

单螺旋通道的通道电子倍增器性能研究

张斌婷^{1,2} 刘术林^{1,3} 闫保军¹ 韦雯露^{1,2} 彭华兴^{1,2}

1(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)

2(中国科学院大学 物理科学学院 北京 100049)

3(中国科学院大学 核科学与技术学院 北京 100049)

摘要 在现有的微通道板皮料玻璃配方的基础上,经过一系列的制作工艺设计和改进,最终制作出了具有合适性能的单螺旋通道的通道电子倍增器;之后搭建了以盘香型钨灯丝作为输入电流的通道电子倍增器(Channel Electron Multiplier, CEM)模拟模式测试装置和以紫外发光二极管结合金阴极作为输入信号的 CEM 脉冲计数模式测试装置,对该器件的综合性能参数进行全面的测试与评价;测试结果表明:本实验室自行研制的单螺旋通道的通道电子倍增器的模拟增益和脉冲增益分别为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 和 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$,增益值随着工作电压的升高而增加,输出脉冲的上升时间为 2~3 ns,性能接近国外同行的同类器件。

关键词 通道电子倍增器, 增益, 模拟模式, 脉冲计数模式

中图分类号 TL813

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100403

Performance of channel electron multiplier with single helix channel

ZHANG Binting^{1,2} LIU Shulin^{1,3} YAN Baojun¹ WEI Wenlu^{1,2} PENG Huaxing^{1,2}

1(State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2(School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(School of Nuclear Sciences and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] There are no commercially available channel electron multipliers (CEMs) made of glass in domestic market of China; more complex CEMs with helix channels are scarcer. [Purpose] This study aims to develop a CEM with a single helix channel, and test its performance for satisfying the requirements of high-end users of such products. [Methods] First of all, a series of manufacturing process designs and improvements were made on the basis of the formula of microchannel sheet glass, resulting in the production of a single spiral channel electron multiplier with suitable performance. Then, a CEM analog mode test device with a disc-incense type tantalum filament as the input current and a CEM pulse-counting mode test device with an ultraviolet light-emitting diode combined with a gold cathode as the input signal were set up to conduct comprehensive testing of the device's performance parameters. [Results] The newly developed CEM with single helix channel achieves gains of $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ in the analog mode and $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ in the pulse-counting mode. The gain value increases with the increase of the working voltage, and the rise time of the output pulse is 2~3 ns. [Conclusions] The overall performance of the developed CEM is close to that of foreign counterparts, and the CEM can be used in related instruments.

Key words Channel electron multiplier, Gain, Analog mode, Pulse-counting mode

国家重点研发计划(No.2022YFF0705600)资助

第一作者: 张斌婷, 女, 1996 年出生, 2023 年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为探测器物理

通信作者: 刘术林, E-mail: liusl@ihep.ac.cn

收稿日期: 2023-04-07, 修回日期: 2023-06-19

Supported by National Key Research and Development Program (No.2022YFF0705600)

First author: ZHANG Binting, female, born in 1996, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree, focusing on detective physics

Corresponding author: LIU Shulin, E-mail: liusl@ihep.ac.cn

Received date: 2023-04-07, revised date: 2023-06-19

通道电子倍增器(Channel Electron Multiplier, CEM)是一种工作于真空环境中并用来直接探测极其微弱的荷电粒子(如电子、正负离子)和含能光子(如真空紫外、软X射线)的电真空器件^[1-3],它除了具有探测效率高、噪声低、动态范围大、模拟和计数模式下增益高、时间响应快等诸多优点之外,还具备功耗低、体积小、重量轻、操作简单等特点,因而广泛地应用于质谱、X射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)、俄歇电子能谱学(Auger Electron Spectroscopy, AES)、核辐射和空间粒子探测器等设备中,并在空间物理、核物理、等离子体物理等领域中的低能带电粒子、X射线、微小电子流和离子流之中得到应用,是一种非常好的探测器件^[4-7]。

