

引用格式: WEI Jianan, LIU Hulin, CHEN Ping, et al. Dynamic Range Study of Microchannel Plate Photomultiplier Tubes under Visible Light Pulse Input[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0204001

魏佳男,刘虎林,陈萍,等.可见光脉冲输入下微通道板光电倍增管的动态范围研究[J].光子学报,2024,53(2):0204001

※封面论文※

可见光脉冲输入下微通道板光电倍增管的 动态范围研究

魏佳男^{1,2},刘虎林²,陈萍^{2,3},李阳⁴,李奎念²,韦永林²,贺峦轩^{1,2},赵鑫楠^{1,2},
赛小锋²,刘登⁵,田进寿^{2,3},赵卫^{2,3}

(1 中国科学院大学,北京 100049)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室,西安 710119)

(3 山西大学 极端光学协同创新中心,太原 030006)

(4 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室,西安 710024)

(5 装备发展部某中心,北京 100034)

摘要:结合理论分析与实验测试,研究了在可见光脉冲输入条件下频率以及第二片微通道板与阳极之间电势差对微通道板光电倍增管动态范围的影响。研究表明:随着信号光脉冲频率的增大,微通道板壁面电荷补充不充分致使阳极输出偏离线性,并逐渐趋于饱和。当输入可见光脉冲宽度为 50 ns,频率为 500 Hz 时,阳极的最大线性输出达到 2 V(即 40 mA);当输入光频率增加到 1 000 Hz,阳极输出在 1 V(即 20 mA)时线性偏离程度达到 10% 以上;当输入光频率增加到 5 000 Hz,阳极输出在 0.3 V(即 6 mA)时线性偏离程度达到约 15%。随着第二片微通道板与阳极之间电势差的增大,阳极最大线性输出电压呈现波动性变化而非与其呈线性关系。当第二片微通道板与阳极之间的电势差在 200 V 左右时,阳极线性输出电压达到峰值,随着电势差不断增大,阳极线性输出电压开始出现波动,在电势差为 500 V 左右时达到第二个峰值,这主要是由于极板间电场强度与空间电荷效应共同作用的结果。该研究可为提升微通道板光电倍增管的动态范围提供指导,便于其应用于强辐射脉冲测量、激光通信等领域。

关键词:微通道板型光电倍增管;动态范围;输入光脉冲频率;微通道板-阳极电压;线性偏离

中图分类号:TN362

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245302.0204001

0 引言

微通道板型光电倍增管(Microchannel Plate Photomultiplier Tube, MCP-PMT)作为一种高性能的光电探测器件近年来被广泛地应用于各种探测实验当中^[1-2]。在过去的研究中,人们主要把重心放在提高光电探测器件的灵敏度和时间分辨率等指标上,而忽视了高线性度这一关键因素。随着大动态探测需求的不断发展,深入研究并开发大动态范围的 MCP-PMT 成为当前研究的迫切需求^[3]。如惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)中子探测和 X 射线诊断中,要求 MCP-PMT 具有大的动态范围^[4];国际热核聚变实验堆计划(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)中的 LIDAR-Thomson 散射系统,为了能使光电探测器件在高灵敏度的前提下保持探测信号不失真,也需要在 400~700 nm 的可见光范围内提

基金项目:国家自然科学基金(No.12075311),中国科学院青年创新促进会基金(No. 2021402),北京市科技计划(No. Z221100005322005),中国科学院战略性科技先导专项(Nos. XDA25031100, XDA25030900),中国科学院科研仪器设备研制项目(No. GJSTD20220006)

第一作者:魏佳男,weijianan21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:陈萍,chenping1@opt.ac.cn

收稿日期:2023-12-06; **录用日期:**2024-01-12

<http://www.photon.ac.cn>

升MCP-PMT的动态范围^[5-6]。

相比于打拿级光电倍增管,MCP-PMT在时间性能、抗强磁场等方面具有优势,但动态范围和传统的打拿级光电倍增管相比还存在一定的差距。针对这一现状,国内外一些MCP-PMT的研究机构及生产厂家进行了相应的探索,如日本滨松公司在其F6584型号中采用了2~30 MΩ的低电阻MCP^[7],使得在同样的电压条件下可以得到更大的带电流,从而提升MCP-PMT阳极电流输出的线性范围;此外,滨松还提供了另一种策略,将一片MCP和一片雪崩二极管(Avalanche Diode)联用,即构建“MCP+AD”模块,从而得到较高的最大线性输出^[8];中国高能物理研究所设计出一种新型的读出模式,将阳极电流读出改为测量光电子的电荷量,克服了高光强下由于极板间电荷传输能力不足而使电流读出偏离线性的问题^[9]。

MCP-PMT的动态范围和很多因素相关,输入可见光的强度、频率以及微通道板的材质和MCP-PMT各部分所施加的电压值等因素都会对MCP-PMT的动态范围造成一定的影响^[10]。本文主要从输入光脉冲频率与MCP-PMT后端部分所施加的电势差出发,探究MCP-PMT输出电子脱离正常线性倍增的原因。采用仿真与实验相结合的方法,通过优化器件的工作条件及改善器件的结构来进行探索,并针对不同数据来源和样本选择进行综合考虑,设计出了一套有效的实验方案和实施流程。

1 MCP-PMT的工作原理

MCP-PMT主要由光电阴极、MCP倍增系统、阳极以及提供真空环境的密闭管壳组成,如图1。当入射光透过玻璃窗照射位于玻璃窗口内表面的光电阴极时,会通过光电效应激发出光电子;光电子在阴极与MCP之间的高速电场作用下,进入MCP倍增并产生大量的二次电子,最后被阳极收集释放。一般情况下,使用两片MCP可以使电子倍增后的增益达到 $10^6 \sim 10^7$,从而实现单光子探测的目的^[11]。

