐患。

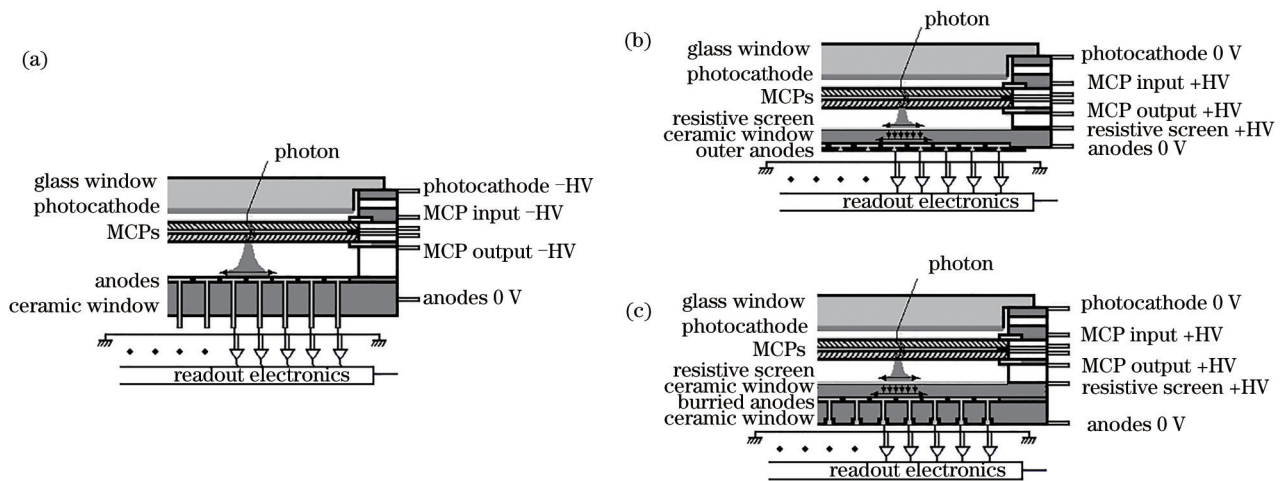


图 8 直接读出和容性读出的结构示意图。(a)DC 耦合内电极直接读出;(b)电阻屏内电极结合外拾取电极的 AC 耦合容性读出;(c)电阻屏内电极结合嵌入式外拾取电极的 AC 耦合容性读出

Fig. 8 Schematic of direct readout and capacitive readout. (a) DC coupled direct readout with internal electrode; (b) AC coupled capacitive readout with resistance screen internal electrode coupling outer pickup electrode; (c) AC coupled capacitive readout with resistance screen internal electrode coupling embedded pickup electrode

MCP 光子探测器可配置成多通道的光子计数器和模拟光子脉冲分析仪。新一代的 MCP 光子探测器,采用电阻屏构造的 AC 耦合容性取样读出,便于选择及优化满足不同应用所需配置的读出方案和电子学组件,便于提供高时间分辨、高空间分辨、高计数率及同步事件等。其中,阳极垫的二维阵列可在时间空间分辨及计数率之间折中选择;射频条带传输线一维阵列可实质性地减少读出通道数量,达到更高的时间分辨;而多层陶瓷嵌入式固定电极,可加强探测器封装模块强度。由此新一代的 MCP 光子探测器将成为特定读出方案的一个优选。

4 MCP 光子探测器时间分辨的影响因素

光子到达时间的测量,因不同光子事例而异,

$$\Delta t = \frac{\Delta u}{u} \times \frac{t_{\text{rise}}}{\sqrt{n}} = \frac{\Delta u}{u} \times \frac{t_{\text{rise}}}{\sqrt{f_s \times t_{\text{rise}}}} = \frac{\Delta u}{u} \times \frac{\sqrt{t_{\text{rise}}}}{\sqrt{f_s}} = \frac{\Delta u}{u} \times \frac{1}{\sqrt{3f_s - f_{3\text{dB}}}}, \quad (4)$$

式中, $\Delta u/u$ 是信号的噪声, t_{rise} 是信号上升时间, n 是沿信号上升沿采集的样本数, f_s 是采样率, $f_{3\text{dB}}$ 是脉冲最高频率分量。这里假定噪声为非相关白噪声,与实际情况并不相符。

