

doi:10.3788/gzxb20184710.1004001

# 波导栅极薄膜复合探测器件的制备及可行性验证

刘德兴,母一宁,宋德,樊海波,郝国印

(长春理工大学 理学院, 长春 130022)

**摘要:**为了满足空间光电系统对复合探测的需求,本文针对一种波导栅极薄膜空间复合探测用微通道光电倍增结构展开制备工艺方法研究.从微通道板光电倍增和空间电子束分流调制的角度出发,阐述波导栅极薄膜复合探测器件工作原理以及在制备过程中的约束条件;为了确定栅极结构的制备特性参数,依据适用于低能电子在多元介质中发生散射的物理模型,分别研究了栅极复合薄膜膜层厚度、入射电子能量对波导栅极薄膜中入射电子渡越轨迹的影响;通过汲水法获取自支撑有机隔离薄膜采用优化电阻热蒸发镀膜技术,实现了波导栅极薄膜的纳米尺度制备,并利用可视化的手段对其复合膜层结构予以表征;最后,从复合探测功能角度在专用真空测试系统中验证了该栅极薄膜复合器件的可行性.

**关键词:**复合探测;波导栅极;微通道板;薄膜制备;测试系统

中图分类号:TN15

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1004001-8

## Preparation and Experiment Validation for a Waveguide-gate Film Complex Detector

LIU De-xing, MU Yi-ning, SONG De, FAN Hai-bo, HAO Guo-yin

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to satisfy the complex detection demand of space optoelectronic systems, a prepared method of waveguide-gate film electron multiplying structure based on micro channel plates applied in the field of space complex detection was proposed. From the view point of photomultiplication of micro-channel plates and modulation and distributary of space electron beam, operation principles of this detector and some constraints during the preparation process are explained. After the effects of different incident beam energies and different thickness of gate films on trajectories of incident electrons in waveguide-gate films are respectively studied on the basis of a physical model from scattering of low-energy incident electronics in multiplex dielectrics, process characteristic parameters of the gate are targeted in the range by simulation results. A free-standing organic film is prepared on the micro channel plate through water drawing. And an aluminum film is deposited on the organic film by means of resistance thermal evaporation after optimization. As a result, the complex gate films are achieved within nanometer thickness. Besides, the structure of the complex gate is given characterization through visual means. At last, for the aspect of the function about complex detection, the feasibility of the gate film complex detector is verified by experiments through a special test system in a vacuum chamber.

**Key words:** Complex detection; Waveguide gate; Micro channel plate; Film preparation; Measurement system

**OCIS Codes:** 040.7480; 230.0040; 230.0250; 290.0290; 310.0310

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(No.51602028),吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(Nos.20150204049GX, 20150204083GX),吉林省科技发展计划青年科研基金项目(No.20160520114JH),吉林省科技发展计划中青年科技创新领军人才及团队项目(No.20180519019JH),吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划重点项目(No.JJKH20170602KJ),2018年吉林省发改委产业创新专项资金(No.2018C040-3)和2017年长春理工大学科技创新基金项目(No.XJJLG-2017-01)资助

**第一作者:**刘德兴(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子器件与系统、专用集成电路设计. Email: dexing6119@163.com

**导师(通讯作者):**母一宁(1985-),男,副教授,博士,主要研究方向为空间光通信与光电子器件. Email: muyining1985@hotmail.com

**收稿日期:**2018-05-21; **录用日期:**2018-07-12

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

## 0 引言

随着人类太空探索的脚步从近轨向深空迈进,空间复合探测正成为当下的热点,国内外学者展开了广泛研究.文献[1-2]采用多功能集成化光学系统设计建立多级跟踪与通信链路.文献[3-4]利用四象限探测器做光敏面,将光电转换后的电信号分路接收实现系统的跟踪与通信复合探测.上述方法固然能够实现复合探测功能,但都是以来波信号的分时复用或是将信号分为多路,按功率分配给不同的信号接收单元(分功利用)为代价换取的,同时多个探测器件的集成、光传输信道易受环境影响等又给整个探测系统的多光轴校准及信标光的动态捕捉跟踪带来挑战<sup>[5]</sup>.