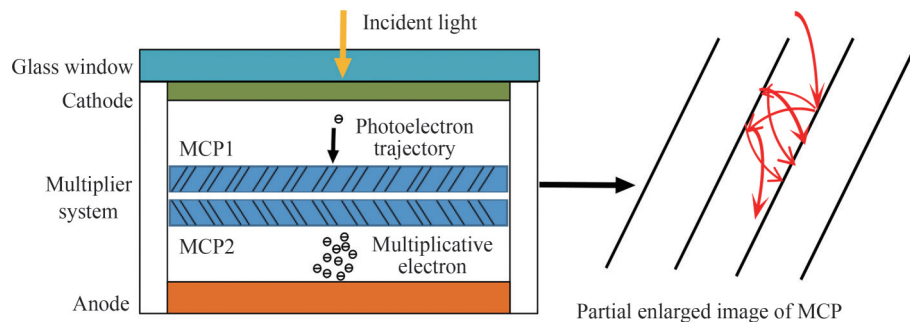


图1 MCP-PMT的结构及工作原理示意图

Fig.1 The schematic diagram of the structure and working principle of MCP-PMT

在输入光强较弱时,MCP-PMT的阳极输出与入射光强呈线性关系,但随着输入光强不断增大,阳极输出逐渐偏离线性,甚至趋于饱和。在没有光照射时,MCP-PMT的阳极也会有微弱的暗电流输出,其主要来源于阴极的热发射和各级之间的漏电流。光电倍增管的动态范围由阳极输出的最大线性电流与暗电流的比值来表示,由于其暗电流一般在纳安级别,阳极输出电流在毫安级别,因此可以用阳极输出最大线性电流来评估其动态范围。

2 理论研究

2.1 信号光频率对MCP-PMT动态范围的影响

电子在MCP通道内传输的情况可以用如图2所示的离散网络模型来表示^[12-13]。假设二次电子在传输时能量恒定,MCP便可以等效为具有 N 阶等价极数的离散电子乘法器。设给MCP两端施加的电压为 V_{MCP} ,在没有输入电流的情况下,两个连续节点 D 之间的电压差可表示为 $V_D = V_{MCP}/N$ 。

当输入电流为 $i_0(\tau)$ 时,根据图3等效节点充电的模型,电子增益 $g(t)$ 可表示为节点数 N 和时间 t 的函数,即

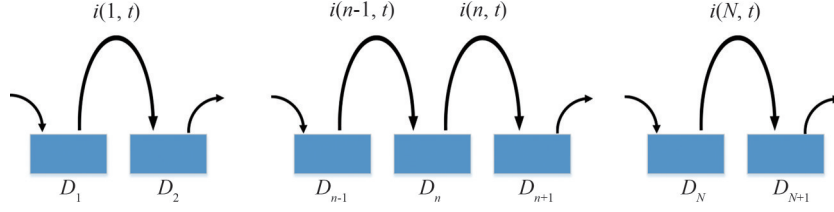


图2 离散电子乘法器示意图

Fig.2 Schematic diagram of a discrete electronic multiplier

$$g(t) = \exp\left(GN - \frac{k}{q_D} e^{-t/RC} \int_0^t e^{\tau/RC} i_0(\tau) g(\tau) d\tau\right) \quad (1)$$

式中, $G = k \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$, V_C 和 K 为描述二次发射函数形状的两个参数。

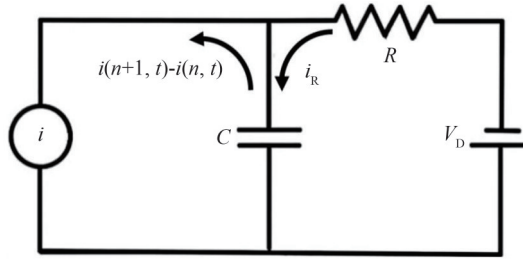


图3 节点充电等效电路

Fig.3 Node charging equivalent circuit

当输入光信号为连续高重频皮秒或纳秒级短脉冲时,微通道板壁面电荷恢复在脉冲传输期间可以忽略,只考虑在两段脉冲间隔的时间内产生电荷补充。为方便研究,引入短脉冲信号饱和参数 $s = \frac{ke^{GN}q_0}{q_D}$, 其中 q_0 代表在 Δt 时间内输入脉冲消耗的电荷量, $q_D = CV_D$, 由此, s 可理解为理想情况下从通道内消耗的电荷量与初始储存在通道内的电荷量之比。考虑到频率带来的影响时,第 n 段脉冲对应的增益及饱和参数可分别表示为

$$g_n = e^{GN} \frac{\ln(1 + s_n)}{s} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$s_{n+1} = s_n \left(\frac{1}{1 + s_n} \right)^{\exp(-\Delta t/RC)} \quad s_1 = \frac{ke^{GN}q_0}{q_D} \quad (3)$$