离散电极垫的二维密集阵列阳极和高带宽射频传输线一维阵列阳极,可保持 MCP 的时间分辨,即便是电阻屏构造的容性取样读出,仍可保留时间分辨的模拟带宽,保持与直接电荷读出方式水平相当的脉冲振幅和空间弥散。采用 ASIC 的快速多通道前端电子学组件与传输线阳极集成,通过波形取样来测量脉冲序列的增益和到达时间,沿信号上升沿多点快速密集取样,可达到数皮秒甚至更好的定时提取精度^[15]。此时阳极及前端电子学组件的带宽、采样率和噪声不再是 MCP 光子探测器时间分辨的瓶颈。时间分辨的终极极限取决于来自探测器本身从光电阴极的起始光电子至电子雪崩过程的渡越时间弥散或上升时间晃动。图 9 给出由示波器记录的 Planacon XP85011 探测信号的脉冲波形。

探测器信号起始于光电阴极将光子转变成光电子。光电子发射的初始能量和初始速度很低,光阴极光电子发射时间常数、发射角及其初速度分布,对渡越时间涨落的影响几乎可以忽略。

光阴极到 MCP 的间隙及电压都会影响光电子的渡越时间。但雪崩电子的演变起始于光子的首次撞击。首次撞击的发生位置引入不同渡越路径

这个定时不确定性也称为时间分辨率,定义为时间增益涨落分布概率的 FWHM。时间分辨的瓶颈首先来自探测器阳极及前端电子学组件的固有带宽、采样率和噪声,终极限定则取决于探测器构造本身,限定于不同探测信号间的渡越时间弥散和上升时间晃动。这里不考虑光子辐射到达探测器光阴极前其本身的时间弥散。

即便是精确可重复的信号脉冲,前端电子学组件的噪声,仍会导致过阈值时间提取存在不确定性。同时,噪声对时间晃动的影响,与信号上升时间、采样率和高频分量损失及脉冲数字化的量化效率存在关联。假定满足 Shannon-Nyquist 条件,定时提取精度可描述为^[46-47]

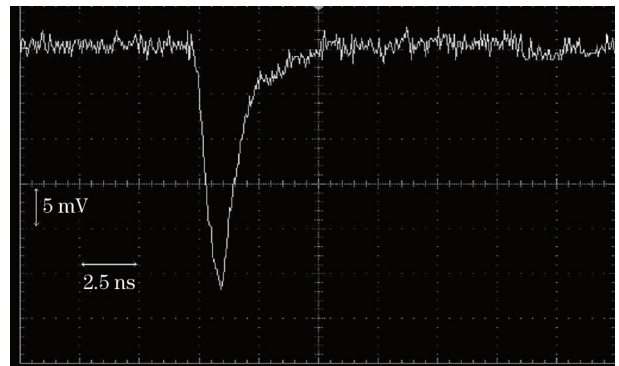


图 9 由示波器记录的 Planacon XP85011 探测信号的脉冲波形

Fig. 9 Signal from Photonis XP85011 recorded by an oscilloscope

的长度差异,如图 10 所示,该差异在单光电子情形下是导致时间晃动最重要的因素。在多光电子情形下,时间晃动则随光电子数的增加而减小,但其与光子数的确切关系,取决于光电子进入一个通道还是多个通道,以及通道是否饱和。

总体上来说,更小孔径、更大倾角的通道,可减少光电子首次撞击在通道内由不同位置引入的渡越路径差异导致的时间晃动。但撞击于 MCP 非开口区域时,其内部的通道浅表的电极覆层上的光电子、形成的背向散射二次电子以及直接弹性反弹的反弹光电子在电场作用下返回,即便这些电子最终进入周边通道,引发电子雪崩级联,但也会引入渡越路径

