

空间光通信用复合波导阳极微通道光电倍增管

母一宁, 杜月, 李野, 李鑫伟, 解晶晶

(长春理工大学电子科学与技术系, 吉林长春 130022)

摘要: 为了降低自由空间光通信系统对高跟踪精度的需求, 化简光学天线结构, 缩小系统体积, 本文提出了一种采用复合波导阳极的空间光通信专用微通道光电倍增管. 首先从微通道板光电倍增理论模型的角度出发, 介绍了新型器件的工作原理并分析复合波导阳极的透射阳极和位敏阳极对真空倍增系统造成的约束条件; 其次通过光学传递函数分析方法研究了复合波导阳极的器件特性并给出了器件设计参数与成像能力之间的对应关系; 接着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, 给出了相应的电子光学系统设计与修正方法; 最后在真空炉中进行了该新型器件的验证性试验.

关键词: 自由空间光通信; 微通道光电倍增管; 复合波导阳极

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)11-2812-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.035

Complex Waveguide Anode Micro-channel Plate-Photomultiplier Tube (MCP-PMT) for Space Optical Communication

MU Yi-ning, DU Yue, LI Ye, LI Xin-wei, XIE Jing-jing

(Department of Electronic Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: In order to decrease the high tracking precision press of free space optical communication, simplify the optical antenna structure and reduce the system size, a new specialized micro-channel plate-photomultiplier tube (MCP-PMT) using complex waveguide anode is first proposed in this paper, which could be used in free space optical communication system (FSO). First of all, from the view point of photomultiplier model of microchannel plate, the principle of new device is described and the effect of both transmission and position anode of complex waveguide anode to constraints of vacuum photomultiplier system is analyzed; Secondary, the device characteristic of the complex waveguide anode devices is investigated through analytical method of modulation transfer function (MTF), and the corresponding relations between design parameters of device and imaging ability is given. Based on the above, constraint relation between high-speed signal detection and optical axis position are investigated and corresponding design and correction method of electro-optical system are derived. At last, this kind of new device is verified through experiment in the vacuum furnace.

Key words: free space optical (FSO); micro-channel plate-photomultiplier tube (MCP-PMT); complex waveguide anode

1 引言

在空间光通信中, 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. 可见, 实际的空间光通信系统的通信光接收视场通常极小^[1,2]. 另外, 由于承载平台自身会发生随机震动, 这又进一步提高了链路对光轴对准精度及跟踪带宽的需求. 对此

国内外学者展开了较为深入的研究, 比如文献^[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; 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. 目前为了保证通信链路的建立, 通常需要三个光学天线完成, 最终导致体积与重量加大且面临多光轴精密校准难题. 由文献^[7,8]可知, 利用微通道光电倍增管探测通信光, 可以缓解光敏面尺寸的约束程度, 但多光轴校准难题仍未被彻底解决. 本文提出了一种空间光通信用复合波导阳极微通道光电倍增管, 采用复合

波导阳极微结构后使其既具有射频光电信号检测能力,又具有入射光轴精确定位功能,最终将粗瞄、精瞄、通信光接收天线三者合而为一。

2 复合波导阳极结构与工作原理

带复合波导阳极的微通道光电倍增管如图 1。

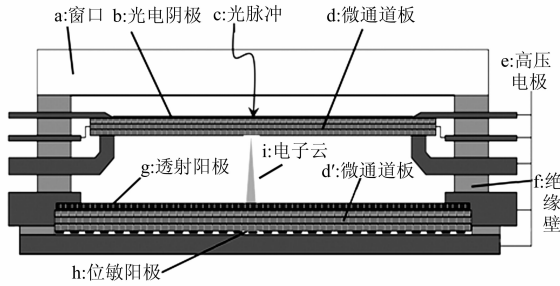


图1 器件原理图

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作用下加速撞向复合波导阳极,复合波导阳极主要由微通道 d' , 透射式阳极 g , 位敏阳极 h 构成,首先在微通道 d' 两端分别溅射微米量级的 H-K 绝缘薄膜(比如:氧化铝或氧化镁)。然后将透射式阳极 g 薄膜制作在微通道 d' 一面(可以采用有机载膜去除工艺或衬底转移工艺),在另一面采用相同的工艺制作位敏阳极 h 薄膜,最后在位敏阳极上制作位敏结构^[9]。