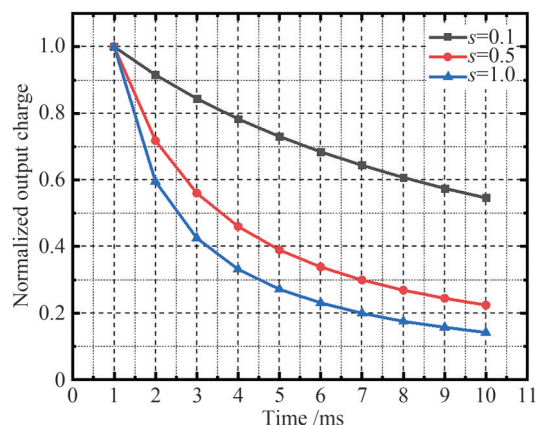
式中, Δt 为输入脉冲的时间间隔。

将表1中MCP的参数代入式(2)、(3),得到不同 s 参数下MCP-PMT输出电荷的情况,如图4。从图4可以看出,随着时间的推移,输出电荷量逐渐减少且减少的速度逐渐变缓,这是因为对于一般的MCP来说,电荷补充所需的时间大多集中在十毫秒到几十毫秒这一区间^[14]。当输入光脉冲频率为1000 Hz时,由于两段连续的脉冲时间间隔只有1 ms,使得特定倍增节点处的电荷补充不完全,存储的电荷量不断减少。同时,电荷量的减少也使充电过程中相邻节点之间电势差逐渐变大,充电能力得以增强,最终导致输出电荷量随时间推移缓慢减少。

表1 MCP的性能参数

Table 1 Performance parameters of MCP

Parameters	Symbol	Value
Resistance/ Ω	R	6×10^8
Capacitor/F	C	5.29×10^{-11}
Bias voltage/V	V	700
Unsaturated gain	e^{GN}	5 580

图4 不同 s 参数下的输出电荷(输入光脉冲频率为 1 000 Hz)Fig.4 Output charge with different s -parameters at an input optical pulse frequency of 1 000 Hz

输入条件相同时,在相同饱和参数的情况下,从图5可以得到:输入脉冲频率越高,其输出的电荷平均增益就会越少,即在更高频条件下电子在倍增时所激发出来的二次电子更为不足,其脱离线性的趋势更大,最终降低了MCP-PMT动态范围。

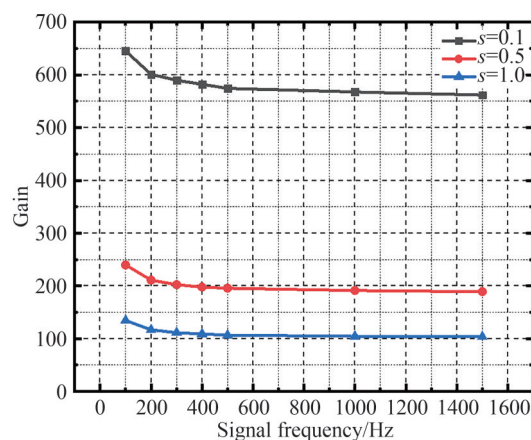


图5 电荷输出的平均增益与频率的关系

Fig.5 The relationship between the average gain of charge output and frequency

2.2 MCP2与阳极之间电势差对MCP-PMT动态范围的影响

微通道板光电倍增管的阴极与MCP1之间的电势差、MCP1两端的电压、MCP2两端的电压、MCP2与阳极之间的电势差均会对其动态范围产生影响。经过两级MCP倍增之后,大量电子在MCP2与阳极之间堆积,产生严重的空间电荷效应,影响电子输出。改变MCP2与阳极之间的电势差可以调节空间电荷效应带来的影响。

可以将最后一级MCP末端与阳极视为一个电容为 C 的平行板电容^[15-16],电子在MCP2与阳极之间传输等效为电容的放电过程,如图6。将阳极板设置为0电位,并与地相连,MCP2输出端电压为 $U_1(t)$,MCP2与阳极之间电流为 $i(t)$,负载电阻 R_L 上的电压为 $U_2(t)$ 。则可求得两极板间所能容纳的最大电荷量为

$$Q(t) = (U_2(t) - U_1(t)) \cdot C \quad (4)$$

设电子在MCP2与阳极之间的运动时间为 Δt ,若在 Δt 时间内全部释放这些电荷,可以输出的最大电流为

$$i_{\max}(t) = \frac{Q(t)}{\Delta t} = \frac{(U_2(t) - U_1(t)) \cdot C}{\Delta t} \quad (5)$$

阳极的电流 $i(t)$ 与电压 $U_2(t)$ 的关系为 $i(t) = \frac{-U_2(t)}{R_L}$, 且 $i(t) \leq i_{\max}(t)$ 。随着阳极电流 $i(t)$ 强度的不断

增加, $U_2(t)$ 不断减小, 则由式(5)可知, $U_2(t) - U_1(t)$ 减少, $Q(t)$ 减小。 $U_2(t) - U_1(t)$ 减少也会导致电子在传输中加速电场也减小, Δt 随之增加, 最终导致最大电流 $i_{\max}(t)$ 减小。当 $i(t)$ 持续增大, $i_{\max}(t)$ 持续减小, t_1 时二者相等, 即为阳极输出的最大电流, 此时阳极最大输出电流 $I_{\max}(t_1)$ 为

$$I_{\max}(t_1) = \frac{(U_2(t_1) - U_1(t_1)) \cdot C}{\Delta t} = \frac{-U_2(t_1)}{R_L} \quad (6)$$