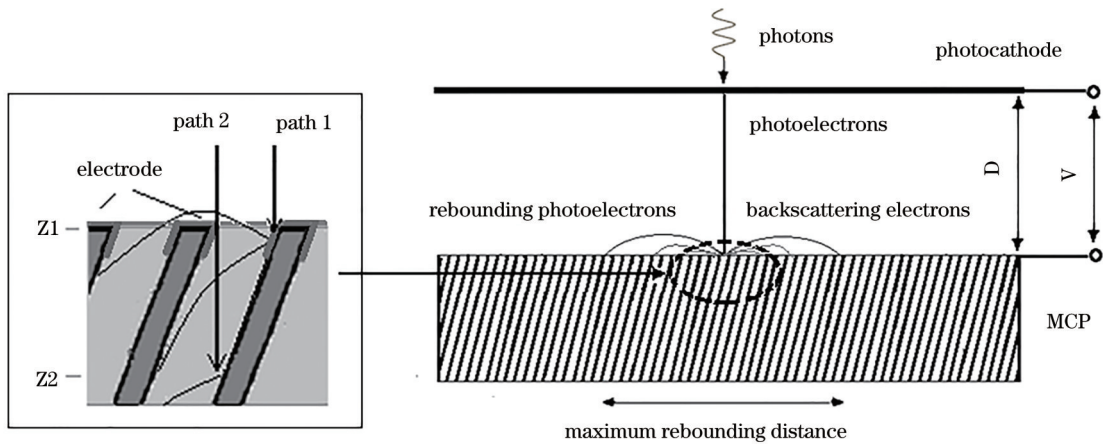


图 10 光电子首次撞击可能发生的不同渡越路径

Fig. 10 Possible different paths for photoelectron first strike

的长度差异。反弹光电子的跨越距离正比于 MCP 与光阴极间的场强,且部分光电子存在因能量损失而无法引发雪崩级联的情况。背向散射二次电子,虽其初始能量小,跨越距离也小,但会形成渡越时间的拖尾。

首次撞击的二次发射数量,及其初始方向和能量的随机性,对时间晃动同样有着重要的影响。一个合适的加速电压,能够确保光电子首次撞击获得足够能量,可使二次发射更有效,而借助于覆盖 MCP 电极表面包括通道内壁具有高二次发射特性的优化覆层,可获得更高产额的二次发射电子,同时最大限度地减少了光电子直接反弹的可能,使一个开口面积比为 50%~60% 的 MCP,能够获得接近 100% 的收集效率^[39]。而背向散射二次电子的初始能量很低,跨越距离也相应较短,并且由其引入的渡越路径差异导致的时间晃动,也将随二次发射电子数量的增加而减小。

缩减光阴极与 MCP 间隙,可减小背向散射电子引入的渡越路径的长度差异,能够使更多背向散射电子保留在主峰,消除渡越时间的拖尾。早期的 Planacon 的这个间隙为 12 mm,目前已缩减到 6~7 mm,如能缩减至 0.75 mm,则可消除拖尾^[48]。在应用空间成像中,中小尺寸 MCP 光子探测器为保证良好的空间分辨率,其这个间隙甚至可缩减到 0.2~0.3 mm^[49]。不过,缩减这个间隙如同缩减 MCP 的孔径,对于大面积 MC 光子探测器来说,都存在相当的技术难度。

随后的通道内电子雪崩级联,受二次电子发射时间散布、二次电子角度和能量分布、通道壁正电荷累积效应及空间电荷效应等的影响,其结果不仅

包括由单个光电子生成的一组雪崩电子,其将在些许不同的时间到达,还包括不同光电子间的雪崩电子,其存在一个渡越时间的弥散及上升时间的晃动。MCP 级联增大了路径长度,引起了路径长度更大的变化,雪崩演化过程的时间晃动,也将在两片 MCP 间传递。时间晃动还与通道内壁的光滑程度相关。通道内壁的二次发射优化覆层,不仅可对电子级联提供一个良好二次发射特性,确保通道内电子雪崩级联良好的增益时间涨落,获得更高且持续稳定的增益,还可显著延长 MCP 的工作寿命。但总体上来说,通道内雪崩电子级联的脉冲展宽及脉冲上升时间,更多地依存于通道孔径及受通道孔径限定的通道长度。而高增益的饱和工作状态,可产生更窄的脉冲展宽,同时可达到更高的时间分辨率。