利用单一器件实现空间光通信和成像的复合探测技术具有很大的意义.结合光电倍增管的成像通信阳极复合探测的概念已被提出<sup>[6]</sup>,虽然它能够解决通信成像复合探测系统多轴校准难题,但通过荧光屏成像的同时利用荧光屏表面阳极薄膜向外提取激光通信脉冲信号,本质上讲属于以牺牲接收功率为代价获得复合探测功能.关于改造微通道板(Micro Channel Plate, MCP)光电倍增管以实现复合探测功能,本研究团队近年来开展了大量相关研究:使用磁控溅射氧化镁(Magnesium oxide, MgO)绝缘膜的复合式波导阳极,使微通道光电倍增管具备高速信号检测与入射光轴精确定位能力<sup>[7]</sup>;提出一种复合栅极结构模型,通过仿真对比复合波导栅极与复合波导阳极的空间电子束调制效果和光学传递能力,验证了栅型结构在成像与探测动态范围方面具有优势<sup>[8]</sup>.本文在之前研究基础上,从器件的波导栅极物理模型的构建展开,给出具体的工艺实施方法及流程并构建专用真空测试系统,通过验证实验表征器件的调制分流能力,为复合探测一体化面临的问题提供器件层面的解决方案.

## 1 器件工作原理

为保证微通道孔导电层薄膜的持续供电,通常需要在 MCP 上下表面制作镍(Nickel, Ni)/铬(Chromium, Cr)薄膜电极,且在两端施加高压形成板流用于补偿二次电子发射所产生的能量损失<sup>[9]</sup>,由于这种供电结构存在一定的开口面积比,导致实际探测效率通常在 60%~70%<sup>[10]</sup>.本文以 MCP 上表面的 Ni/Cr 电极为支撑,根据电子束的空间调制机制和 MCP 的电子倍增特性,在其上制备一层具有调制分流能力的波导栅极,这种结构不但能有效利用因供电结构造成的损失,同时也能克服级联 MCP 中下级微通道板的增益自饱和效应对阳极探测造成的约束,扩大电子倍增输出工作窗口.

波导栅极复合探测器件构造及工作原理如图 1,脉冲光信号透过光学接收窗聚焦于光电阴极表面,由光电效应激发的光电子,在负高压电场加速作用下,电子到达上层倍增用微通道板,经微通道板的初次倍增形成电子云,电子云在空间电场作用下撞向复合式栅极结构上的金属薄膜电极,产生电子分流,部分电子由栅极截获并输出高频脉冲通信信号,而能够成功渡越过栅极薄膜的电子入射到下级波导用微通道板引发二次电子倍增以提高微弱成像信号探测灵敏度,倍增的电子最终被楔条形阳极收集并由信号采集电路完成读出.

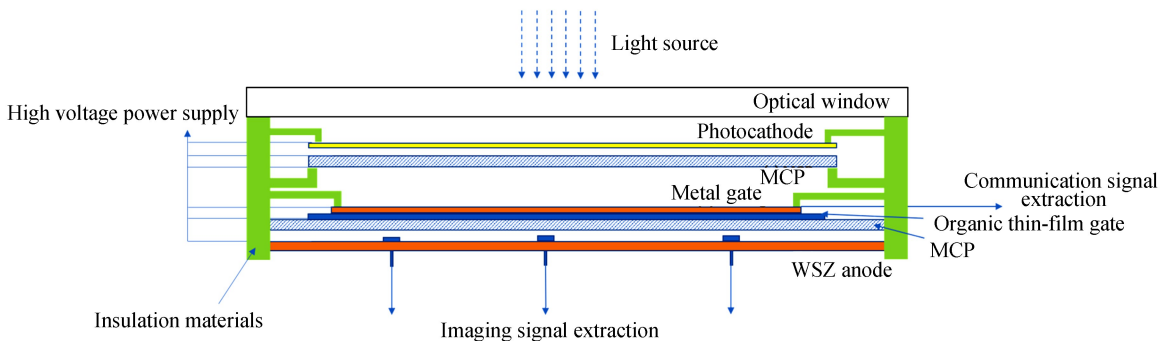


图 1 波导栅极薄膜复合探测器件原理图

Fig.1 Schematic of waveguide-gate film complex detector

微通道板波导栅极薄膜器件能够满足复合探测中对轻小型化和入射光轴精确定位的需求,而纳秒级频

响特性和极高的连续倍增能力克服了探测器光敏面尺寸的确定在空间光电复合探测系统兼顾通信频率和成像质量时受到的约束<sup>[11]</sup>.

