

〈微光技术〉

低阻 MCP 在直流模式下的线性动态范围

姚文静^{1,2}, 刘术林^{2,3}, 闫保军², 赵高峰¹, 董永伟², 王志刚²,
朱科军², 张斌婷^{2,3}, 温凯乐², 王玉漫^{2,4}, 谷建雨^{2,5}

(1. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475004;

2. 中国科学院高能物理研究所, 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;

3. 中国科学院大学 核科学与技术学院, 北京 100049; 4. 南京大学 物理学院, 江苏 南京 210093;

5. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 对国产低电阻微通道板 (microchannel plate, MCP) 在直流模式下的线性动态范围开展了详细研究。利用深紫外光源 (低压汞灯) 激发蒸镀有金阴极的 MCP, 获得较宽范围的输入电流, 进而测试了与低阻 MCP 线性动态范围相关的各项参数, 包括电阻、增益、传导电流以及最大最小输入电流等。结果表明: 降低体电阻能够有效提高 MCP 的线性动态范围, 其最大和最小输入电流之间跨越 6 个数量级; 该低阻 MCP 在 3 种不同工作电压下, 最大输出电流为传导电流的 16%~19%, 与国际上高输出技术 MCP 相比, 性能相当, 能够应用于相关领域。

关键词: 微通道板; 电阻; 线性动态范围; 增益

中图分类号: TN152 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)03-0310-05

Linear Dynamic Range of Low Resistance Microchannel Plate in DC Mode

YAO Wenjing^{1,2}, LIU Shulin^{2,3}, YAN Baojun², ZHAO Gaofeng¹, DONG Yongwei², WANG Zhigang²,
ZHU Kejun², ZHANG Binting^{2,3}, WEN Kaile², WANG Yuman^{2,4}, GU Jianyu^{2,5}

(1. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. Institute of High Energy Physics, CAS, State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China;

3. School of Nuclear Sciences and Technology, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

4. School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

5. School of Physical Science and Engineering Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this paper, a detailed study of the linear dynamic range of the domestic low-resistance microchannel plate (MCP) in DC mode is carried out. In the experiment, a deep ultraviolet light source (low-pressure mercury lamp) is used to excite the MCP with a gold film in order to obtain a wide range of input current, and then various parameters related to the linear dynamic range of the low-resistance MCP are tested. These parameters include resistance, gain, strip current, the maximum and minimum input current, etc. The results show that reducing the resistance can effectively improve the linear dynamic range of the MCP, and the maximum and minimum input current span over 6 orders of magnitude. The low-resistance MCP has a maximum output current of 16% to 19% of the strip current under three different operating voltages. It has comparable performance to the international high-output MCP technology and can be applied in related fields.

Key words: microchannel plate, resistance, linear dynamic range, gain

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-06-09.

作者简介: 姚文静 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为物理学。E-mail: yaowj@ihep.ac.cn.

通信作者: 刘术林 (1963-), 男, 研究员, 从事微通道板探测器研究。E-mail: liusl@ihep.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (11535014); 国家自然科学基金面上项目 (11975017, 11675278); 核探测与核电子学国家重点实验室 (SKLPDE-ZZ-202015, SKLPDE-ZZ-202102)。

0 引言

探索宇宙暗物质粒子一直是天体粒子物理研究领域中最前沿的课题之一。中科院高能物理研究所提出的中国空间站高能宇宙辐射探测设施 (high energy cosmic-radiation detection facility, HERD) 项目^[1], 将以前所未有的灵敏度搜寻暗物质, 探究并理解宇宙线起源的世纪之谜, 同时开展高能伽马射线全天巡天和监视。HERD量能器采用了三维位置分辨五面灵敏的创新设计, 可以实现更大的接收度并将宇宙线观测能量扩展至“膝”区。量能器共采用7500块晶体, 其输出光子由波长位移光纤阵列传输到光锥后, 在光阴极内产生光电子, 光电子经过大动态范围微通道板的倍增后, 轰击荧光屏, 再通过光锥耦合到sCMOS相机读出^[2]。其中, 增强相机系统最重要的组成部分就是含有微通道板 (microchannel plate, MCP) 的像增强器。为了满足HERD更宽探测能区、高粒子鉴别能力、高能量分辨能力等要求, 研制出高线性动态范围的MCP显得至关重要。