20世纪70年代中期到21世纪初,中国科学院化学研究所、电子学研究所、上海冶金研究所、中电集团第二十六所(原1426研究所)、北京大学、沈阳玻璃实验厂、北京东方迪泰克公司都先后用高铅玻璃、陶瓷、陶瓷表面涂上高铅玻璃等材料,研制出具有一定性能的单通道电子倍增器,其中,北京大学、电子学研究所和后来的北京东方迪泰克公司还能小批量供应市场,但由于品种少、一致性差、测试不健全、市场容量有限,到目前为止,基本销声匿迹。尽管也有单位针对其具体应用或者其他目的也开展性能测试研究,但没有与制作单位最终测试联系起来。正是由于测试分析与评价手段未能跟上,与用户实际使用的兼容性没人研究,后续应用开发乏力,导致近年来该器件全部依赖进口。

尽管通道电子倍增器诞生于20世纪50年代末(1958年),但直到今天,能够批量生产的也只有法国的Photonis公司、美国的DeTech公司(并购于Adaptas公司)和德国的Dr. Sjuts Optotechnik GmbH公司,其生产出的CEM型号众多,规格齐全,但其大致水平为模拟增益可达 10^6 ,脉冲增益可达 10^8 ,分辨率约30%,上升时间约5 ns。上述已发展成熟且具有固定市场的公司,均有较为全面成熟的生产线及性能测试手段,但其价格普遍较高,购买周期长,损坏老化时无法进行及时维修更换,一定程度上限制了国内分析和探测仪器的发展与应用。而国内的研究则大多数停留在对CEM的各项性能研究上,无配套的成熟测试及分析系统,至于极少数的研制成型的弯管型CEM,也只是对其进行了简单的测试分析,并未有更进一步地推广研究^[8-11]。

在众多型号和规格的CEM中,为提高收集效率,其输入端绝大多数采用喇叭口结构,而与喇叭口连成一体的倍增区,则种类繁多。其中制作工艺技

术难度最大的是通道弯曲成螺旋结构而外端面仍为圆柱面结构,其孔径的大小、螺距及其直径等直接影响CEM的性能(包括增益、离子反馈率等)。本研究即针对这种螺旋通道的CEM,借鉴了微通道板的玻璃配方,重新设计出了适用于通道电子倍增器的玻璃配方,开展玻璃材料、工艺和测试分析研究,经高温熔炼、喇叭口与螺旋通道加工整合成型、后续的烧氢还原,改变玻璃表面的物理性质,使其具有合适的电阻和二次电子发射系数,最后再进行外部的截断打磨与输入、输出电极蒸镀,最终制作出性能指标接近国外同行同类器件水平的器件,并在已有的实验条件下加以性能测试,对其进行综合全面的研究评价。

1 工作原理和测量装置

1.1 工作原理

CEM通常是由铅铋硅酸盐玻璃或者陶瓷等具有适当的电阻率和二次电子发射系数的材料制成的,且其形状可以根据应用要求而进行改变,一般分为两种:直管型和弯管型(圆弧形、波纹形、螺旋形等),后者在设定的弯管的曲率半径小于某个值时,可以有效地抑制离子反馈效应,减少因正离子在电场作用下与管壁碰撞产生的二次电子形成的后脉冲,提高探测效率^[12]。通常将CEM置于真空度优于 10^{-4} Pa的密封真空腔室中,施加2 500 V左右的高压,其经过烧氢还原之后的黑色玻璃内表面,既可以起电阻分压的作用,又可以起激发产生二次电子的倍增作用。带电的初始粒子从CEM的低压输入端进入,在电场的作用下加速运动,会撞击在管壁上,从而激发出二次电子,如此的倍增过程在电场的作用下不断重复,会产生越来越多的二次电子,最终从CEM的高电位输出端发射出来,从而实现将微弱的小信号倍增的目的^[13],图1为最常见的直通道式CEM的电子在管道内壁的倍增示意图。