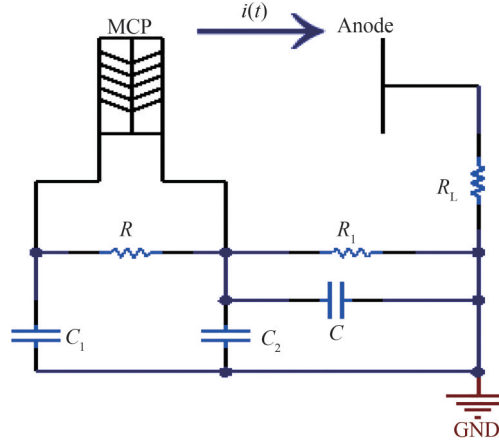


图6 电荷在极板间传输电路图

Fig.6 Circuit diagram of charge transfer between plates

根据式(6)可知, MCP2末端与阳极板之间的电势差越大, 在初始状态下极板间所容纳的电荷量也就越多, 且由于电势差越大, 极板间电场强度也就越大, 电荷在传输到阳极板时速度也会更快, 使得单位时间内更大量电荷通过 R_L 得以释放, 故稳定后 $i(t)$ 的最大值也就相应地变的更高。但由于 MCP2 末端与阳极板距离只有几毫米, 当板间电势差增加到一定程度后, 其电场就会浸入到微通道板内部, 影响通道内电子正常的传输。若这种影响不断增大, 在 MCP2 末端的电子可能会受电场方向改变的因素更早的就改变其原有的传输方向, 导致大量电荷从通道末端出射的区域收缩, 等效电容的有效面积会相应地降低, 电荷在更小的空间内传输使得通道末端空间电荷效应的影响会进一步加深, 最终导致输出电流的线性峰值反而减少。

在计算机仿真技术(Computer Simulation Technology, CST)中建立模型来验证上述推断, 由于光电阴极激发出来的光电子数量相对较少, 且光电阴极与微通道板的入射孔之间距离较近, 因此电势差设定在 200 V 左右^[17]。MCP 供电也需要设计合理的电路参数, 一般来说, MCP 最优工作电压为 $-700 \sim -800$ V。根据上述电压值在 CST 中建立 MCP-PMT 的简单通道模型, 规定模型中单通道的长径比为 42, 倾斜角为 10° ^[18-19]。初始情况下, 设置阴极有 3 个电子同时垂直发射出来, 经过电场的加速使其进入到微通道板内开始倍增。由图 7 的仿真结果可以观察到, 电子在微通道板内传输时经过多次倍增后在 MCP2 末端大量堆积, 导致空间电荷效应的影响在此区域表现明显, 抑制二次电子正常的释放。

进一步在 CST 工作室中进行模拟, 改变 MCP2-阳极板之间的电势差, 观察其电场线分布的情况。由图 8 的仿真结果可以得到, 在电势差不断增大后, MCP2 末端的平行电场线受到板间电场浸入的影响产生畸变, 等电位线在孔的中心区域出现上翘弧形的分布越来越明显, 使得更多末端电子偏离原有运输方向, 被拉到通道口中心区域聚集。

通过在 CST 工作室中的仿真结果可以得出微通道板末端平行电场的畸变深度与 MCP2-阳极间电势差的关系, 如表 2。

根据上述分析可知, 阳极输出最大线性电流与 MCP2-阳极板之间的电势差不是一种简单的线性关系, 在电势差较低时, 微通道板末端的电荷在通过等效电容释放过程中电容的等效面积收缩程度较小, 受空间电荷效应影响的程度较轻。随着 MCP2-阳极板之间电势差的增加, 阳极输出最大线性电流的变化趋势是由更加严重的空间电荷效应带来的反向作用与电势差带来的正向作用二者互相抗衡来决定的。

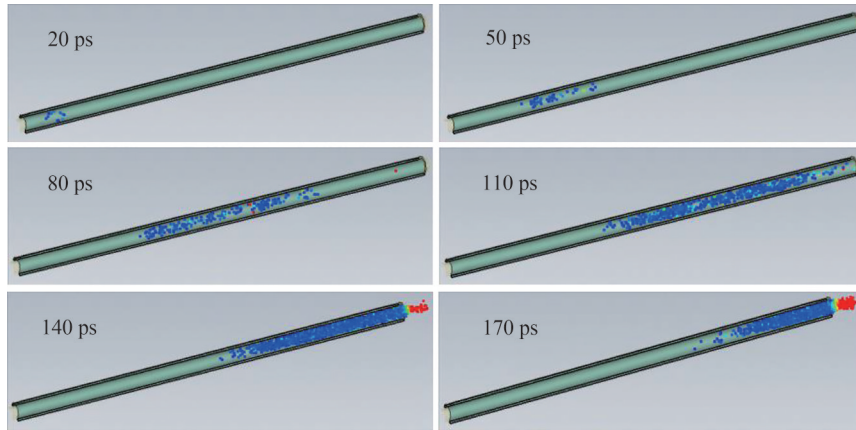


图7 微通道板内部电子倍增情况
Fig.7 Electron multiplication inside the microchannel board

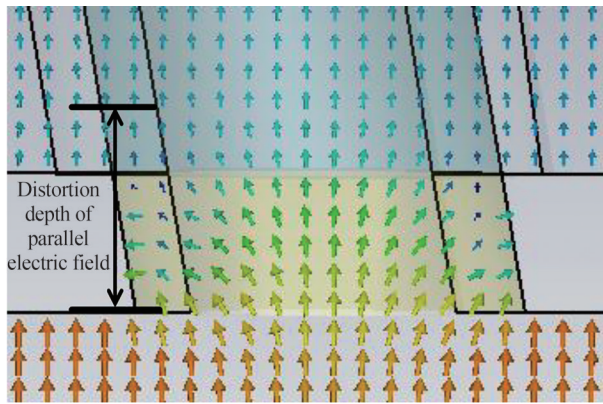


图8 微通道板末端平行电场畸变示意图
Fig.8 Schematic diagram of parallel electric field distortion at the end of the microchannel plate

