

## 微通道光电倍增管用复合波导阳极特性分析与验证

母一宁<sup>1</sup>, 杜月<sup>1</sup>, 李野<sup>1</sup>, 李平<sup>2</sup>, 高旭<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学计算机学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 从微通道板光电倍增模型着手, 深入研究复合波导阳极的透射与位敏阳极对真空倍增系统造成的约束条件, 并采用 Mott 插值方法研究了该新型光电器件电子光学特性。首先介绍了复合波导阳极结构与工作原理, 给出了透射阳极与位敏阳极之间的对应关系, 在此基础上分析了高速信号检测功能和入射光轴精确定位功能的约束关系, 给出了相应的器件设计与实验方法, 最后在真空炉中进行了该新型器件的验证性试验。试验结果表明了这种新型器件在理论和实践层面的可行性, 但探索极间隧穿电压自适应调整机制将成为拓展其应用场合的必然趋势。

**关键词:** 光电倍增管; 微通道板; 复合波导阳极

中图分类号: TN95 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0820004

## Feature analysis and experiment validation for complex waveguide anode MCP-PMT

Mu Yining<sup>1</sup>, Du Yue<sup>1</sup>, Li Ye<sup>1</sup>, Li Ping<sup>2</sup>, Gao Xu<sup>1</sup>

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Computer Science & Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To start from microchannel-plate photoelectric multiple model, constraint conditions for vacuum multiplier system caused by anodized transmission of composite waveguide and position-sensitive anodes were studied deeply, and Mott interpolation method was employed to research the electro-optical properties of new optoelectronic device. Firstly, structure and working principle of composite waveguide anode were introduced, and the correspondence between the transmission anode and position-sensitive anode was given. On this basis, constrained relationship between high-speed signal detection and precise positioning of incident light axis was analyzed, and the corresponding devices design and experimental methods were given. Finally, the verification testing of the new device was conducted in vacuum furnace. Test results show that the new device is feasible both in theory and practice, to search for the adaptive adjustment mechanism of interelectrode tunneling voltage is a trend as inevitable for extending its application field.

**Key words:** PMT; MCP; complex waveguide anode

收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275080); 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20150204049GX); 吉林省教育厅项目(吉教科 2016357)

作者简介: 母一宁(1985-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间光通信与光电器件方面的研究。Email: der0403030420@163.com

通讯作者: 李平(1958-), 女, 教授, 硕士生导师, 硕士, 主要从事激光物联网方面的研究。Email: 231909849@qq.com

## 0 引言

在空间激光通信中,为了增大通信光接收功率通常需要选用大口径光学天线对通信光进行增益并平滑大气湍流影响。然而由几何光学原理可知,大口径光学系统从理论上讲焦距无法太短。并且为了保证通信带宽,接收端的半导体探测器光敏面尺寸无法太大,所以实际的空间光通信系统的视场通常极小<sup>[1-2]</sup>。另外由于承载平台(比如:飞机、舰船、车辆等)自身会发生随机震动,这又进一步提高了通信对光轴对准精度与跟踪带宽的需求。为了解决这一难题,国内外诸多学者对此展开了较为深入的研究,比如参考文献[3-4]指出采用自适应光学的方法实现对入射光轴的精确定位,参考文献[5-6]指出采用复合多级跟踪模式提高跟踪与对准精度。虽然上述方法可以在实际应用中保证通信链路的成功建立,但是复合式跟踪系统通常需要 3 个光学天线,进而导致系统体积与质量都很大并且在装调过程中同样面临多光轴精密校准难题。由参考文献[7-8]可知,虽然采用微通道光电倍增管作为通信探测器既可以满足射频级通频带宽的需求,又可以缓解光敏面尺寸的约束程度、使大视场、高速的光电探测成为一种可能,极大地降低了系统对跟踪对准精度的需求,但多光轴与多光轴校准难题只是被缓解,并没有被彻底解决。基于此,文中提出了一种复合波导阳极结构,该结构改造了现有的微通道光电倍增管,从器件的层面上解决了复合式探测的需求,最终从根本上解决问题。