## 2 波导栅极物理建模

对附着于下级波导微通道板的栅极薄膜,要求其在满足电子抽取能力的前提下,部分电子能透射到下级微通道后被阳极收集作为成像用信号.为此,本文采用 Monte Carlo 统计模拟方法对大量随机入射到固体中的电子轨迹进行模拟,所模拟的电子渡越栅极膜层的运动情况为低能电子和原子核外电子的相互作用,建立基于莫特弹性散射截面的物理模型<sup>[12]</sup>,即

$$e = 2\pi \int_0^{\pi} (|f(\theta)|^2 + |g(\theta)|^2) \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中  $\theta$  为电子散射角,  $f(\theta)$ 、 $g(\theta)$  分别为采用分波法解狭义相对论中狄克拉波动方程的入射波解、散射波解,利用插值法可以求解莫特截面值.又因为所需模拟的为铝(Aluminium, Al)和聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)构成的多元界面层,在考虑电子散射平均能量损失情况下,适用 Joy and Luo 对 Bethe 公式的修正<sup>[13]</sup>,即

$$\frac{dE}{dS} = -785 \frac{\rho Z}{AE} \ln \left[ \frac{1.166(E+kJ)}{J} \right] (\text{eV}/0.1 \text{ nm}) \quad (2)$$

式中,  $E$  是运动电子的能量,  $A$  是原子量,  $\rho$  是介质密度,  $Z$  是原子序数,  $J$  是 PMMA 材料的平均电离位移,  $k=0.757$  是 PMMA 衬底的修正值.

建立基于 Mott-Joy and Luo 的物理模型对该波导栅极电子散射情况进行相对更为严格的模拟,从仿真结果(如图 2 所示)可以看出,入射电子在栅极双层不同介质膜层中的纵向运动距离随着膜厚和入射电子能量的变化:随着膜厚的增加,入射电子因与膜内粒子的库伦力作用造成能量损失,使电子透射率降低;随着入射电子能量的增加,电子在膜层中的渡越距离也越大.因此,从工艺制备角度精确控制栅极复合薄膜膜厚和利用验证实验标定器件调制电压成为器件制备实现的两个关键因素.

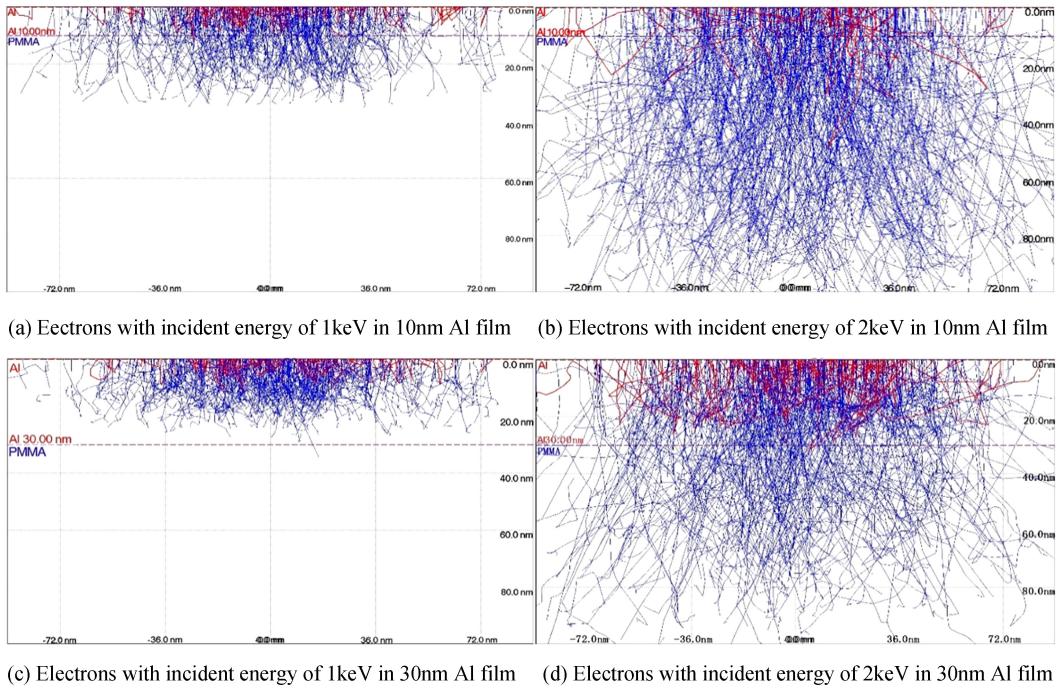


图 2 不同入射能量的电子穿过不同膜厚栅极薄膜的模拟

Fig.2 Simulation of scattering trajectories of electrons with different energies in different thickness of gate films

## 3 工艺制备方法研究

由于 MCP 表面存在大量微通道孔,使用旋涂法在其上表面附着有机薄膜,极易污染微通道影响二次电

子倍增而降低增益,因此引入一种相对低污染的自支撑薄膜制备工艺.首先将微通道板通过膜径控制环固定在盛有去离子水的容器(如图3)中,然后开始PMMA溶液的配制.PMMA溶液由单体共聚而成,其主要由聚甲基丙烯酸异丁酯、B-72树脂、乙酸乙酯、乙酸丁酯等试剂按一定配量制成(见表1).液滴的高分子链在膜层内部形成互穿网络,保证了有机隔离薄膜的高粘附性和机械强度.