1 MCP及其线性动态范围

MCP是一种二维电子倍增元件, 其主体通常是厚度为亚毫米量级的薄板, 大量平行的微通道在薄板上密集分布, 并贯穿其上下表面, 每个微通道的内壁都有二次电子发射材料, 可以独立进行电子倍增。由于MCP具备时间响应快、增益高、均匀性好等优点, 可以用来探测电子、X射线、 γ 射线和带电粒子等。因而在微光像增强器、飞行时间质谱仪、核辐射以及空间粒子探测器等方面得到广泛应用, 研制出优良性能的MCP还能够满足医疗、生物、军事以及天文物理等对高性能探测器的需求。

动态范围是MCP性能的一项关键指标, 其定义在不同的文献中有所差异: 第一种定义是指MCP在某一工作电压下保持增益不变时, 可探测到的最小信号与最大信号的范围^[3]; 第二种定义为探测到的输出电流与输入电流始终保持线性关系时, 所对应的输入电流 (或输出电流) 的范围; 第三种定义是刚进入饱和状态时输入电流密度与最小可探测输入电流密度的比值^[4]。以上3种定义都是用来评判MCP线性动态范围这一性能的不同表述。为了便于理解, 本文所指的线性动态范围是指在某一工作电压下, 在保持增益不变时, 所对应的最小输入电流与最大输入电流的范围, 即与第一定义的含义相当。

在线性动态范围内, 最小输入电流作为MCP的探测信号的下限, 不能简单地把MCP的暗电流作为

MCP探测信号的下限, 实际上测得的暗电流是指无输入信号时, MCP输出端的电流, 即暗电流属于输出电流。事实上, MCP在线性动态范围内的探测下限应是暗电流除以此时的增益, 即等效输入暗电流 $E EI^{[5]}$ 。MCP线性动态范围的上限, 在此定义为增益保持在90%时对应的最大输入电流。提高MCP线性动态范围实际上就是转化为如何进一步降低MCP的暗电流和如何提高其增益并维持在90%时, 对应的输出电流。

电子在MCP内倍增放大时, 通道内壁会不断地发射二次电子, 随着输入电流的增大, 通道内壁需要的二次电子就会越多。特别是在通道的末端, 当输入的二次电子过多时, 通道内壁发射层的电子无法得到及时的补充, 该效应在MCP体电阻过高时尤其明显。此时, MCP末端会聚集大量的倍增电子, 这些电子电荷形成的电场与原来通道内的电场相互叠加, 会出现空间电荷饱和效应^[6], 进而影响通道内部的电场分布, 导致增益降低。MCP在工作时, 通道内部会产生传导电流 (带电流) I_s , 传导电流可用于补充通道内壁损失的二次电子, 传导电流越大, 补偿能力越高。由于 $I_s = V/R$, 其中 V 和 R 分别为MCP的工作电压和电阻, 因此在一定的工作电压下, 通过降低MCP的电阻, 可以增大MCP的传导电流, 从而提高通道内壁二次电子补偿能力, 以满足更大的输入信号的倍增^[3]。

国际上已有部分针对MCP动态范围的相关研究, 美国的Galileo公司 (Burle公司的前身, 后被法国Photonis收购) 和日本的滨松公司先后都曾研制出体电阻在5~10M Ω 的MCP, 被称之为高输出技术 (high output technology MCP, HOT MCP^[7]), 它在不增加等效输入暗电流的情况下, 增加了最大输入电流 (在增益不变的条件下), 即在维持增益不变的条件下, 扩大可动态范围, 由此能够应用于某些具有特殊需求的领域。鉴于HERD项目的实际需要, 即通过提高MCP线性动态范围实现HERD更宽的粒子探测能区, 北方夜视技术股份有限公司研制出新型低电阻MCP, 我们在此对其工作体电阻、增益、传导电流以及线性动态范围进行了详细的测试研究。