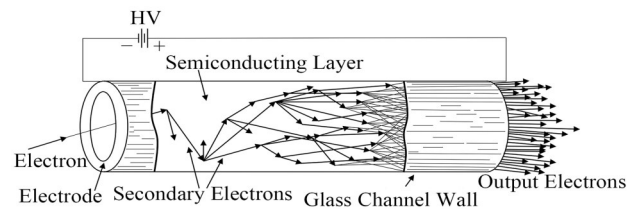


图1 电子倍增示意图
Fig.1 Schematic of electron multiplication

为了提高探测效率,可以把CEM的输入端做成喇叭口的形状,从而达到提供一定的输入电场和接收更多的入射粒子的目的,本文所研制的CEM即采

用这种收集方式。CEM的通道内壁表面在经过高温氢气还原工艺处理之后的残余气体会在电场的作用下发生离子化,形成正离子,向通道的输入端运动,碰撞时激发产生二次电子,从而导致“离子反

馈”,为抑制此干扰信号,本文所研制的CEM采用外部为直管,中心为弯曲的螺旋小孔结构,图2(a)和(b)为本实验自行研制的CEM结构示意图和实物图。

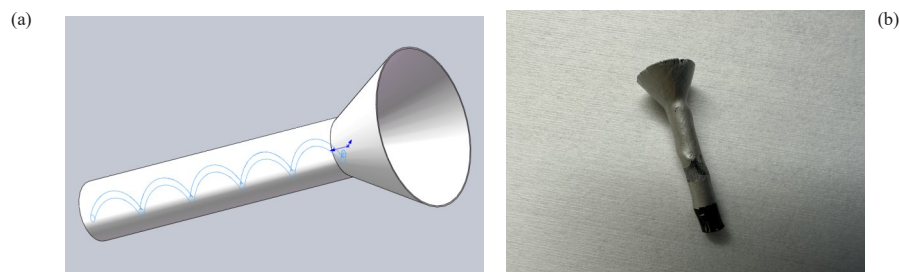


图2 CEM结构示意图(a)和实物图(b)
Fig.2 Structural schematic (a) and photograph (b) of the CEM

根据输入信号的电荷量大小,可以将CEM的工作状态分为两类:模拟模式和脉冲计数模式。二者对输入信号的产生和阳极信号的读出要求不同,其具体的测量装置介绍如下。

1.2 测量装置

模拟工作模式下,CEM的输入信号为直流,通常在几十至几百皮安。一般情况下,CEM的工作环境要求真空度优于 10^{-4} Pa,其输入和输出电极均通过安装在真空法兰上的高压馈通电极连接到外部的高压电源,由涂有铝膜的荧光屏组成的圆形阳极收集信号,该信号被连接至一个外部电极,由可测几纳安至几百微安电流的电流计读出。输入信号是通过直接加热CEM测试工位正下方的盘香型钨灯丝产生的。这种方法可以在较低的功率下,使热电子发射体的温度达到较高值。输入电流的值是通过调整钨灯丝的电流来控制的,可以从皮安到微安进行控制。然后,在不同的工作电压和输入电流下测试CEM的增益。图3为模拟模式下CEM测试原理的示意图。