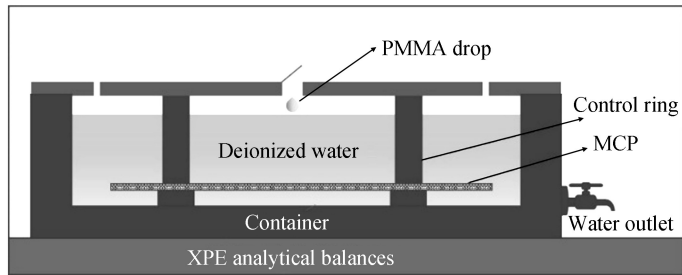


图3 有机膜制备装置图  
Fig.3 Preparation equipment of organic film

表1 PMMA溶液主要成分  
Table1 Main components in PMMA

Isobutyl methacrylate	Acrylic resin	Ethyl acetate	n-butyl acetate
7.6 g	0,076 g	70 mL	25 mL

利用搅拌子对配制的PMMA溶液进行均匀搅拌后,PMMA溶液通过专用注射器滴于去离子水中,滴入液滴量借助可读精度为0.01mg的半微量电子分析天平确定.液滴在水面扩散后形成一层有机膜层,在PMMA配液中加入适量的展膜剂,可以提升液滴在水面的延展性以获得更薄的膜,然后打开出水口,利用汲水法让水面下降,使悬浮在水面的有机膜能够依靠分子力逐渐贴附到MCP上表面.由于纳米厚度的自支撑膜在空气中因很小的应力作用很容易出现褶皱<sup>[14]</sup>,在成膜过程中,尽量保持成膜区域处于相对密闭.为避免膜内残留水分对后续制膜工艺品质的影响,取出该微通道板经60℃、连续5h的烘干,最后在微通道板上表面形成一层均一性、完整度良好的透明有机隔离薄膜,其在金相显微镜下的效果如图4(a).在完成自支撑有机膜制备后,开始栅极导电层的制备,为进一步避免高温脱膜<sup>[14]</sup>导致的碳污染,不做脱除有机膜处理.