对于 MCP 与阳极间的间隙及电压,着重考虑 MCP 出射电荷云在阳极上的覆盖面积,及随后的空间分辨率。而其对时间晃动的影响,取决于 MCP 出射电子初速度及方向的差异。增大 MCP 与阳极间的场强, MCP 出射电子的初速度和角度的变化对探测器渡越时间弥散及上升时间晃动的影响,可减少到最低程度。在这里,脉冲上升时间 t 与出射电子的初速度 u 和加速度 α 及 MCP 与阳极间隙 d 的关系,可描述为^[34]

$$\frac{dt}{du} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{u}{u^2 + 2\alpha d} - 1 \right). \quad (5)$$

MCP 是探测器的核心器件,同样也是探测器极限时间分辨的决定要素。时间分辨的极限取决于 MCP 的几个简单结构参数和物理特性的组合,如孔径、倾角、二次发射特性、组件的间距和工作电压

等。总体来说,更小孔径、更薄厚度、更大倾角的光子雪崩级联的 MCP,可最小化光电子及其引发的电子雪崩级联的渡越路径长度差异导致的时间晃动。但要获得更高的时间分辨率,MCP 还应对入射光电子的首次撞击及随后的电子雪崩级联,提供良好二次发射特性,并且 MCP 与光电阴极之间的间隙需尽可能小。结合一个合适的工作电压设置,获得对单光电子良好的振幅分辨率,以确保电子雪崩级联良好的增益时间涨落,最小化其对脉冲形状及其时间晃动的影响,同时保持足够低的背景事件率,能够有效抑制离子反馈。

5 结束语

基于 GCA ALD MCP 的 200 mm×200 mm 平板 MCP-PMT 的大面积皮秒光子探测器 LAPPD,历经近十年的开发,最终完成了产品的中试和商业转化,其性能与目前市场上基于相同通道孔径的传统 MCP 的中小尺寸 MCP-PMT 的性能相当,但与经济型大面积皮秒光子探测器的初衷已相去甚远。基于传统 MCP 改进的中小尺寸 MCP-PMT 仍不失为是目前的一个权宜之选。

MCP 光子探测器是理想的 Cherenkov 光探测器,MCP 的特征尺寸及探测器的紧凑结构决定其具有超快的时间响应及精细的位置分辨能力,即便在 2 T 磁场中其工作也不受影响。ASIC 的低功耗多通道前端电子学定制芯片,与探测器阳极直接耦合,由基于 FPGA 的可扩展前端和数据采集系统读取数据,可提供全数字数据输出。虽然更多的被称之为 MCP-PMT,但 MCP 光子探测器实质上兼具计数和模拟两种工作模式,可配置成多通道单光子计数器或模拟光子脉冲分析仪。且无论原理结构,还是封装构造,MCP 光子探测器都更类似于像增强器。特别是采用电阻屏构造容性取样读出的新一代 MCP 光子探测器,可构成一个读出阳极与封装管可物理分离的探测器模块,便于提供高时间分辨、高空间分辨、高计数率及同步事件等。

MCP 光子探测器的时间分辨,其瓶颈首先来自阳极和前端电子学组件的固有带宽、采样率和噪声,最终则限定于探测器本身源于从光电阴极的起始光电子至电子雪崩过程的渡越时间弥散或上升时间晃动,取决于 MCP 几个结构参数和物理特性的组合,如孔径和倾角、二次发射特性、组件的间距和工作电压等。总体来说,更小孔径、更薄厚度、

更大倾角的光子雪崩级联的 MCP,可最小化由光电子及其引发的电子雪崩级联的渡越路径长度差异导致的时间晃动。但要获得更好的时间分辨,不仅需调节孔径和倾角,MCP 还应对同时入射光电子的首次撞击及随后的电子雪崩级联,提供良好二次发射特性,最大可能地缩减 MCP 与光电阴极间的间距,结合一个合适的工作电压设置,获得对单光电子良好的振幅分辨率,确保电子雪崩级联良好的增益时间涨落,最小化其对脉冲形状及其时间晃动的影响,同时保持足够低的背景事件率,且有效抑制离子反馈。

MCP 光子探测器可实现的结构与性能,更多地受限于实际工艺的可实现程度,特别是大面积 MCP 光子探测器,其时间分辨更多地取决于可工业实现的 MCP 及探测器的结构和特性参数,以及成本控制和生产效率之间的权衡。实现真正皮秒时间分辨的经济型大面积 MCP 光子探测器,还需寄希望于高效的精细化大面积 MCP 研制技术及大面积 MCP 光子探测器批量制造技术的突破。