脉冲计数工作模式下,CEM的输入信号明显变

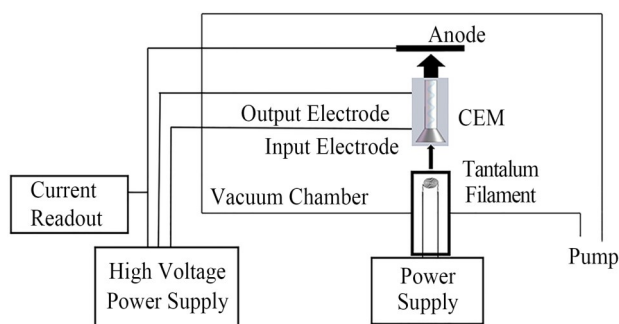


图3 测试原理图
Fig.3 Schematic of the test principal

小,由原先的微弱皮安级的直流降低为单个或数个的入射的光电子信号。在本实验中,信号发生器激发位于CEM正下方的深紫外LED(中心波长为275 nm)发射光子。信号频率通常为1 kHz,宽度为40 ns。产生的光子经过石英窗口与透射式金阴极发生光电转换,由此产生所需的入射电子信号。选择金作为光阴极是由于金的功函数低且对紫外光敏感^[14]。如图4所示为脉冲计数模式下CEM测量原理的示意图。单个入射电子经CEM倍增之后输出的是一个负脉冲信号,其常见的读出和分析方式有两种:第一种为采用一个经过刻度的低噪声电荷灵敏型放大器,对阳极输出的脉冲信号进行电荷量的积分,使其转换为幅值信息,再利用多道分析器将超过一定阈值的脉冲的幅值记录下来输出为直方图,得到脉冲高度分布图后进行数据分析^[15]。第二种为利用示波器和同步触发的方式采集一定数量的波形,通常采集两万个波形数据,利用离线数据分析的方法对每一组采集到的波形进行积分,然后对获得的输出电荷谱进行分析,对单电子峰进行拟合可以获得描述CEM探测单电子能力的相关参数。本实验采用第二种方法。

2 结果和讨论

2.1 模拟模式下的性能

CEM的电阻决定其在工作状态下的传导电流,过小时会使传导电流过大,在加电压时热效应严重,损伤其探测性能和使用寿命,过大则导致传导电流过小,无法及时补充因二次电子发射而失去的电荷,使其探测的死时间增加和增益偏低。一般情况下,通过调整铅铋硅酸盐玻璃中氧化铅和氧化铋的含量和改变高温氢气还原时的反应温度和反应时间,可

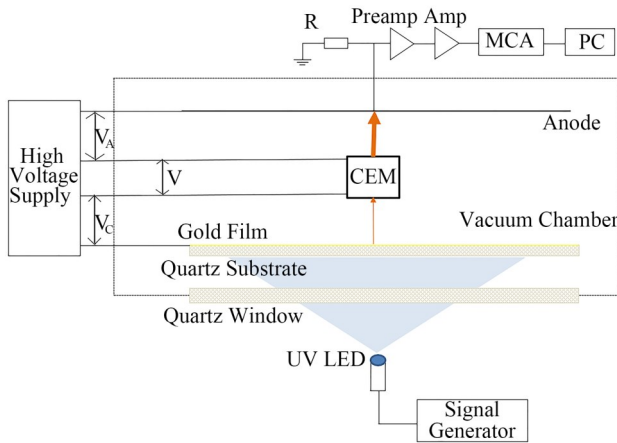


图4 脉冲计数模式下的测试原理图

Fig.4 Schematic of the test principal in the pulse-counting mode

以获得较好的电阻效果。电阻可根据其在模拟模式工作时,CEM两端所施加的电压与其通道内壁的传导电流的比值获得。在工作电压为1 kV、1.5 kV和2.5 kV时,测量得到的CEM的电阻分别为123 M Ω 、110 M Ω 和80 M Ω ,随着电压的增加而有所下降,此现象为玻璃本身的特性导致。在固定的工作电压1.5 kV下,CEM的电阻在一开始略有上升,随后在一个稳定值上下有微小的波动,其结果如图5所示。