## 1 复合波导阳极结构

带复合波导阳极结构的微通道光电倍增管如图 1 所示,通信光脉冲  $c$  被光学天线汇聚,透过窗口  $a$ ,聚焦于光电阴极  $b$  并产生光电子,由于光电阴极  $b$  与微通道  $d$  采用近贴式结构,所以光电阴极  $b$  所产生的光电子将马上被微通道  $d$  所收集,并且在  $d$  中倍增成高能电子云  $i$ ,高能电子云在外加高压电极引入电场的加速作用下加速撞向复合式波导阳极,复合式波导阳极主要由微通道  $d'$ 、透射式阳极  $g$ 、位敏阳极  $h$  构成,即首先将透射式阳极  $g$  镀在微通道  $d'$  一面,然后在其另一面镀位敏阳极,最后通过光刻技术在

位敏阳极上刻出位敏结构<sup>[9]</sup>(位敏结构可以是四象限结构或楔条结构)。高能电子云  $i$  在外加强电场的加速作用下撞击透射式阳极  $g$ ,其中大部分电子被收集小部分电子完成渡越,完成渡越的电子进入微通道  $d'$  引发二次电子倍增并最终被位敏阳极  $h$  所收集,具体器件的立体结构示意图如图 2 所示。

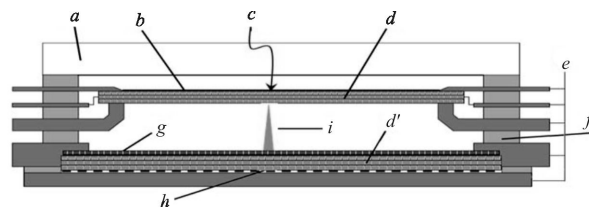


图 1 器件原理图

Fig.1 Principle diagram of devices

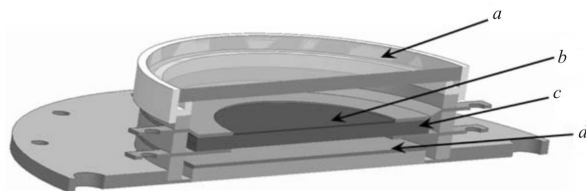


图 2 器件示意图

Fig.2 Schematic of devices

可见,将复合波导阳极引入到传统微通道光电倍增管中可使其具备入射光轴定位功能,但在具体器件设计时需考虑诸多约束条件。

## 2 复合波导阳极设计原理与特性

### 2.1 透射阳极的电子渡越与散射

复合波导阳极的上表面是一层铝膜作为透射阳极,该铝膜的主要功能是吸收大部分电子并渡越部分电子来引发二次电子倍增。然而电子在渡越铝膜时,主要会发生弹性散射和非弹性散射。对于一定厚度的铝膜,入射电子经历多次碰撞,累积偏向可利用玻耳兹曼方程统计确定。费米求解简化的玻耳兹曼方程,给出了散射电子的空间几率分布密度为:

$$H(r, Z') = \frac{3\lambda'}{4\pi Z'} \exp\left[-\frac{3}{4} \left(\frac{\lambda' r^2}{Z'^3}\right)\right] \quad (1)$$

式中: $r$ 为距离入射电子束轴线的径向半径; $Z'$ 为沿电子穿透方向的垂直距离; $\lambda'$ 为散射平均自由程。归一化条件为:

$$\frac{3\lambda'}{4\pi Z'} \iint \exp\left[-\frac{3\lambda'(x^2+y^2)}{4Z'^3}\right] dx dy = 1 \quad (2)$$

其中, 散射平均自由程以空间高斯分布形式为:

$$\lambda'(A) = \frac{5.12 \times 10^{-3} E^2 A}{\rho Z^2 \ln(0.75 E^{1/2} Z^{1/3})} \quad (3)$$

式中:  $A$  为原子量;  $E$  为电子能量;  $\rho$  为薄膜密度;  $Z$  为原子序数。电子经过薄膜后电子束扩散模型为:

$$r'^2 = r_i'^2 + \frac{4Z'^3}{3\lambda'} \quad (4)$$

式中: 高斯半径  $r_i$  为入射束在  $Z'=0$  处的半径, 第二项表示半径的扩展。图 3 为采用 Mott 插值法模拟的电子云渡越铝制薄膜的散射仿真图。