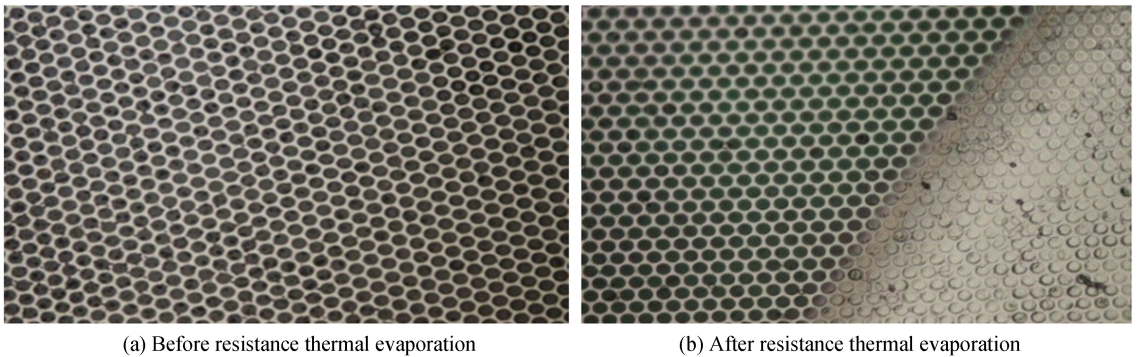


图4 蒸镀铝膜前后的微通道板  
Fig.4 MCP before and after thermal evaporation

由于有机膜膜层较薄,在其上层镀金属导电铝膜时,选用电阻热蒸发镀膜工艺相比于磁控溅射<sup>[16]</sup>更不易造成有机膜层缺陷.此外,为防止蒸镀过程中因氧化物飞溅引起膜层出现沙孔<sup>[17]</sup>,蒸镀腔室的真空度应低于 $10^{-4}$ Pa,蒸镀距离大于30cm,铝丝缠绕在U型钨丝上作为蒸发源.如图4(b)所示,左半部分为有机膜区域,右半部分为在有机膜上蒸镀的金属铝膜区域.根据入射电子在栅极薄膜中散射的模拟结果,该铝膜的厚度和表面平整度是工艺的关键,为此在蒸镀过程中需对样品进行低速旋转(30r/min),同时控制蒸发源加热电流不超过30A,蒸镀结束的时间节点利用膜厚控制仪来确定.依据石英晶体的压电效应和质量负荷效应,通过测试每秒钟晶振片振动次数的改变( $\Delta f$ )来实时监控膜层的厚度增量( $\Delta d$ ),其表达式为

$$\Delta d = \left| \frac{\Delta f \rho_Q N}{\rho_M f^2} \right| \quad (3)$$

式中,  $\rho_M$  为铝膜密度,  $\rho_Q$  为石英密度,  $N$  为石英晶振频率常数,  $f$  为石英晶振固有频率.  $\Delta d$  与  $\Delta f$  之间呈线性正相关, 通过多次制膜试验并利用台阶仪收集多组铝膜膜厚数据, 绘制完整的频率变化与膜厚关系图后可实现对成膜厚度的纳米级控制.

图 5 为栅极薄膜结构膜厚测量结果(划痕为金属探针定位痕迹), 根据图 5(b) 中位移传感器测量得到的台阶高度差(0.1 Delta Height) 显示, 有机膜和铝膜的总厚度可控制在 70 nm 左右. 部分电子在入射能量一定的情况下能够被保证透射过这个厚度的栅极薄膜. 为兼顾后续电学性能测试和工艺制备的可行性, 在原本镀有供电电极的 36 mm MCP 上表面, 有机薄膜隔离层和铝膜导电层分别被做成直径递减的同心圆形状, 径长分别为 20 mm、18 mm.

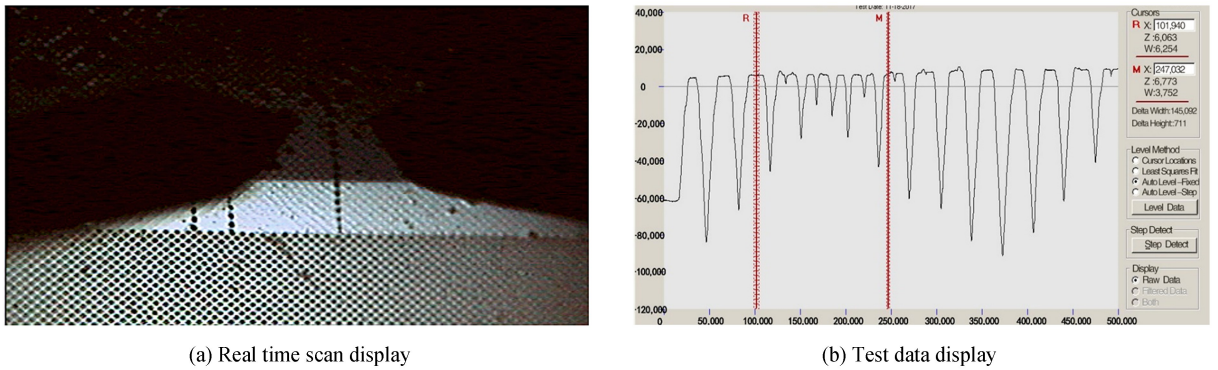


图 5 台阶仪测试结果

Fig.5 Scotch tape test for gate film

栅极膜层制作完成后, 在不损伤膜表面的情况下, 采用金属探针对铝膜和 MCP 进行电极引出. 搭配光电阴极和金属阳极的波导栅极薄膜复合探测器件依靠聚四氟乙烯绝缘材料做支撑骨架, 图 6 给出了装配成型的器件实物图.