增益为CEM最基本也是最关键的参数之一,显示了它对微弱信号的捕捉和倍增能力,可以影响整个质谱仪系统的探测效率。模拟模式下,增益的计

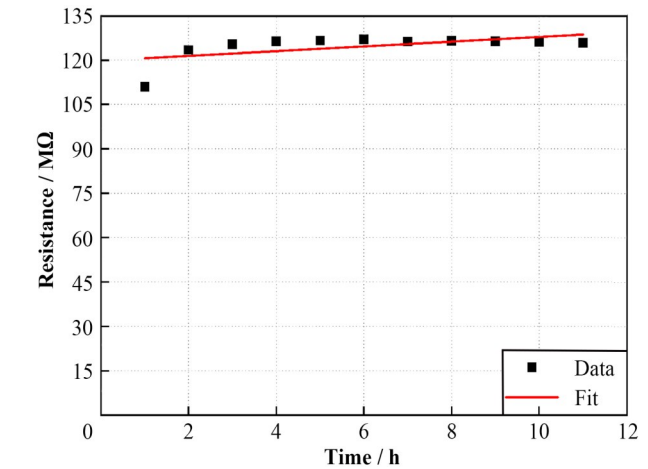
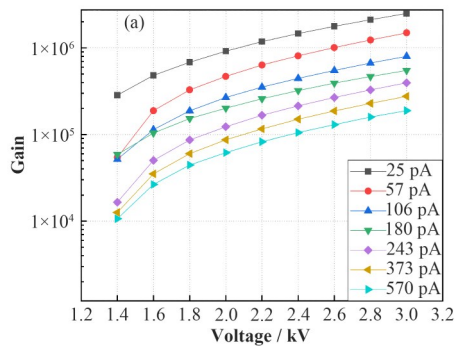


图5 电阻随时间变化关系

Fig.5 Temporal variation of resistance

算公式为输出电流 I_{out} 除以输入电流 I_{in} ,通常在 $10^4 \sim 10^6$ 。通道内壁的二次电子发射系数(与铅铋硅酸盐玻璃中金属氧化物的成分和含量、高温氢气还原过程、表面粗糙度有关)、工作电压、通道的长径比和实际形状等因素都会影响CEM的增益。图6(a)和(b)为CEM在模拟模式下的增益随电压和2000 V电压下增益随输入电流的变化关系。测试条件为真空度 4.5×10^{-4} Pa,阴极-300 V,CEM输入接地,CEM输出为可以改变的正电压,阳极电压始终高于CEM输出300 V,输入电流为25 pA、57 pA、106 pA、180 pA、243 pA、373 pA和570 pA。当输入电流增加时,CEM的增益有所下降,这与它的饱和效应有关。

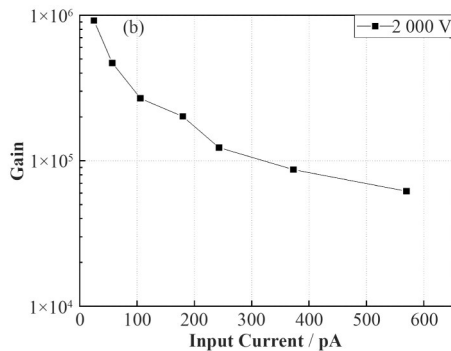


图6 增益随电压(a)和输入电流(b)的变化

Fig.6 Gain variation with voltage (a) and input current (b)

2.2 脉冲计数模式下的性能

紫外发光二极管激发的光子照射至金阴极表面因光电效应产生光电子,一次入射光电子在电场的作用下运动至孔道内壁时的撞击位置、通道表面的二次电子发射系数和每次撞击后的撞击次数都是一个随机的过程。因此,当输入信号极其微弱时,可以认为输出的总电子数目服从高斯分布。通过调节信

号发生器的脉冲电压的幅值,可以控制深紫外发光二极管的光强,从而使单个脉冲所调制的紫外光透过金阴极产生的光电子概率约为10%^[16-17],将此状态下的输出脉冲电荷分布定义为单电子谱,读取一系列电压下的输出电荷分布,进而计算出增益、峰谷比和分辨率。其中,增益的计算公式为 $Gain = (Q_{signal} - Q_0)/e$, Q_{signal} 代表单电子峰所携带的电荷量,