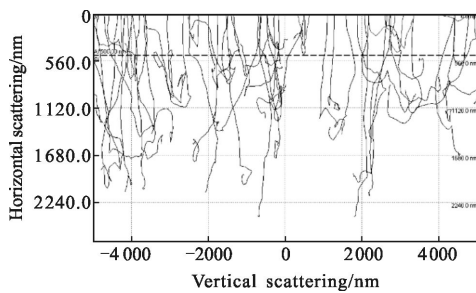
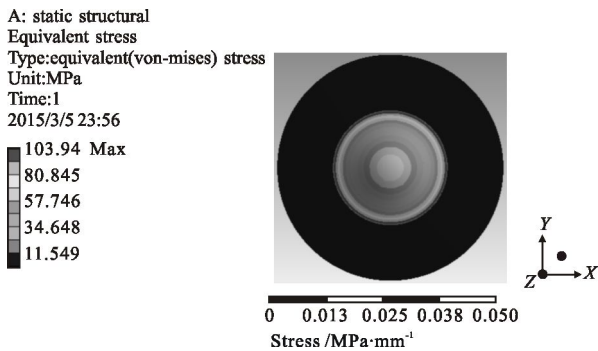


图 3 薄膜散射仿真图

Fig.3 Electron scattering simulation diagram

可见如果将透射阳极薄膜制作过厚, 不但会增加电子薄膜散射对成像能力的影响, 而且还需要极高的电压  $V_2$  才能完成电子渡越。相反如果将透射阳极薄膜做的极薄也是不可以的, 首先从工艺的角度讲, 复合波导阳极两端都要镀膜, 即在镀膜过程中通道内部真空度将被抽至 1 Pa 左右。当复合波导阳极制作完成后完全暴露在大气压下时, 如果透射阳极过薄, 大气压将会把它压漏, 图 4 通过有限元分析的手段给出了铝制薄膜受大气压时应变与应力仿真图。为了说明情况, 图 4 选用了口径  $50 \mu\text{m}$  的微通道口, 厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  的透射阳极作为参考。

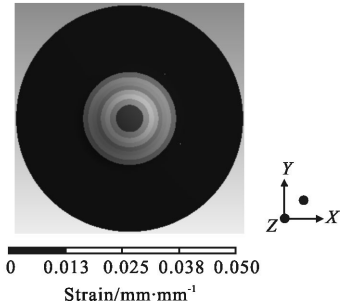


(a) 应力分布情况图

(a) Stress distribution

A: static structural  
Total deformation  
Type: total deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
2015/3/5 23:56

0.0005806 Max  
0.00045158  
0.00032255  
0.00019353  
6.4511e-5



(b) 应变分布情况图

(b) Strain distribution

图 4 有限元仿真图

Fig.4 Finite element simulation diagram

当完全暴露在大气压下时, 透射阳极已有被压破的可能。从另一个方面考虑, 电子渡越与电子分离也限制了透射阳极作薄。透射阳极不但要起到收集射频电子信号的作用而且还要为光电二次倍增供电提供管流。如果薄膜厚度做的太薄, 那么管流的供给区与射频电子收集扩散区必然相互交叠, 进而势必会对射频电子信号的提取造成影响。综上两点考虑, 文中实验采用的透射阳极厚度为  $0.5 \mu\text{m}$  的铝膜, 位敏阳极厚度为  $2 \mu\text{m}$  铜膜, 图 5 给出了透射阳极电子渡越效果图。可见透射阳极在 7~8 kV 时具有较好的性能, 及 80% 以上的电子被收集, 其余少部分电子完成渡越且对图像整体位置影响不大, 具体的渡越能力评价图如图 6 所示。