可见,要让一个微通道光电倍增管兼顾射频光电信号探测与入射光轴精确定位两方面,在具体器件设计时还需考虑诸多约束条件。

3 器件设计参数与成像能力建模

由上文可知,复合波导阳极微通道光电倍增管主体由光电阴极、微通道板、复合波导阳极三部分组成,分辨力由上述三者及几何设计关系而定,其表达式为:

$$R^{-2} = R_1^{-2} + R_2^{-2} + R_m^{-2} + R_s^{-2} \quad (1)$$

式(1)中 R_1 为阴极电子光学分辨率; R_2 为复合波导阳极电子光学分辨率; R_m 为 MCP 固有分辨率; R_s 为复合波导阳极固有分辨率。

根据静电聚焦原理 R_1 为引入的像差表达式为:

$$r = 2d_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{V_1}} \sin \alpha \quad (2)$$

式(2)中 d_1 为阴极近贴距离; ε_1 为电子云出射平均动能; V_1 为极间电压; α 为电子云初始发散角。令 $\xi = \varepsilon_1 / V_1$, $D_m = 2d_1 \xi^{0.5}$, 即 $r_0 = D_m \sin \alpha$ 。由式(2)可知,凡具有初始平均动能为 ε_1 , 初始角 α 的光电子都有几率打到半

径为 r_0 的圆内,可见问题转化为求二元随机变量 (ξ, α) 的函数 r 的分布问题。设电子落在 r_0 的概率为 $P\{r < r_0\}$, 则光电子对随机变量 r 的分布函数为:

$$N(r) = \iint_D dN(\xi, \alpha) \quad (3)$$

式(3)中 D 为指定区域。接下来对式(3)微分即可获得密度函数 $n(r) = dN(r)/dr$ 。接下来将密度函数以点扩散函数形式代入获得最终 MTF 表达式:

$$\text{MTF}_{R1} = \exp\{-4\pi^2 d_1^2 f^2 \frac{\varepsilon_1}{V_1}\} \quad (4)$$

式(4)中 ε_1 可通过爱因斯坦公式获得:

$$\varepsilon_1 = hc \left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0 \cdot \lambda} \right) \quad (5)$$

由式(5)看出光电子的初始最大动能只与光阴极材料相关且初始最大动能差别不大。 R_2 与 R_1 存在明显不同,为了能让高能电子隧穿复合波导阳极,必须为电子云加速预留一定空间,进而无法采用近贴式结构。同理按照 MTF_{R1} 的求解办法获得 MTF_{R2} , 其表达式为:

$$\text{MTF}_{R2} = \exp\{-\pi^2 d_2^2 f^2 \frac{\varepsilon_2}{9V_2}\} \quad (6)$$

式(6)中 d_2 为微通道板与复合波导阳极距离; ε_2 为微通道板输出电子云的出射动能; V_2 为极间加速电压。由于复合波导阳极是在微通道板上制作不同的微结构阳极而成的,所以其固有分辨率的计算方式与微通道板固有分辨率的制作方式基本相同, R_s 与 R_m 的 MTF 的分析方法与表达式基本相同。同理按照 MTF_{R1} 、 MTF_{R2} 的求解办法获得 MTF_{MCP} , 表达式为:

$$\text{MTF}_{MCP} = \left| \frac{J_1(2\pi f D)}{\pi f D} \right| \quad (7)$$

由式(7)可知,微通道孔直径线性影响其分辨能力,只要减小 D 就可以直接提高其分辨能力。根据文献报道,微通道的直径已经可以达到微米量级,所以从理论上讲这部分对整个器件的分辨能力影响不大。