Q_0 代表基线所携带的电荷量, e 为电子电荷量。峰谷比的计算公式为 $P/V=peak/valley$, $peak$ 代表单电子的峰值, $valley$ 代表单电子峰与基线峰的谷值。分辨率为输出信号电荷谱的单电子峰分辨率,反应CEM单电子探测能力的强弱,其计算公式为 $Resolution=\sigma_{signal}/(\mu_{signal}-\mu_0)$, σ_{signal} 和 μ_{signal} 分别代表单电子峰的标准差和平均值, μ_0 代表基线的平均值。上述计算公式中的值可由拟合曲线获得。图7为2.5 kV电压下的输出电荷谱和拟合曲线,自右向左的第一个拟合峰为噪声信号的台阶峰,其中心值约等于零,可以忽略不计,第二个拟合峰为输出信号的单电子峰,其中心值为经过CEM倍增放大之后所携带电荷量的平均值。图8(a)和(b)为增益与分辨率随电压变化图,表1为不同电压下的峰谷比的值。可以看出,当工作电压增加时,CEM的单电子探测能力变强,具体表现为增益和峰谷比的提高。测试条件为真空度 4.5×10^{-4} Pa,阳极电压接地,CEM输出为-200 V,CEM输入为可以改变的负电压,且始终高于金阴极200 V。

上升时间为波形信号的上升沿从10%上升为90%的时间差,反映CEM的时间响应速度。由于电子倍增过程存在随机效应,上升时间也服从高斯分布,如图9(a)所示。当工作电压增加时,CEM内部的电场增强,导致每次碰撞所产生的电子数目和总碰撞次数的增加,电子运动的总路径变得 longer,脉冲

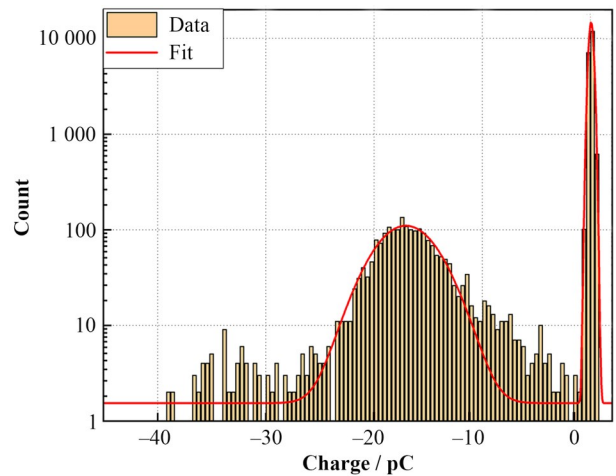


图7 输出电荷分布(2.5 kV)
Fig.7 Distribution of output charge (2.5 kV)

表1 不同电压时的峰谷比
Table 1 P/V at different voltages

电压 Voltage / kV	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
P/V	2.1	3.3	4.3	10.5	13.0	24.8	26.2	33.5

信号的上升时间变慢。然而,当工作电压继续增加时,通道内电子在同样的运动距离下获得的能量增加,运动速度变快,到达阳极的总时间变短,脉冲信号的上升时间变快。图9(b)为上升时间随电压的变化关系,可以看出,由于电场逐步增加而引起的上述两个过程各占主导位置的转变电压约为2.3 kV。

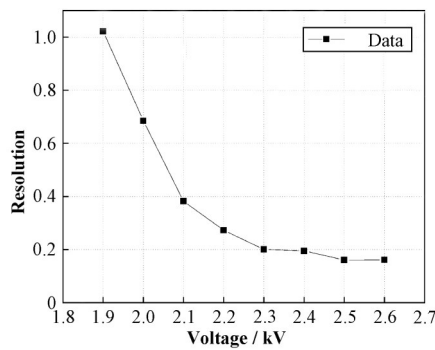
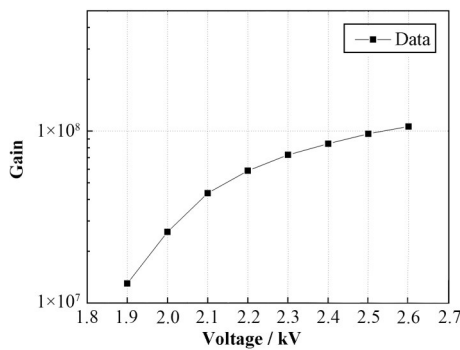