2 测量装置和方法

图1是低阻MCP工作在直流模式下的测试原理示意图, 为确保测试的准确性和重复性, 除测试仪表测试的数据可靠外, 包括镀金MCP、低阻MCP以及荧光屏所在腔室的真空度优于 10^{-5} Pa, 实验使用盘型低压汞灯 (峰值波长为253.7nm) 作为深紫外光源。

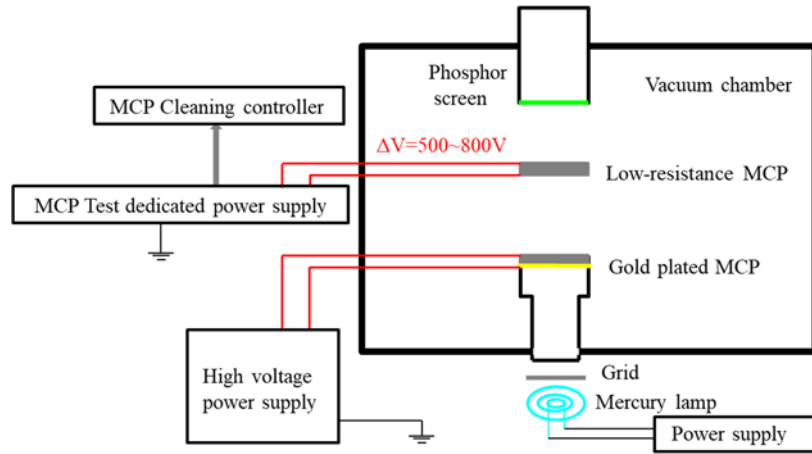


图1 低阻MCP测试原理图

Fig.1 Low-resistance MCP test principle diagram

为了给MCP提供大范围且连续可调的输入电流 I_{in} ，光源与待测MCP之间放置了另一镀金MCP，其电压由多路高压电源提供，入射光照射至镀金MCP表面的Au膜后，发生光电效应，产生的光电子会在该MCP中得到倍增，其放大倍数可通过改变镀金MCP两端电压进行调节；经过镀金MCP放大后的电流作为待测MCP的输入电流；采用荧光屏来观察MCP的成像质量以及作为阳极来收集MCP的输出电流。待测MCP的工作电压由MCP测试专用电源提供，其输入电流 I_{in} 、输出电流 I_{out} 以及传导电流 I_s 均可通过MCP清刷控制器读出。另外，由于低阻MCP的暗电流较弱，故由灵敏度更高的Keithley 6517B静电计测量。实验采用镀金MCP产生输入电流，不仅是由于Au薄膜光电发射稳定且产生的光电流密度分布均匀^[8]，而且通过调节其工作电压，可以产生从皮安级 ($10^{-12}A$) ~ 亚微安 ($10^{-5}A$) 范围的输出电流，为大动态范围MCP的研究提供测试条件。

本测试实验采用的MCP是由北方夜视技术股份有限公司南京分公司提供的 $\phi 25\text{ mm}$ 的MCP，其标称电阻为 $8\text{ M}\Omega$ 。主要测量了其在 $500\sim 800\text{ V}$ 工作电压下，输入电流位于 $6\times 10^{-14}\sim 2\times 10^{-8}\text{ A}$ 区间内的输出电流、增益以及传导电流。

3 测量结果与分析

图2显示了固定输入电流为 $1.18\times 10^{-10}\text{ A}$ 时， $\phi 25\text{ mm}$ MCP的工作体电阻随工作电压变化关系的测量结果。在 800 V 工作电压下，该MCP的工作体电阻为 $8\text{ M}\Omega$ ，相比于工作体电阻在 $100\text{ M}\Omega$ 左右的传统MCP^[9]，其电阻随工作电压的稳定性稍差，特别是在有输入的工作状态下。在这里特别强调一下，MCP