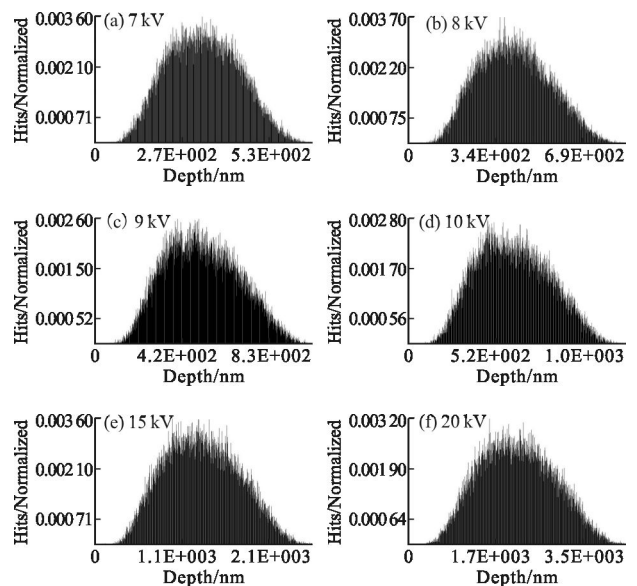


图 5 电子渡越效果图

Fig.5 Electronic transit diagram

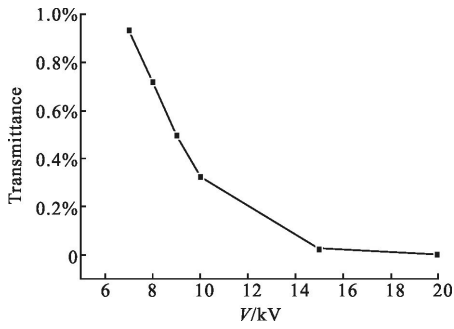


图 6 渡越能力评价图

Fig.6 Transit ability evaluation diagram

### 2.2 位敏阳极特性与误差分析

位敏阳极的种类很多,目前常见的有楔条形、四象限等位敏阳极。文中为了方便验证该新型器件的理论可行性,采用了较为简单且易于分析的四象限探测结构。四象限位敏阳极结构首先在透射阳极对应微通道板的另一面镀一层厚度为 2 μm 的铜膜,然后采用光刻技术在该铜膜上刻十字线且将铜膜一分为四,并在每个铜面上引出电极,文中实验的分割沟道间距为 25 μm,最后再次通过镀膜对其表面镀二氧化硅绝缘层,最终效果如图 7 所示。

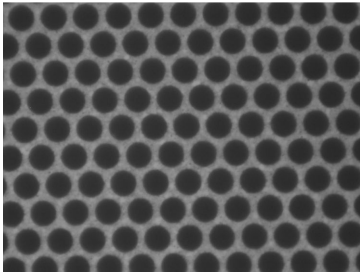


图 7 镀膜后的微通道板

Fig.7 MCP after coating

当高能电子云渡越透射阳极且经过二次倍增后最终被每个独立的阳极收集,所产生的电流值为  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 、 $I_d$ 。同时,不同阳极之间所产生的光电流由于正比于分布于其表面的电子云功率。所以其整体的细分质心表达式为:

$$\sigma_x = \frac{(I_c + I_d) - (I_b + I_a)}{I_a + I_d + I_b + I_c} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_d + I_b + I_c} \quad (6)$$

在整个光轴检测系统中,最小的光电成像单元直接决定光轴检测系统的固有分辨力,即最小成像的直径  $d_A$  与光学天线的焦距  $f$  直接确定了整个光轴

检测系统的固有精度  $\Delta$ :

$$\Delta = d_A / 2f \quad (7)$$

可见理想情况下,整个检测系统的精度是由两部分组成,第一部分是整个系统的固有分辨精度  $\Delta$ ,第二部分是系统的检测细分精度  $\sigma$ ,其理想情况下的光轴检测精度  $\theta$  最终表达式为:

$$\theta = \Delta * \sigma \quad (8)$$

所以如何降低噪声电子云功率,提升有效脉冲电子云和噪声电子云功率的信噪比直接影响整个器件的细分精度。噪声电子云干扰细分表达式为:

$$\dot{\sigma}_x = \frac{(I_a + I_x + I_d + I_c) - (I_b + I_x + I_c + I_x)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_x} \quad (9)$$

$$\dot{\sigma}_y = \frac{(I_a + I_x + I_b + I_x) - (I_c + I_x + I_d + I_x)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_x} \quad (10)$$

可见噪声电子云引入的误差可以由公式(5)减公式(9),公式(6)减公式(10)获得,其误差表达式为:

$$\Delta\sigma_x = \frac{4I_x(I_a + I_d - I_b - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c) - (I_a + I_d - I_b - I_c + 4I_x)} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{4I_x(I_a + I_b - I_d - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c) - (I_a + I_b - I_d - I_c + 4I_x)} \quad (12)$$

由公式(16)~(21)可知,噪声电子云引入的干扰主要与信噪比和有效脉冲电子云的尺寸有关( $d_A$ ),即信噪比越大,干扰越小,光轴脱靶量越小干扰越小。设定透射阳极接收到的电子云斑为 0.12 mm,器件前端的光学系统焦距为 150 mm,即该器件的固有分辨能力为 800 μrad。在上述假设的基础上,图 8 给出了噪声电子云对检测精度的影响以及不同偏差角度的检测误差。