4 复合波导阳极设计原理与特性

4.1 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,该薄膜的主要功能是吸收大部分电子及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,累积偏向可利用玻尔兹曼方程统计确定。费米求解了简化的玻尔兹曼方程,其散射电子的空间几率分布密度为:

$$H(r, Z') = \frac{3\lambda'}{4\pi Z'^3} \exp\left[-\frac{3}{4}\left(\frac{\lambda' r^2}{Z'^3}\right)\right] \quad (8)$$

其中, r 是距离入射电子束轴线的径向半径, Z' 是沿电子穿透方向的垂直距离, λ' 是散射平均自由程。归一化条

件为:

$$\frac{3\lambda'}{4\pi Z^3} \iint \exp\left[-\frac{3\lambda'(x^2+y^2)}{4Z^3}\right] dx dy = 1 \quad (9)$$

其中,散射平均自由程空间高斯分布形式为:

$$\lambda'(A) = \frac{5.12 \times 10^{-3} E^2 A}{\rho Z^2 \ln(0.725 E^{1/2} Z^{1/3})} \quad (10)$$

其中, A 是原子量, E 是电子能量, ρ 是薄膜密度, Z 是原子序数. 通过式(8)、式(10)可获得电子穿透薄膜深度为 Z' 时, 距离高斯中心线半径处的响应密度, 即获得电子经过薄膜后电子束扩散模型:

$$r^{2'} = r_i^{2'} + \frac{4z^{3'}}{3\lambda} \quad (11)$$

高斯半径 r_i 是入射束在 $Z=0$ 处的半径, 第二项表示出了半径的扩展. 相应的薄膜散射效果如图 2 所示.

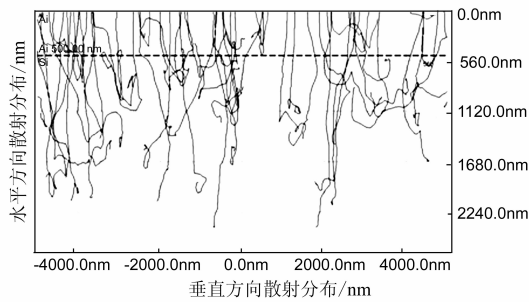
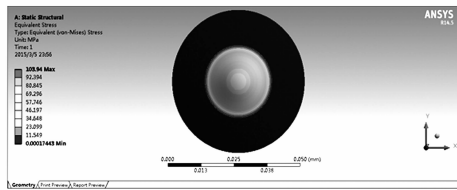
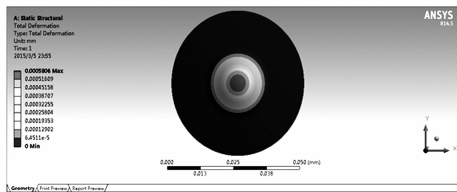


图2 薄膜散射仿真图

当复合波导阳极暴漏在大气环境中, 如果透射阳极过薄, 薄膜被压破的几率将明显上升. 图 3 给出了铝制薄膜承受气压应变与应力的有限元仿真图.



(a) 应力分布情况图



(b) 应变分布情况图

图3 有限元仿真图

图 3 选用了口径为 $50\mu\text{m}$ 的微通道口, 厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 的透射阳极作为参考. $0.5\mu\text{m}$ 铝制薄膜的电子渡越能力评价图如图 4 所示.

4.2 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、四象限等结构. 本文为了方便验证该新型器件的理论可行

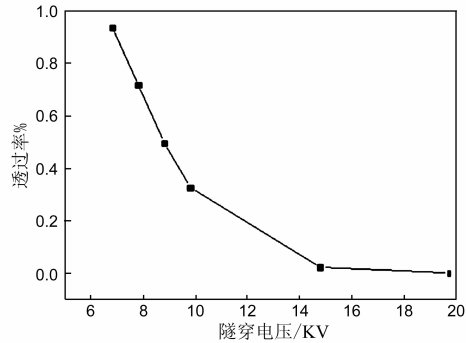


图4 渡越能力评价图

性, 采用了较为简单且易于分析的四象限结构. 本文实验的分割沟道间距为 $25\mu\text{m}$. 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 . 不同阳极之间所产生的电流由于正比于分布其表面的电子云功率, 其 X 方向的细分质心表达式为:

$$\sigma_x = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_d + I_b + I_c} \quad (12)$$

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率, 即固有精度 Δ 等于最小成像的直径 d_A 的一半与光学天线焦距 f 的商. 然而, 光轴定位精度由两部分组成, 第一部分是固有精度 Δ , 第二部分是检测细分精度 σ , 即 $\theta = \Delta * \sigma$.