表2 浸入深度与电势差的关系

Table 2 The relationship between immersion depth and potential difference

Voltage between MCP2-Anode/V	Distortion depth/ μm
200	2
300	4
400	8
500	11

3 实验测试

3.1 脉冲条件下频率影响实验

为验证上述频率对动态范围的影响,开展了脉冲光对MCP-PMT的辐照实验^[20-21]。实验流程如图9,主要包括脉冲发生器、滤光片、蓝光光源、高压电源、示波器、微通道板光电倍增管等器件。利用脉冲发生器向

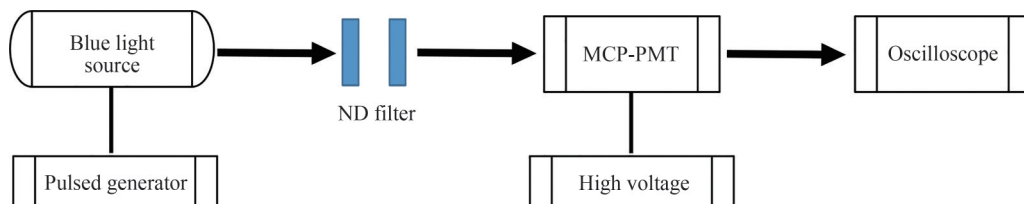


图9 实验流程
Fig.9 Experimental flowchart

MCP-PMT 提供不同频率下的光脉冲作为输入, MCP-PMT 的型号为 50-21018, 工作电压为 1 500 V。选取三角波为输入波形并设定输入脉冲的脉宽为 50 ns。同时将入射的初始光强定义为脉冲发生器在 10 V 的条件下所激发出来的波长为 450 nm 的蓝光。

在实验过程中采用 Thorlabs 公司所生产的一组滤光片, 将光源在无滤光片下的初始光照强度记为 I_0 , 不同滤光片条件下对应的相对光照强度如表 3。在实验环境搭建时, 通过调整初始光强的大小以及 LED 光源到入射面的距离, 保证在添加滤光片 10x-A 时阳极输出还未脱离线性, 并记录此时阳极峰值电压为 V_p , 其次再测出不同滤光片条件下其各自的阳极实际输出电压峰值 V_p' 。在线性条件时, 阳极输出电压峰值的比值应该与入射光强的比值相同, 则线性度定义为 $\frac{V_p'}{KV_p} \times 100\%$ 。其中 K 为不同滤光片条件下时的相对光照强度与 10% 的比值。

表 3 不同滤光片对应的相对光照强度
Table 3 Relative light intensity of different filters

Filter names	Relative light intensity(I/I_0)	Wavelength applicable range/nm
01x-A	79%	350~620
02x-A	63%	320~650
03x-A	50%	330~570
04x-A	40%	360~630
05x-A	32%	350~580
06x-A	25%	320~640
10x-A	10%	350~670

阳极输出电流随输入光强的变化趋势如图 10, 可以看出, 随着输入光强的增大, 输出电压值在相对光强 50% 以后偏离了线性状态, 并且输入光脉冲重复频率越大, 输出电压开始偏离线性的值越小。重复频率分别为 0.5、1、5 kHz 时对应的最大线性输出电压分别在 2.08~2.28 V、0.776~0.88 V、0.344~0.38 V 之间。

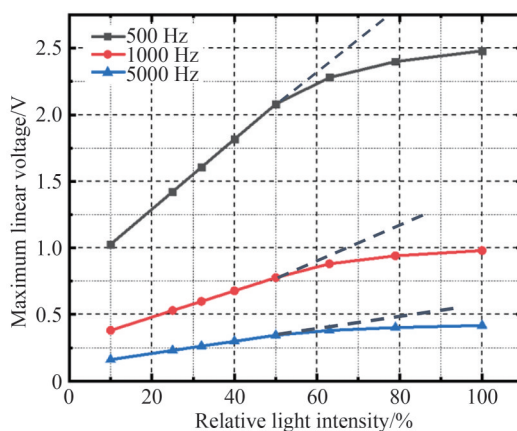


图 10 阳极最大线性电压的测试结果
Fig.10 Test results of the maximum linear voltage of the anode

在此基础上, 通过继续增大入射到阴极上光强来进一步分析输入光脉冲频率对输出电流非线性的影响, 其结果如图 11。可以看出, 随着输入光脉冲频率增大, 输出电压越早开始发生线性偏离, 即线性输出电压的最大值越小。通过三组实验曲线的对比, 可以明显看出在输入重复频率为 500 Hz 的光时, 阳极的输出能在 2 V 以下时使线性程度维持到 100%, 但频率增加到 1 000 Hz 以后, 阳极输出在 1 V 时已经明显偏离了线性区域达 10% 以上, 随着频率再进一步增大, 在 5 000 Hz 的条件下时, 阳极输出只能在较低的输出峰值电压以下时维持很好的线性水平, 在输出峰值电压达 0.3 V 时就已偏离线性区域约 15%。这表明高频输入对光电倍增管的最大线性电流的输出有着很强的制约作用, 与之前的理论分析一致。