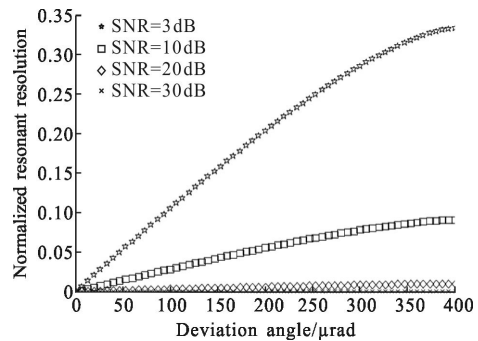


图 8 光轴偏移量引入误差变化趋势

Fig.8 Introduced error trend by optical axis offset

如果忽略中心沟道,可以将公式(11)转换成公式(13)的形式,及背景光引入误差表达式为:

$$\Delta\sigma = \frac{P_S P_X}{P_S^2 + P_S P_N} \quad (13)$$

式中： $P_S$  为接收到的有效电子云功率； $P_N$  为接收到背景噪声电子云功率； $P_X$  为一个轴向接收电子云功率差。如果将电子聚焦斑简化为一个等强

圆，其误差的最终表达式为公式(14)。可见其误差与电子云信噪比和电子云聚焦偏差量直接相关。

$$\Delta\sigma = \left[ \frac{1}{\frac{P_S}{P_N}} \frac{\pi r^2 - 2 \left[ \frac{2\pi r^2 \arccos\left(\frac{r-\Delta X}{r}\right) \sin\left[2\arccos\left(\frac{r-\Delta X}{r}\right)\right] r^2}{360} \right]}{\pi r^2} \right] \quad (14)$$

### 3 验证与分析

文中试制的器件参数如下(以下标注参照图 1 和图 2), 光电阴极  $b$  为直径 15 mm 的金阴极, 光脉冲  $c$  选用 254 nm 的 LED 输出脉冲功率约 3 mW,  $d$  选用有效口径为 18.4 mm 的微通道板, 通道孔径为 6  $\mu\text{m}$ , 通道孔间距为 8  $\mu\text{m}$ , 厚度为 0.3, 径长比为 50,  $d$  复合波导阳极的微通道板出于试制成本考虑选用了和  $d$  一样的微通道板, 其透射阳极为 0.5  $\mu\text{m}$  的铝膜加 5 nm 的二氧化硅防氧化膜, 其位敏阳极为 2  $\mu\text{m}$  的四象限铜膜, 中心分割沟道间距为 25  $\mu\text{m}$ , 其中  $d$  的板压为 1 000 V,  $g$  与  $h$  之间压差为 700 V。

为了测试特性未将光电阴极镀在微通道板  $d$  输入面上, 而是仅通过机械压紧的结构固定, 由于需要给引入电极预留一部分空间, 所以  $b$  与  $d$  之间必然存在一定的电子衍射空间, 文中设计  $b$  与  $d$  之间距离约为 0.5 mm, 为了减少这 0.5 mm 电子衍射, 减少实验测试引入的不必要分辨率损耗, 可以使  $b$  与  $d$  之间压差为 500 V, 进而起到加速渡越作用。由参考文献[10]可知: 金阴极的电子逸出初始最大动能约为 2.26 eV。对于微通道板  $d$  前半段, 如果采用近贴式结构即  $b$  与  $d$  之间距离趋近 0, 所以按照常规工艺制作器件时, 这部分电子衍射将被忽略, 然而对于微通道板  $d$  后半段的电子衍射是不可避免的。因为需要兼顾透射阳极的电子渡越能力, 必须给电子云预留加速空间 ( $Z'$ ), 虽然  $c$  和  $d$  之间拥有一个高压 ( $V_2$ ) 可以加速电子快速渡越, 减少一定的衍射, 但这部分的分辨率损失是不可避免的。这里  $d$  与  $g$  之间的间距为 5 mm,  $d$  与  $g$  之间压差在 4 000~12 000 V 之间连续调整, 由于文中选用的微通道板孔径很小只有 6  $\mu\text{m}$ , 所以这里设定电子出射均值能量约为