的工作体电阻不同于技术指标所提出的体电阻，前者是MCP在有输入的前提下MCP施加工作电压时，测量其回路电流，该工作电压与回路电流的比值，后者则是MCP无任何输入，在其输入、输出端加上 500 V 时的回路电流， 500 V 电压除以该回路电流即为MCP的电阻。事实上，在输入电流较小时，MCP供电电源提供的电流，一方面，提供MCP电子倍增最后输出到阳极的电子流，另一方面，维持回路稳定的传导电流，有时也称带电流 (strip current)，当MCP输入电流较大时，电路变得复杂，在此不涉及相关内容，故此，不做深入讨论。

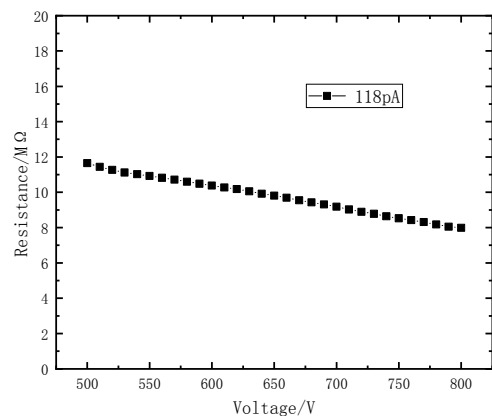


图2 在 118 pA 输入电流下，MCP的工作体电阻随工作电压的变化

Fig.2 The resistance of the MCP varies with the operating voltage under 118 pA input current

当MCP在直流模式时，其增益 G 的定义为输出电流 I_{out} 与输入电流 I_{in} 的比值。图3为固定输入电流 $I_{in}=2.86\times 10^{-10}\text{ A}$ 时，低阻MCP的直流增益随工作电压变化的关系曲线，可以看出其在 800 V 工作电压下的增益能达到 5.8×10^3 左右。

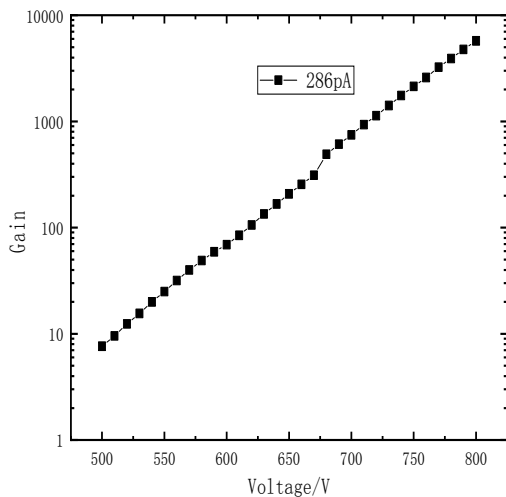


图3 MCP的增益随工作电压的变化关系

Fig.3 The relationship between the gain of the MCP and the operating voltage

图4则表示在3组不同工作电压下，MCP的增益随输出电流的变化关系。与传统的MCP相比，增益确有所下降，这是因为MCP动态范围的增加在某种程度上是以牺牲增益为代价的^[10]。考虑到HERD应用场景更倾向于低增益，考虑到后端荧光屏和Is CMOS相机的增益补偿具有能力，牺牲MCP的增益是允许的。