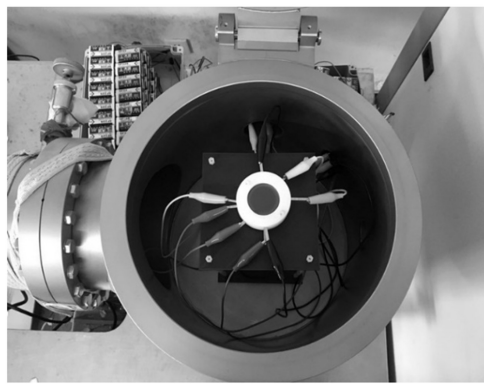


图 6 真空炉中器件实物图

Fig.6 The waveguide-gate film detector in the vacuum chamber

#### 4 波导栅极薄膜复合探测器件可行性验证

为了验证该波导栅极薄膜器件调制分流的可行性, 本文利用光电子倍增器件真空动态测试平台开展了以下验证实验. 实验在真空度为  $10^{-5}$  Pa 的腔室内进行, 整个测试系统主要由紫外光源、复合探测器件、高压供电电池组和信号采集系统组成, 见图 7.

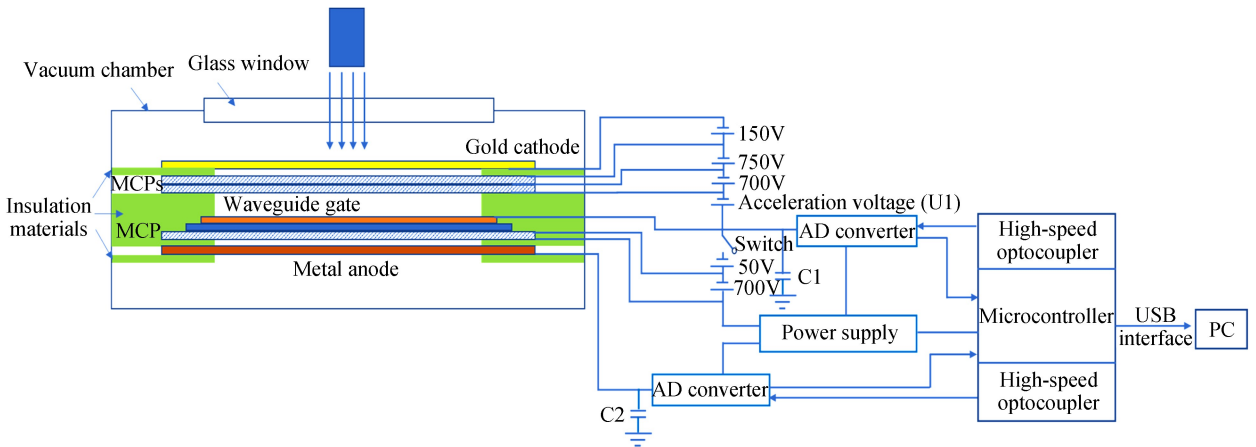


图 7 波导栅极薄膜器件调制分流测试系统

Fig.7 Signal measurement system for the waveguide-gate film detectors

高速脉冲信号在导线中传输存在趋肤效应,同时因为时域上变化剧烈,存在较多的高频分量干扰,给采样的阻抗匹配带来困难,为了验证波导栅极的调制分流性能,使用直流紫外光源作为测试系统的信号源.考虑到所用光电子激发阴极为金膜材质,其量子效率较低,一般在 1% 以下<sup>[18]</sup>,所以第一级倍增采用两块微通道板相接触的方式连接来确保实验效果更佳;上级倍增用 MCP 和下级波导用 MCP 之间级联间距越大增益越高,但是由于电子束弥散半径过大会造成器件的成像分辨率降低<sup>[19-20]</sup>,极间间距控制在 2 mm 以内;将金属阳极与下级 MCP 近贴以进一步改善电子束多径展宽对成像信号的影响.

由于板级工艺和半导体工艺的限制,即使使用先进制程的高级芯片、输入孤岛、特氟龙传输线等技术手段,弱信号检测仍存在困难.本实验中采用专用的具有自校准功能的微弱信号采集设备和上位机软件,如图 8 所示.信号采集设备中的高精度模数转换器对充放电电容收集的微弱稳态电流完成采样,通过下位机微处理器处理后传送给上位机.通过二次量测手段,利用上位机在有光源下读取的曲线与无光源下读取的曲线进行相减补偿得到器件输出的真实值,从而能够有效规避 MCP 暗电流和测试系统漏电流对甚高精度检测的影响,实现对空间电子束分流的精确校准.