参 考 文 献

- [1] Seitz B, Britting A, Cowie E, et al. Photon detection systems for modern Cherenkov detectors [J]. *Physics Procedia*, 2012, 37: 796-799.
- [2] Credo T, Frisch H, Sanders H, et al. Picosecond time-of-flight measurement for colliders using Cherenkov light[C]//IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004, October 16-22, 2004, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2004: 586-590.
- [3] García L C. Testing micro-channel plate detectors for the particle identification upgrade of LHCb[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 695: 398-402.
- [4] Inami K, Kishimoto N, Enari Y, et al. A 5 ps TOF-counter with an MCP-PMT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, 560(2): 303-308.
- [5] Céolin D, Chaplier G, Lemonnier M, et al. High spatial resolution two-dimensional position sensitive detector for the performance of coincidence experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(4): 043302.
- [6] Lapington J S, Fraser G W, Miller G M, et al. A high-throughput, multi-channel photon-counting detector

- with picosecond timing[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 604(1/2): 199-201.
- [7] Ohnuki T, Michalet X, Tripathi A, et al. Development of an ultrafast single photon counting imager for single molecule imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6092: 60920P.
- [8] Michalet X, Siegmund O H W, Vallerger J V, et al. A space- and time-resolved single photon counting detector for fluorescence microscopy and spectroscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6092: 60920M.
- [9] Ronzhin A, Los S, Ramberg E, et al. Development of a new fast shower maximum detector based on microchannel plates photomultipliers (MCP-PMT) as an active element[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 759: 65-73.
- [10] Finogeev D A, Grigoriev V A, Kaplin V A, et al. Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 798: 012168.
- [11] Seitz B. Position sensitive photon detectors for nuclear physics, particle physics and healthcare applications[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7 (1): C01031.
- [12] Kosev K, Butterling M, Anwand W, et al. Evaluation of a microchannel-plate PMT as a potential timing detector suitable for positron lifetime measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 624(3): 641-645.
- [13] Va'vra J, Benitez J, Leith D W G S, et al. A 30 ps timing resolution for single photons with multi-pixel Burle MCP-PMT[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 572(1): 459-462.
- [14] Adams B W, Attenkofer K, Bogdan M, et al. A brief technical history of the large-area picosecond photodetector(LAPPD)collaboration[EB/OL].(2016-03-06)[2020-09-01]. <https://arxiv.org/pdf/1603.01843.pdf>.
- [15] Lee S W, Peng Q, Mane A, et al. The development of anodic aluminum oxide based micro-channel plate for large-area photo-detector[J]. MRS Online Proceedings Library, 2011, 1303(1): 1335.
- [16] Craven C, Bennis D C, Bond J L, et al. Large area microchannel plates for LAPPD[C]//Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP2014), July 02-06, 2014, Amsterdam, the Netherlands. Trieste, Italy: Sissa Medialab, 2015.
- [17] Genat J F, Varner G, Tang F K, et al. Signal processing for picosecond resolution timing measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 607(2): 387-393.
- [18] Grabas H, Obaid R, Oberla E, et al. RF strip-line anodes for Psec large-area MCP-based photodetectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 711: 124-131.
- [19] Byrum K, Frisch H J, Genat J F C, et al. Position sensing using pico-second timing with micro-channel plate devices and waveform sampling[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(2): 525-532.
- [20] Oberla E, Grabasa H, Bogdana M, et al. A 4-channel waveform sampling ASIC in 0.13 μm CMOS for front-end readout of large-area micro-channel plate detectors[J]. Physics Procedia, 2012, 37: 1690-1698.
- [21] Minot M J, Bennis D C, Bond J L, et al. Pilot production & commercialization of LAPPD[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 787: 78-84.
- [22] Minot M J, Popecki M A, Wetstein M J, et al. Large area picosecond photodetector (LAPPD) performance test results[C]//2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC 2018), November 10-17, 2018, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [23] Lyashenko A V, Adams B W, Aviles M, et al. Performance of large area picosecond photo-detectors (LAPPD) [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 958: 162834.
- [24] Incom. LAPPD: large area picosecond photodetector [EB/OL]. [2020-09-01]. <https://incomusa.com/wp-content/uploads/LAPPD-Data-Sheet-05-19.pdf>.