图8 增益(a)和分辨率(b)随电压变化图

Fig.8 Gain variation (a) and resolution variation (b) with voltage

3 结语

本文基于自主研发成型的CEM,在两种不同的工作模式下进行了测试。结果表明:模拟模式时,CEM的电阻在120 MΩ以内,其增益为 $1\times 10^4\sim 1\times 10^6$,随着电压而增加,但随着输入电流的增加而有所下降。脉冲计数模式时,其增益上升两个数量级,可达 $1\times 10^7\sim 1\times 10^8$,上升时间为2~3 ns,峰谷比和分辨率可达33.5和20%。综上所述,本实验自主研

制的CEM的性能表现较佳,可以满足其作为探测元器件在质谱仪器上进行使用。

作者贡献声明 张斌婷负责论文撰写,实验的制定与测试;刘术林提供论文整体思路,指导论点,把握论文整体框架且进行修改;闫保军给予指导意见,对实验方案进行指导和建议;韦雯露、彭华兴参与实验,整理数据。

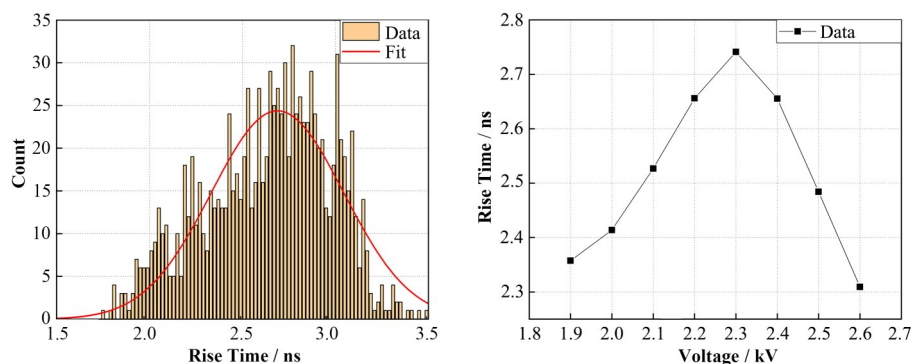


图9 上升时间分布(2.4 kV)(a)和上升时间随电压变化图(b)
Fig.9 Rise-time distribution (2.4 kV) (a) and rise time variation with voltage (b)