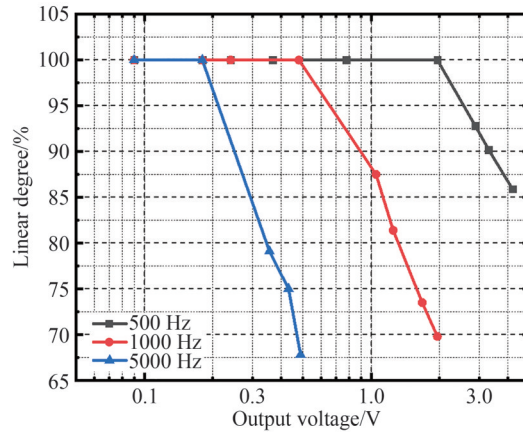
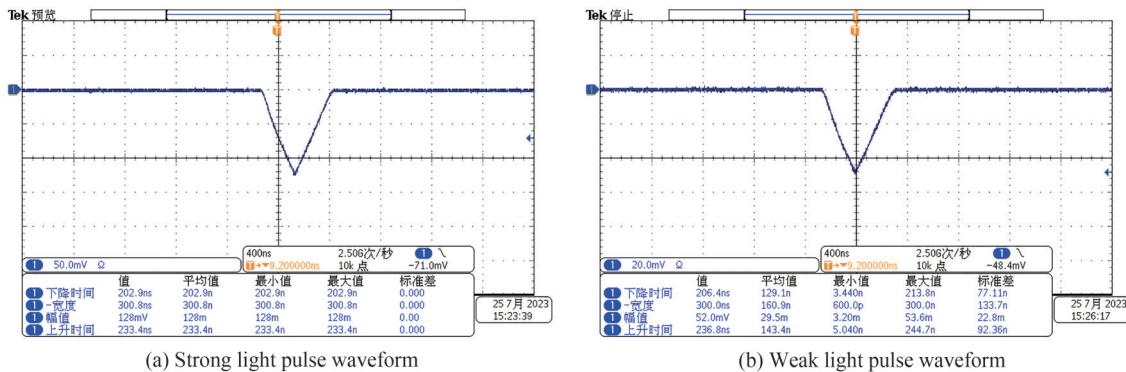


图11 输入脉冲不同频率下输出电流与线性偏离度的关系

Fig.11 The relationship between anode peak voltage and linear deviation at different frequencies

3.2 脉冲条件下MCP2-阳极电势差影响实验

针对提出的有关末端电势差的观点,通过实验来进行进一步验证。采用双脉冲的方法来测量MCP-PMT的线性特性,首先让强弱两种LED脉冲光在时间上交叠点亮,输入波形如图12。强光条件下输出的电流作为实验结果,弱光条件下的输出作为参考,需保证弱光条件下输出一直维持在线性区域内^[22-23]。初始距离较远时,设强弱脉冲光的输出电流分别为 I_{02} 、 I_{01} , I_{02}/I_{01} 的比值记为 k 。通过移动光源,拉近光源与阴极面之间的距离使光源入射到阴极面的发光量逐渐增大,MCP-PMT的输出电流便也会相应增大。当弱脉冲光的输出为 I_1 ,强脉冲光的输出为 I_2 时,输出电流 I_2 首先偏离线性,此时两脉冲的输出电流比 $I_2/I_1 \neq I_{02}/I_{01}$,线性度定义为 $(I_2/kI_1) \times 100\%$ 。



(a) Strong light pulse waveform

(b) Weak light pulse waveform

图12 强弱脉冲输入光波波形示意

Fig.12 Schematic of the shape of strong and weak pulse input light waves

图13显示了线性度与阳极输出电压的关系,随着输出电压的增大,线性度逐渐开始下降。当线性度下降到95%时,将此时阳极输出的电压值定义为阳极最大线性输出电压。

实验用到的主要装置包括脉冲激光源、高压电源、MCP-PMT等,采用双MCP的光电倍增管50-21018进行辐照实验。选取三组不同的电压值施加到MCP1两端,用来作为不同增益条件下的对比实验,在每组特定的MCP1电压下通过改变分压电路中MCP2-阳极之间的电势差来验证上述理论结果。采取脉冲发射器输出半高宽为300 ns的强弱两种三角波来激发蓝光光源,随着不断调整光源到MCP-PMT的距离,使得光强在强光条件下时逐渐偏离线性,并记录此时强光条件下的阳极输出电压峰值,具体参数设定如表4。

在上述三组实验结果中选出MCP2-阳极电势不同情况下的阳极输出最大线性电压。由图14可知,MCP2-阳极之间的电势差对动态范围确实存在一定的影响,在其它参数不变时,若只改变MCP2-阳极的电势,当电势差在200 V左右时,由于此时电场浸入管内深度较浅(如表2),电荷从微通道口出射时出射面积收缩程度较轻,动态范围受到空间电荷效应的负向影响也较弱,阳极输出最大线性电压在此时保持较高的

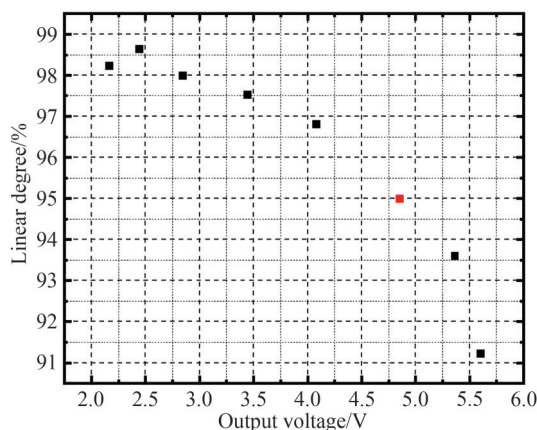


图13 阳极最大线性电压选取点
Fig.13 Selection point of maximum linear voltage

表4 MCP-PMT各部分电压参数的设定
Table 4 Voltage parameter settings for various parts of MCP-PMT

Parameters	First group	Second group	Third group
Cathode-MCP1/V	191	191	191
MCP1/V	500	572	667
MCP2/V	667	667	667
MCP2-anode/V	Variable quantity	Variable quantity	Variable quantity