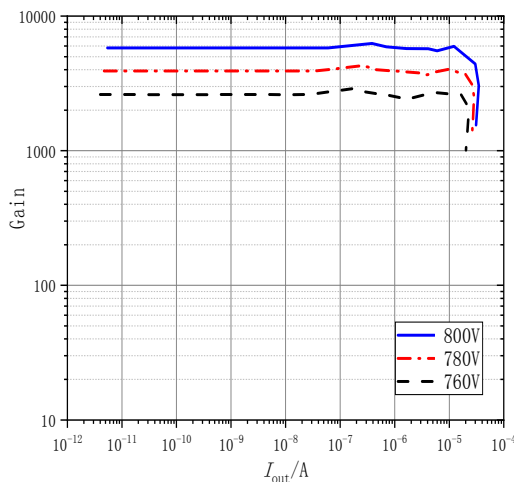


图4 MCP的增益随输出电流的变化关系

Fig.4 The relationship between the gain of the MCP and the output current

图5为低阻MCP工作电压在760V、780V、800V时的线性动态范围测试结果，该测试的关键在于确定低阻MCP的最小输入电流和最大输入电流。其中，最小输入电流是由暗电流除以增益对应的等效输入电流得到；最大输入电流则是通过在实验测试过程中确认，即在确定的工作电压下，不断增加输入电流，直到输出电流与此时的输入电流的比值降低到原来增益的90%时，此时的输入电流即为最大输入电流。从图中可以看出，低阻MCP在输入电流范围为 $10^{-15} \sim 10^{-9}$ A时，输出电流和输入电流能够保持很好的线性关系，线性动态范围跨越6个数量级，而传统MCP的最大输入电流仅为 10^{-10} A^[11]。由此可以看出低阻MCP线性动态范围要大于传统MCP的线性动态范围。

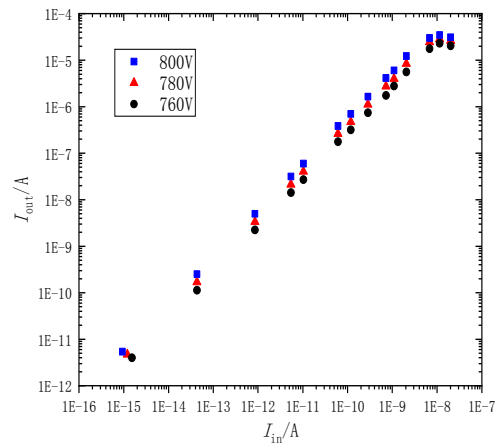


图5 低阻MCP的在不同工作电压下的输出电流随输入电流的变化关系

Fig.5 The relationship between output current and input current of the low resistance MCP under different operating voltages

表1是低阻MCP在不同电压下测量的相关技术参数，从中看出低阻MCP输出电流为传导电流的16%~19%，这与其他文章^[7]提到的当MCP输出电流占传导电流的7%~20%时增益不受抑制的结论一致，也从一个侧面验证我们的测试系统是可靠的。HOT MCP的输出电流为传导电流的10%时，其增益保持稳定^[7]，与之相比，北方夜视技术股份有限公司研制的这种低电阻MCP不仅显示出HOT MCP的高动态范围、宽线性响应等技术特征，甚至输出电流占传导电流的比值更大一些，依旧保持很好的线性。

表1 低阻MCP在不同工作电压下测得的参数

Table 1 The parameters of low resistance MCP under different working voltages

Voltage/V	Gain	Dark current/A	EEI/A	I_{in-max}/A	Linear dynamic range	I_{out}/I_s
760	2617	4.0×10^{-12}	1.53×10^{-15}	6.95×10^{-9}	4.54×10^6	19%
780	3918	4.7×10^{-12}	1.20×10^{-15}	3.58×10^{-9}	2.98×10^6	17%
800	5799	5.6×10^{-12}	9.66×10^{-16}	2.78×10^{-9}	2.88×10^6	16%

最大线性输出电流占传导电流的比值,与微通道板的材料和制作工艺有关。理论上,输出电流与传导电流比值越大,说明MCP从电源中拾取的电荷更多地转换成MCP的输出电流,相同情况下转换成焦耳热相对减少。至于更低电阻工作于更高电压导致的热效应,在此不做过多讨论。另外从表格数据中看出,线性上限随电压增加而下降,相应地,线性动态范围也随电压增加而下降,而暗电流则逐渐增加。因此,直观上倾向于在低偏压下有利于扩展动态范围,这个结果为低阻MCP的应用提供了参考。

提高MCP最大线性输出电流及其所占传导电流的比率,主要针对MCP材料及其还原后电阻层的性能,即电阻较低且电阻的温度系数^[12]也较低,同时,开发MCP的高二次电子发射材料,使得其二次电子发射系数的峰值向低能端移动,由此获得在较低的工作电压下获得较高的增益,由此不仅可以降低等效输入暗电流,结合低阻特性,还可以进一步提高最大输出线性电流,进而最大限度的提高MCP的动态范围,这是未来MCP在动态范围领域的最佳技术途径。