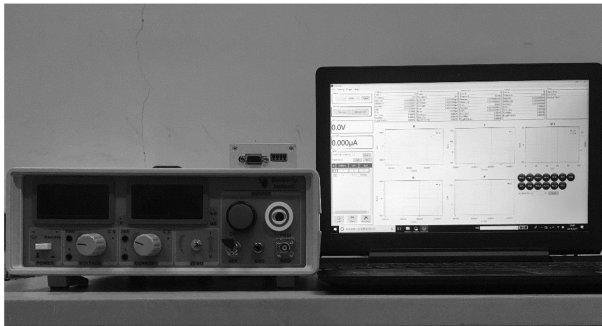


图 8 信号采集设备和上位机软件实物图

Fig.8 Signal measurement device and software system

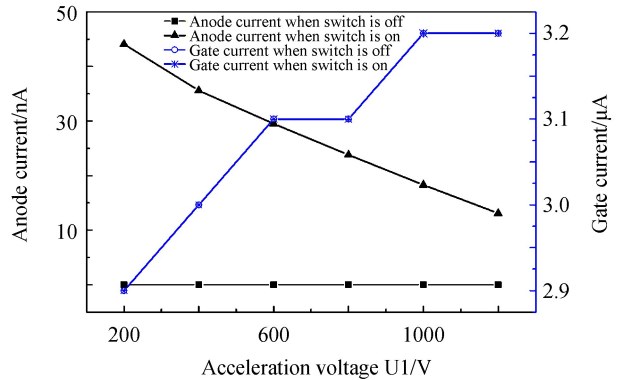


图 9 栅极和阳极电流随空间电场加速电压变化情况

Fig.9 Variation of anode current and gate current with the change of acceleration voltage

图 9 给出了校准后器件输出电流与波导栅极加速电压的关系.在给定栅极加速电压后,获得栅极的总电流,此时调制开关(switch)尚未开启,栅极以下未形成有效的空间电场,阳极收不到电子.开启开关后,栅极到阳极的电场线形成,阳极获得输出电流的同时栅极依然存在输出,器件电子束分流功能基本实现;由于能成功穿越栅极薄膜的电子占入射电子总量的极少数,并且由于前级光电子激发和倍增过程存在时间上的积累延迟,导致栅极输出电流在开关开启前后变化并不明显,然而,随着栅极加速电压的增大,栅极处场强增大,栅极调制占主导作用,栅极输出电流增大而阳极电流减小,同时由于入射到栅极的电子束能量也随之增大,阳极电流的下降趋势成亚纳安量级减缓,器件电子束调制功能基本实现.

## 5 结论

本文根据入射到栅极多元介质薄膜中的电子轨迹的模拟情况提出了一种用于复合式探测的波导栅极器件的制备方法,并在真空环境下通过实验实现对该器件的信号束流调制分极接收特性的验证,为以波导栅极电子倍增器件为核心的空间复合探测系统构建奠定了器件工艺基础.此外,相比于使用磁控溅射法在微通道板上表面沉积氧化物隔离层,本文提出的有机膜制备工艺减小了绝缘材料污染微通道孔内壁激活层导致微通道板增益下降的风险,为基于微通道板的电子倍增器件的改造升级提供了一些新思路.