65 eV。将该器件放置于真空炉中进行功能测试, 并采用电阻链方式对其进行供电, 紫外 LED 发射等重频脉冲光激电子云, 且该频率远离高压电源自激振荡纹波频率, 其透射阳极的电子渡越基本在 5 000 V 开始突显渡越, 即位敏阳极检测到交流电子云, 并且随着  $d$  与  $g$  之间电压增加, 电子云信噪比开始降低, 当电压升至 6 kV 时, 并且达到 7 800 V 时出现自饱和, 如果进一步增大  $d$  与  $g$  之间压差, 不但会减少透射阳极收集到的信号功率, 而且又无助于提升位敏阳极的信噪比<sup>[11-12]</sup>; 可见当输入信号功率不同时复合波导阳极极间压差自适应调整是十分必要的。

### 4 结论与展望

文中首次提出了一种微通道光电倍增管用复合波导阳极, 并分析与验证该型器件的构造原理与器件特性。由于时间仓促经费紧张, 针对该结构文中还有诸多科学问题没有展开深入研究具体如下: (1) 采用复合波导阳极的微通道光电倍增管还没有展开具体的器件级设计。(2) 由于 3.2 节位敏特性分析可知, 电子云斑的尺寸直接决定了器件对噪声的敏感程度, 如何通过设计微型电子光学系统来压低电子云散射是十分必要的。(3) 根据复合波导阳极自适应电压调整与标定工作尚未展开。上述内容将陆续在以后的研究中开展, 致力于从器件的角度为空间激光通信系统的总体设计提供一些新思路。

#### 参考文献:

[1] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Song Lu, et al. The System and Technology of the Free Space Laser Communications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)  
姜会林, 佟首峰, 宋路, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011

- [2] Mu Yining, Wang He, Li Ping, et al. Pulse state-interval modulation and experiment in the hostile environments [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(3): 224–230. (in Chinese)  
母一宁, 王贺, 李平, 等. 脉冲状态间隔调制方法及恶劣环境下通信实验[J]. 通信学报, 2014, 35(3): 224–230.
- [3] Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao, et al. Application of Hartmann technique in sequence spot detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2197–2204. (in Chinese)  
母一宁, 刘泉, 于林韬, 等. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2197–2204.
- [4] Mu Yining, Wen Guanyu, Wang He, et al. Study of technique of spot detection based on sequence information fit circle center [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2011, 12(1): 59–62. (in Chinese)  
母一宁, 温冠宇, 王贺, 等. 基于序列信息圆心拟合的大气激光光斑检测技术[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(1): 59–62.
- [5] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, et al. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 131–136. (in Chinese)  
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 131–136.
- [6] Ren Bin, Tong Shoufeng, Song Yansong, et al. Research on the driving technique of high precision and speedy piezo-electric Ceramic transducer in fine tracking system of air laser communication [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 420–425. (in Chinese)  
任斌, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 空间激光通信精跟踪单元的高精度快速 PZT 驱动技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 420–425.
- [7] Chen Yuyu. Research on property of MCP-PMT's pulse output linearity [J]. *Nuclear Physics Review*, 2014, 31(2): 177–182. (in Chinese)  
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.
- [8] Wu Cuiqin, Zhang Xiangdong, Wang Xingzhi, et al. MCP-PMT Position-Sensitive-Device module based on IR-UP conversion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1096–1100. (in Chinese)  
武翠琴, 张向东, 王兴治, 等. 基于红外上转换原理的 MCP-PMT 位敏探测器组件研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1096–1100.
- [9] He Lingping, Ni Qiliang, Li Min, et al. Image distortion rectification and resolution test of Photon-counting imaging detector with wedge-and-strip anode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2699–2704. (in Chinese)  
何玲平, 尼启良, 李敏, 等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2699–2704.
- [10] Yuan Zheng, Liu Shenye, Cao Zhurong, et al. Selective photoemission of Au photocathode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4967–4971. (in Chinese)  
袁铮, 刘慎业, 曹柱荣, 等. 金阴极的选择性光电效应[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 4967–4971.
- [11] Wang Xin, Sun Yao, Li Ye, et al. Potential application of ZnO thin film in the low-light-level image intensifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 151–154. (in Chinese)  
王新, 孙瑶, 李野, 等. ZnO 薄膜在微光像增强器中的潜在应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 151–154.
- [12] Fu Shencheng, Li Ye, Duanmu Qingduo, et al. Simulation on the particle blocking and transmitting performance of ion barrier film versus environmental temperature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 129–132. (in Chinese)  
付申成, 李野, 端木庆铎, 等. 防离子反馈膜粒子阻透率随环境温度变化的模拟研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 129–132.