4 结论

采用新材料和新工艺,在等效输入暗电流并未发生明显提高的前提下,降低MCP的体电阻,尽可能将传导电流更大比例地转化为MCP的输出电子流,由此来提高MCP在直流工作状态下的动态范围是本课题研究的最终目的。基于HERD项目探测宽能区的信号的需求,研制大动态范围的增强型sCMOS相机的关键在于开发MCP的动态范围。通过对国产低电阻(8M Ω)MCP的测试分析,结果表明:当MCP工作电压分别在760V、780V和800V时,其最大输出线性电流为传导电流的19%、17%和16%,线性动态范围达6个数量级左右;较低的工作电压更有利于扩展其线性动态范围,而这正好契合HERD项目要求的MCP工作于低增益;未来最佳动态范围MCP的研制方向是:电阻及其电阻温度系数尽可能低、MCP在较低的工作电压下获得较高的增益。

参考文献:

- [1] DONG Y W, ZHANG S N, Ambrosi G, et al. Overall status of the high energy cosmic radiation detection facility onboard the future China's space station[C/OL]//ICRC, 2019, <https://doi.org/10.22323/1.358.0062>.
- [2] DONG Y W, XU M, WANG Z G, et al. A novel 3-D calorimeter for the high energy cosmic-radiation detection (HERD) facility onboard China's future space station[C/OL]//ICRC, 2017, <https://pos.sissa.it/301/253/pdf>.
- [3] Bruce Laprade, Maureen Wheeler, 卢耀华. 微通道板动态范围最佳化[J]. 应用光学, 1992(6): 23-25.
Bruce Laprade, Maureen Wheeler, LU Yaohua. Optimizing the dynamic range of the microchannel plate[J]. *Journal of Applied Optics*, 1992(6): 23-25.
- [4] 汪金祥. 高动态范围微通道板[J]. 应用光学, 1991(4): 20-23, 48.
WANG Jinxiang. Microchannel plate with wide dynamic range[J]. *Journal of Applied Optics*, 1991(4): 20-23, 48.
- [5] 吴奎. 微通道板特性参数测试系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
WU kui. Research on the Measurement System for the characteristic Parameters of Microchannel Plate[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
- [6] 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. 应用光学, 2004(5): 25-29.
PAN Jingsheng. Microchannel plates and its main characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004(5): 25-29.
- [7] Laprade B N, Csorba I P. The High output technology microchannel plate[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1989, **1072**: 102-110.
- [8] 田景全, 姜德龙, 吴奎. 测量MCP特性参数的紫外光电法[J]. 电子学报, 1990(5): 121-123.
TIAN Jingquan, JIANG Delong, WU Kui. UV Photo-electric method for measurement of MCP characteristic parameters[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1990(5): 121-123.
- [9] 白蔚海. $\phi 25\text{mm}$ 二代微通道板增益性能改进[J]. 应用光学, 1991(3): 30-32.
BAI Weihai. Gain performance improvement of $\phi 25\text{mm}$ generation II microchannel plates[J]. *Journal of Applied Optics*, 1991(3): 30-32.
- [10] 汪金祥. MCP的动态范围与增益—调整MCP电压提高成像清晰度的讨论[J]. 光学技术, 1992(3): 12-13.
WANG Jinxiang. Relationship between the dynamic range and the gain of MCP on discussion of increasing image definition of MCP through adjusting its working voltage[J]. *Optical Technique*, 1992(3): 12-13.
- [11] 田景全, 朱宝仁, 姜德龙, 等. 用紫外光电发射测量微通道板的电子增益[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1986(3): 44-49.
TIAN Jingquan, ZHU Baoren, JIANG Delong, et al. UV photo-emission for measuring electron gain of MCP[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1986(3): 44-49.
- [12] 刘术林, 彭磊, 许志清, 等. 高性能微通道板除气过程中电阻的变化[J]. 应用光学, 2007, **28**(6): 5.
LIU Shulin, PENG Lei, XU Zhiqing, et al. Resistance stability of high-performance microchannel plate during degassing process[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(6): 5.