### 参考文献

- [1] SHEARD B S, MARHRDT C, WARD R L, *et al.* Laser link acquisition demonstration for the GRACE follow-on mission[J].*Optics Express*, 2014, **22**(9): 11351-11366.
- [2] KAZAURA K, OMAE K, SUZUKI T, *et al.* Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 4958-4968.
- [3] GU Ye, TONG Shou-feng, SONG Yan-song, *et al.* Performance research on four-quadrant detector in communications and tracking compound mode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(9): s114002.  
谷野, 佟首峰, 宋延嵩, 等.四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能研究[J].中国激光, 2015, 42(9): s114002.
- [4] FAN Xin-kun, ZHANG Lei, SONG Yan-song, *et al.* Simultaneous detection technology of tracking and communication based on four-quadrant detector[J].*Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(9): 0906009.  
范新坤, 张磊, 宋延嵩, 等.四象限探测器的跟踪与通信复合探测技术[J].中国激光, 2017, **44**(9): 0906009.
- [5] JIANG Hui-lin, FU Qiang, ZHANG Ya-lin, *et al.* Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(4): 0101001.  
姜会林, 付强, 张雅琳, 等.空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J].红外与激光工程, 2016, **45**(4): 0101001.
- [6] LIEBER A J, TROST P K. Integrated imaging and ranging lidar receiver with ranging information pickoff circuit: US, 5220164[P].1993-06-15.
- [7] MU Yi-ning, DU Yue, LI Ye, *et al.* Complex waveguide anode micro-channel plate-photomultiplier tube (MCP-PMT) for space optical communication[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, **44**(11): 2812-2816.  
母一宁, 杜月, 李野, 等.空间光通信复合波导阳极微通道光电倍增管[J].电子学报, 2016, **44**(11): 2812-2816.
- [8] GAO Xu, MU Yi-ning, LI Ye, *et al.* Verification experiment of electron shunt for complex wave-guide grid Microchannel Plate-photomultiplier tube[C].SPIE, 2016, **10255**(3): 102552X.
- [9] MU Yi-ning, DU Yue, LI Ye, *et al.* Feature analysis and experiment validation for complex waveguide anode MCP-PMT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(8): 0820004.  
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): 0820004.
- [10] YANG Lu-ping, LIU Shu-lin, HUANG Guo-rui, *et al.* Technical approach to improve the detective efficiency of Microchannel Plate for low energy electron[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(8): 714-718.  
杨露萍, 刘术林, 黄明举, 等.提高微通道板对低能电子探测效率的技术途径[J].红外技术, 2016, **38**(8): 714-718.
- [11] MU Yi-ning, FAN Hai-bo, WANG Mei-ting, *et al.* Beam-guide gate-type complex detection mechanism based on energy loss in coupling of two microchannel plates[J].*Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, **38**(3): 226-229.  
母一宁, 樊海波, 王美婷, 等.利用微通道板极间耦合损失实现复合探测的空间束导型调制机制[J].真空科学与技术学报, 2018, **38**(3): 226-229.
- [12] MOTT NF, MASSY HSW. The theory of Atomic Collisions[M].3rd ed. Oxford University Press, 1965.
- [13] JOY DC, LUO S. An empirical stopping power relationship for low-energy electrons[J]. *Scanning*, 1989, **11**(4): 176-180.
- [14] GAO Feng-ju, ZHENG Rui-ting, CHENG Guo-an. Research progress in preparation of self-supporting thin film[J]. *Materials Review*, 2007, **21**(6): 1-3.  
高凤菊, 郑瑞廷, 程国安.自支撑薄膜制备的研究进展[J].材料导报, 2007, **21**(6): 1-3.
- [15] CONG Xiao-qing, QIU Xiang-biao, SUN Jian-ning, *et al.* Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(9): 0916002.  
丛晓庆, 邱祥彪, 孙建宁, 等.原子层沉积法制备微通道板发射层的性能[J].红外与激光工程, 2016, **45**(9): 0916002.
- [16] LI Xiao-feng, ZHANG Jing-wen. Ion barrier of MCP in the third generation image intensifier[J].*Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(12): 1496-1499.  
李晓峰, 张景文.三代管 MCP 离子阻挡膜研究[J].光子学报, 2001, **30**(12): 1496-1499.
- [17] XU Guo-ji, HAO Xiu-hong. Methods for depositing metallic layers on organic films[J]. *Atomic Energy Science and*

Technology, 1996, **30**(1):35-37.

许国基, 郝秀红. 金属化有机膜制备方法研究[J]. 原子能科学技术, 1996, **30**(1): 35-37.

- [18] WANG Yu-ying, GAO Yang, WANG Xue-min, *et al.* Fabrication and ultraviolet photoemission characteristics of novel Au photocathodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(10): 2627-2630.  
王瑜英, 高扬, 王雪敏, 等. 新型金阴极及其紫外光电发射特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(10): 2627-2630.
- [19] ZHANG Xing-hua, ZHAO Bao-Sheng, LIU Yong-an, *et al.* Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3):1779-1784.  
张兴华, 赵宝升, 刘永安, 等. 紫外单光子成像系统增益特性研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(3): 1779-1784.
- [20] LIU Yong-an, ZHAO Bao-sheng, ZHU Xiang-ping, *et al.* Analysis and testing of wedge and strip anode detector characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4):750-755.  
刘永安, 赵宝升, 朱香平, 等. 楔条形阳极探测器的性能测试与分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 750-755.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(No.51602028), the Science and Technology Development Project of Jilin (Nos. 20150204049GX, 20150204083GX, 20160520114JH, 20180519019JH), Key Project of Jilin Educational Committee (No. JJKH20170602KJ), Special Foundation of Jilin Development and Reform Commission (No. 2018C040-3), the Innovation Technology Foundation of Changchun University of Science and Technology(No.XJJLG-2017-01)

引用格式: LIU De-xing, MU Yi-ning, SONG De, *et al.* Preparation and Experiment Validation for a Waveguide-gate Film Complex Detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10):1004001

刘德兴, 母一宁, 宋德, 等. 波导栅极薄膜复合探测器件的制备及可行性验证[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1004001