- [25] Angelico E, Elagin A, Frisch H J, et al. Air-transfer production method for large-area picosecond photodetectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 053105.
- [26] Starič M. Performance studies of the Belle II TOP counter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 766: 237-240.
- [27] Hamamatsu. Microchannel plate photomultiplier tube R10754-07-M16[EB/OL]. [2020-09-01]. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R10754_TPMH1364E.pdf.
- [28] Matsuoka K. Development and production of the MCP-PMT for the Belle II TOP counter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 766: 148-151.
- [29] Harnew N. TORCH: a large-area detector for precision time-of-flight measurements at LHCb[J]. *Physics Procedia*, 2012, 37: 626-633.
- [30] Harnew N, Brook N, Castillo García L, et al. The TORCH time-of-flight detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 824: 106-110.
- [31] García C L, Brook N, Cowie E N, et al. Microchannel plate photon detector studies for the TORCH detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 787: 197-202.
- [32] Lapington J S, Ashton T J R, Ross D, et al. Progress towards a 256 channel multi-anode microchannel plate photomultiplier system with picosecond timing[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 695: 78-82.
- [33] Conneely T M, Milnes J S, Howorth J, et al. Extended lifetime MCP-PMTs: characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates, in a sealed photomultiplier tube[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 732: 388-391.
- [34] Milnes J S, Howorth J. Picosecond time response characteristics of microchannel plate PMT detectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5580: 730-740.
- [35] Photek. MAPMT253 multi-anode MCP-PMT[EB/OL]. [2020-09-01]. <http://www.photek.com/pdf/datasheets/detectors/DS034-Auratek-MAPMT253-Detector-Datasheet.pdf>.
- [36] Lehmann A, Britting A, Eyrich W, et al. Performance studies of microchannel plate PMTs in high magnetic fields[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 595(1): 173-176.
- [37] Hirose S. Performance of the MCP-PMT for the Belle II TOP counter in a magnetic field[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 766: 163-166.
- [38] Mirzoyan R, Laatiaoui M, Teshima M, et al. Very high quantum efficiency with bialkali photo-cathode [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2006, 567(1): 230-232.
- [39] Guest A J. A computer model of channel multiplier plate performance[J]. *Acta Electronica*, 1971, 14(2): 79-97.
- [40] Hill G E. Secondary electron emission and compositional studies on channel plate glass surfaces [M]//Morgan B L, Airway R W, McMullan D, et al. Photo-electronic image devices, proceedings of the sixth symposium. Amsterdam: Elsevier, 1976: 153-165.
- [41] Giudicotti L, Bassan M, Pasqualotto R, et al. Simple analytical model of gain saturation in microchannel plate devices[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(1): 247-258.
- [42] Landen O L, Bell P M, Oertel J A, et al. Gain uniformity, linearity, saturation, and depletion in gated microchannel-plate X-ray framing cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 2002: 2-13.
- [43] Wiza J L. Microchannel plate detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, 162(1/2/3): 587-601.
- [44] Orlov D A, Ruardij T, Pinto S D, et al. High collection efficiency MCPs for photon counting detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13(1): C01047.
- [45] Dixit M. Development of high resolution Micro-Pattern Gas Detectors with wide readout pads[J].

- Journal of Instrumentation, 2010, 5(3): P03008.
- [46] Adams B W, Elagin A, Frisch H J, et al. Timing characteristics of large area picosecond photodetectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 795: 1-11.
- [47] Shaver D S, Ritt S, Pichler B J, et al. Novel calibration method for switched capacitor arrays enables time measurements with sub-picosecond resolution[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 3607-3617.
- [48] Field C, Hadig T, Leith D W G S, et al. Development of photon detectors for a fast focusing DIRC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 553(1/2): 96-106.
- [49] Conti L, Barnstedt J, Hanke L, et al. MCP detector development for UV space missions[J]. Astrophysics and Space Science, 2018, 363(4): 1-8.