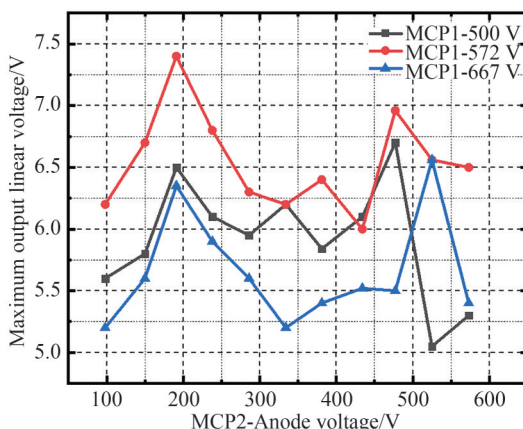


图14 动态范围随MCP2-阳极电压的变化趋势
Fig.14 The relationship between dynamic range and voltage between MCP2-Anode

水平。随着电势差的不断增大,阳极输出最大线性电压由于空间电荷效应影响程度的加深开始呈下降趋势,并出现波动。当电势差达到500 V左右时,此时的板间电场强度对微通道板内部电荷向阳极传输所表现出的正向作用较为明显,阳极输出最大线性电压也重新出现一个小峰值。综上,随着MCP2-阳极之间的电势差的增大,最大线性输出电压不是单调变化的,而是受到电势差与空间电荷效应共同的影响而表现出一个不断起伏的趋势。

4 结论

本文研究了脉冲输入光的频率及MCP-PMT末端电压值对MCP-PMT动态范围的影响,并通过实验验证得出:1)随着脉冲输入频率的增加,MCP-PMT的输出电压会越早脱离线性区域。2)随着MCP2-阳极之间电势差的增大,MCP-PMT的最大线性输出电压不是简单单调变化的,而是在抗衡中表现一个不断起伏的趋势。在此基础上进一步探究了制约MCP-PMT动态范围的因素,即壁面电荷补充不充分及空间电

荷效应的干扰。当输入脉冲的频率较高时, MCP-PMT 的动态范围受到的制约主要与前者有关; 当 MCP2-阳极电势差提升时, 由于大量二次电子在极板间向阳极传输时的情况较为复杂, 动态范围便会因空间电荷效应造成的影响从而无法与电场强度成正比关系。

参考文献

- [1] GUO Lehui, CHEN Ping, LI Lili, et al. Numerical simulation study on gain nonlinearity of microchannel plate in photomultiplier tube[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(12): 2711-2716.
- [2] KANG Tianyou. Automatic preparation technology of double alkali photocathodes in large area MCP-PMT[M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
康天佑. 大面积 MCP-PMT 中双碱光电阴极的自动制备技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [3] ZHANG Zhongbing, OUYANG Xiaoping, CHEN Liang, et al. High energy pulse fission neutron detection method in strong radiation environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3385-3390.
张忠兵, 欧阳晓平, 陈亮, 等. 强辐射环境下高能脉冲裂变中子探测方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3385-3390.
- [4] CALVI M, CAPELLI S, CARNITI P, et al. Single photon time resolution of photodetectors at high rate: Hamamatsu R13742 MaPMT and R10754 MCP-PMT[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(10): P10031.
- [5] MU Yining, DU Yue, LI Ye, et al. Analysis and verification of composite waveguide anode characteristics for microchannel photomultiplier tubes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 172-177.
母一宁, 杜月, 李野, 等. 微通道光电倍增管用复合波导阳极特性分析与验证[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 172-177.
- [6] WANG Yifang, QIAN Sen, ZHAO Tao, et al. A new design of large area MCP-PMT for the next generation neutrino experiment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 695(5): 113-117.
- [7] TIAN Jinshou. Technology development of streak and framing camera[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003.
- [8] CHEN Yaling. Experimental study on large area MCP photomultiplier tube testing system[M]. Xian: Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2015.
陈亚玲. 大面积 MCP 型光电倍增管测试系统的实验研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2015.
- [9] WANG Yang, MA Xiurong, QIAN Sen, et al. Research on time characteristics testing method for ultra fast MCP-PMT[J]. Opto-electronic Engineering, 2020, 47(2): 87-94.
王阳, 马秀荣, 钱森, 等. 超快速 MCP-PMT 的时间特性测试方法研究[J]. 光电工程, 2020, 47(2): 87-94.
- [10] WU Qi, CAO Yiqi, HUANG Guorui, et al. The R&D of the ultra fast MCP-PMTs in IHEP[J]. Moscow University Physics Bulletin, 2022, 77(2): 399-400.
- [11] HU Song. Research on the performance of MCP-PMT[M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
胡松. 微通道板光电倍增管性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [12] EBERHARDT E H. Gain model for microchannel plates [J]. Applied Optics, 1979, 18(9): 1418-1423.
- [13] XIE Yuntao, ZHANG Yujun, WANG Xi, et al. Research on the amplification characteristics of short pulse signals in microchannel boards under saturation conditions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 171-177.
谢运涛, 张玉钧, 王玺, 等. 饱和情况下微通道板短脉冲信号放大特性研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 171-177.
- [14] RUAN Chi, ZHAO Wei, ZHU Shaolan, et al. Characterization of photoconductive semiconductor switches under nonlinear mode condition[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 51(1): 56-59.
- [15] CHEN Yuyu. Experimental study on MCP-PMT pulse linear output characteristics [J]. Nuclear Physics Review, 2014, 31(2): 177-182.
陈钰钰. MCP-PMT 脉冲线性输出特性实验[J]. 原子核物理评论, 2014, 31(2): 177-182.
- [16] LEHMANN A, BRITTING A, EYRICH W, et al. Significantly improved lifetime of micro-channel plate PMTs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 718(6): 535-540.
- [17] CHEN Ping, YUAN Xiaohui, TIAN Jinshou, et al. Simulation of microchannel plate photomultiplier tube in high magnetic fields[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 936(3): 580-582.
- [18] CHEN Yaling, TIAN Jinshou, XIN Liwei, et al. Experimental study on 8-inch MCP type photomultiplier tubes [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1163-1168.
陈亚玲, 田进寿, 辛丽伟, 等. 8英寸 MCP 型光电倍增管的实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10): 1163-1168.
- [19] BROOK N H, GARCIA L, CONNEELY T M, et al. Testbeam studies of a TORCH prototype detector[J]. Nuclear

- Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018,908(13):256-268.
- [20] GUO Lehui. Optimization design and application research of high-performance photomultiplier tubes[M]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2021.
郭乐慧.高性能光电倍增管的优化设计及应用研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2021.
- [21] GOMEZ M R. Experimental demonstration of fusion-relevant conditions in magnetized liner inertial fusion[J]. Physical Review Letters, 2014,113(15):155003.
- [22] HUANG Zhanchang, YANG Jianlun, LI Guodong, et al. Waveform comparison method for measuring the linear output of MCP-PMT on strong and narrow pulses [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016,50(3):553-557.
黄展常,杨建伦,李国栋.波形比较法测量 MCP-PMT 对强窄脉冲的线性输出[J].原子能科学技术,2016,50(3):553-557.
- [23] CHEN Ping, TIAN Jinshou, WEI Yonglin, et al. Optimization design of a 20-in. elliptical MCP-PMT [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017,841(5):104-108.

Dynamic Range Study of Microchannel Plate Photomultiplier Tubes under Visible Light Pulse Input

WEI Jianan^{1,2}, LIU Hulin², CHEN Ping^{2,3}, LI Yang⁴, LI Kuinian², WEI Yonglin²,
HE Luanxuan^{1,2}, ZHAO Xinnan^{1,2}, SAI Xiaofeng², LIU Deng⁵, TIAN Jinshou^{2,3},
ZHAO Wei^{2,3}

(1 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(2 *Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *Extreme Optics Collaborative Innovation Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(4 *State Key Laboratory of Environmental Simulation and Effects of Intense Pulse Radiation, Northwest Nuclear Technology Research Institute, Xi'an 710024, China*)

(5 *A Center of Equipment Development Department, Beijing 100034, China*)

Abstract: Microchannel Plate Photomultiplier Tube (MCP-PMT), as a high-performance photodetector, has been widely used in various detection experiments in recent years. In previous studies, people mainly focused on improving the sensitivity and temporal resolution of optoelectronic detection devices, while ignoring the key factor of high linearity. With the continuous development of the demand for large dynamic detection, in-depth research and development of MCP-PMT with large dynamic range has become an urgent need for current research. The dynamic range of MCP-PMT is related to many factors, such as the intensity and frequency of input visible light, the material of the microchannel board, and the voltage values applied to each part of MCP-PMT. This article mainly starts from two aspects: the input light pulse frequency and the potential difference applied by the backend of MCP-PMT, and delves into the reasons why the output electrons of MCP-PMT deviate from normal linear multiplication.

By combining theoretical analysis and experimental testing, the influence of the repetition frequency of pulse light signals and the potential difference between the second microchannel plate and the anode on the dynamic range of MCP-PMT was studied in detail. When the input light pulse width is 50 ns and the repetition frequency is 500 Hz, the maximum linear output of the anode can reach 2 V (i.e. 40 mA); when the repetition frequency increases to 1 000 Hz, the linear deviation degree reaches more than 10% when the anode output is 1 V (i.e. 20 mA); when the input light frequency further increases to 5 000 Hz and the anode output reaches 0.3 V (i.e. 6 mA), the degree of linear deviation has reached about 15%. As the electric potential difference between the second microchannel plate and the anode increases, the maximum linear output voltage of the anode shows fluctuating changes. When the electric potential difference between the second microchannel plate and the anode is around 200 V, the linear output voltage of the anode reaches its peak. As the electric potential difference increases, the linear output voltage of the anode begins

to fluctuate, reaching the second peak at a electric potential difference of around 500 V.

In this article, we investigated the influence of the frequency of pulse input light and the electric potential difference between the second microchannel plate and the anode on the dynamic range of MCP-PMT, and obtained two conclusions through experimental verification: 1) As the pulse input frequency increases, the output voltage of MCP-PMT will detach from the linear region earlier. 2) As the potential difference between MCP2 and the anode increases, the maximum linear output voltage of MCP-PMT does not simply vary monotonically, but exhibits a constantly fluctuating trend in resistance. On this basis, further exploration was conducted on the factors that constrain the dynamic range of MCP-PMT, namely insufficient wall charge supplementation and interference from space charge effects. When the frequency of the input pulse is high, the constraint on the dynamic range of MCP-PMT is mainly related to the former; when the electric potential difference between the second microchannel plate and the anode increases, due to the complex situation of a large number of secondary electrons transferring between the plates to the anode, the dynamic range will be affected by the space charge effect and cannot be directly proportional to the electric field strength.

Key words: Microchannel plate photomultiplier tube; Dynamic range; Input light pulse frequency; Microchannel plate-anode voltage; Linear deviation

OCIS Codes: 040.5250; 320.5550; 320.7080; 320.7110; 320.7160

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 12075311), Foundation of Chinese Academy of Sciences Youth Innovation Promotion Association (No. 2021402), Beijing Science and Technology Plan (No. Z221100005322005), Chinese Academy of Sciences Strategic Science and Technology Pilot Project (Nos. XDA25031100, XDA25030900), Chinese Academy of Sciences Scientific Research Instrument and Equipment Development Project (No. GJJSTD20220006)