参考文献

- Adams J, Manley B W. The mechanism of channel electron multiplication[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1966, **13**(3): 88 - 99. DOI: [10.1109/TNS.1966.4324084](https://doi.org/10.1109/TNS.1966.4324084).
- 张多明. 通道电子倍增器[J]. 物理, 1986, **10**: 635-637. ZHANG Duoming. Channel electron multipliers[J]. Physics, 1986, **10**: 635-637.
- MacDonald E A, Thomsen M F, Funsten H O. Background in channel electron multiplier detectors due to penetrating radiation in space[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(3): 1593 - 1598. DOI: [10.1109/TNS.2006.874497](https://doi.org/10.1109/TNS.2006.874497).
- Klettke B D, Krym N D, Wolber W G. Long-term stability characteristics of commonly used channel electron multipliers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1970, **17**(1): 72 - 80. DOI: [10.1109/TNS.1970.4325563](https://doi.org/10.1109/TNS.1970.4325563).
- Meier K, Seibl J. Channel electron multipliers as detectors in organic mass spectrometry[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1973, **6**(2): 133 - 135. DOI: [10.1088/0022-3735/6/2/017](https://doi.org/10.1088/0022-3735/6/2/017).
- 徐克尊. 粒子探测技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 136 - 142. XU Kezun. Particle detection technology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1981: 136 - 142.
- Yang D, Cao Z, Hao X J, *et al.* Readout electronics of a prototype time-of-flight ion composition analyzer for space plasma[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**: 60. DOI: [10.1007/s41365-018-0390-4](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0390-4).
- 科学院电子所通道倍增器研制小组. 通道式电子倍增器及其应用[J]. 电子技术应用, 1976, **2**(5): 44 - 46. Channel Multiplier Development Group, Institute of Electronics, Institute of Science. Channel electron multiplier and its application[J]. Application of Electronic Technique, 1976, **2**(5): 44 - 46.
- 张芳, 徐克尊, 翁惠民. 通道电子倍增器的性能研究[J]. 核技术, 1991, **14**(9): 545 - 549. ZHANG Fang, XU Kezun, WENG Huimin. Properties of channel electron multiplier[J]. Nuclear Techniques, 1991, **14**(9): 545 - 549.
- 董引吾. 研究用于离子检测的通道电子倍增器[J]. 光电子技术, 1993, **13**(2): 76 - 79. DOI: [10.19453/j.cnki.1005-488x.1993.02.026](https://doi.org/10.19453/j.cnki.1005-488x.1993.02.026). DONG Yinwu. The channel electron multiplier used for detection of ions[J]. Optoelectronic Technology, 1993, **13**(2): 76 - 79. DOI: [10.19453/j.cnki.1005-488x.1993.02.026](https://doi.org/10.19453/j.cnki.1005-488x.1993.02.026).
- Zhang B T, Li C P, Liu S L, *et al.* Experimental study of channel electron multiplier[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2023, **7**(1): 117 - 123. DOI: [10.1007/s41605-022-00369-7](https://doi.org/10.1007/s41605-022-00369-7).
- 汪晓莲, 李澄, 邵明. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 250 - 262. WANG Xiaolian, LI Cheng, SHAO Ming. Particle detection technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 250 - 262.
- 林焱剑. 均匀面电子源和通道式电子倍增器性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019: 23 - 26. LIN Yanjian. Study on the performance of uniform surface electron source and channel electron multiplier [D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 23 - 26.
- Yang Y Z, Yan B J, Liu S L, *et al.* MCP performance improvement using alumina thin film[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

- Equipment, 2017, **868**: 43 - 47. DOI: [10.1016/j.nima.2017.06.049](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.06.049).
- 15 张斌婷, 闫保军, 刘术林, 等. 适用于电子倍增器件的电荷灵敏放大器的设计[J]. 红外技术, 2022, **44**(8): 792 - 797.
ZHANG Binting, YAN Baojun, LIU Shulin, *et al.* Design of charge-sensitive amplifiers for electron multipliers[J]. Infrared Technology, 2022, **44**(8): 792 - 797.
- 16 杨玉真. 基于JUNO中MCP-PMT的微通道板组件研究与性能优化[D]. 南京: 南京大学, 2017: 52 - 54. DOI: [10.27235/d.cnki.gnjju.2017.001220](https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjju.2017.001220).
YANG Yuzhen. Research and performance optimization of microchannel plate module based on MCP-PMT in JUNO[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017: 52 - 54. DOI: [10.27235/d.cnki.gnjju.2017.001220](https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjju.2017.001220).
- 17 张海琼, 钱森, 王志民, 等. 单光电子谱测试中触发方式对比研究[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(8): 869 - 872, 876. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2016.08.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2016.08.022).
ZHANG Haiqiong, QIAN Sen, WANG Zhimin, *et al.* Comparison between different modes in the measurement of single photoelectron spectra of photomultiplier tube[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(8): 869 - 872, 876. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2016.08.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2016.08.022).