当考虑噪声 I_x 对每个象限影响时, 噪声电子云引入的误差表达式为:

$$\Delta\sigma_x = \frac{4I_x(I_a + I_d - I_b - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c)(I_a + I_d - I_b - I_c + 4I_x)} \quad (13)$$

噪声电子云 I_x 引入的干扰主要和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 0.12mm , 器件前端的光学系统焦距为 150mm , 即该器件的固有分辨能力为 $800\mu\text{rad}$. 在上述假设的基础上, 图 5 给出了噪声电子云对检测精度的影响以及不同偏差角度检测误差.

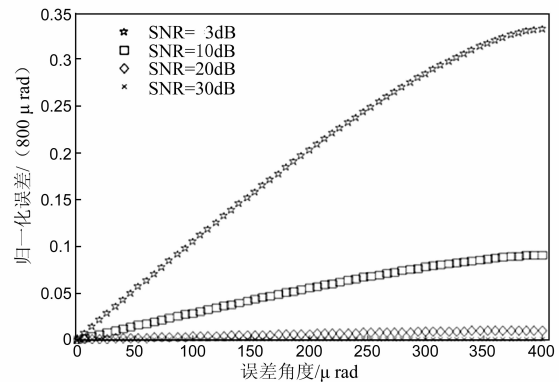


图5 光轴偏移量引入误差变化趋势

5 分析与验证

为了验证复合式波导阳极二次倍增的可行性,本文开展了以下验证性实验.首先由于高速脉冲引入的高频分量较多,在透射阳极与位敏阳极信号提取时,交流与直流之间的阻抗匹配很难一致,为此需要采用直流紫外光源获得最佳且统一的信号提取标准.因为紫外 LED 的连续输出能力极弱,所以这里选用美国 BHK 公司生产的冷阴极紫外灯作为外部触发光源并通过管流控制发光功率.在该光源前端近贴放置直径为 0.6mm 的小孔光阑,然后利用焦距为 60mm,口径为 40mm 的石英双凸透镜模拟光通信的准直系统,实现对紫外光完成准直与扩束.随后通过相同的石英双凸透镜模拟光学接收天线将艾里斑耦合至真空系统中的金阴极表面中心区域,即将直径为 0.6mm 的紫外光斑等比例投影到阴极表面,其固有分辨率约 5mrad.本文试制的器件参数如下,光电阴极 b 为金阴极,d 选用有效口径为 18.4mm 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,其透射阳极膜层厚度为 $0.5\mu\text{m}$,位敏阳极膜层厚度为 $2\mu\text{m}$,中心分割沟道间距为 $25\mu\text{m}$,其中 d 的板压为 1000V,g 与 h 之间压差为 700V.由公式 7 可知,这两部分的理论分辨能力极高对分辨率影响不大.为了简化器件特性测试,实验并未采用二节所述的近贴式结构,而是仅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,本文设计 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,可以在 b 与 d 之间压差为 500V,进而起到加速渡越作用.由文献^[10]与公式(5)可知金阴极的电子逸出初始最大动能约 2.26eV.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地衍射,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 5mm,d 与 g 之间压差为 7000V,由于本文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 65eV.根据第 3 节所述真空电子倍增系统的光学传递模型可知,该器件的理论调制传递函数如图 6 所示.

当 d 与 g 之间压差由 7000V 每隔 500V 依次逐渐降低,透射阳极的隧穿效率与位敏阳极提取到的电流相应变化趋势如图 7 所示.

可见当隧穿电压下降时,透射阳极隧穿电子量将

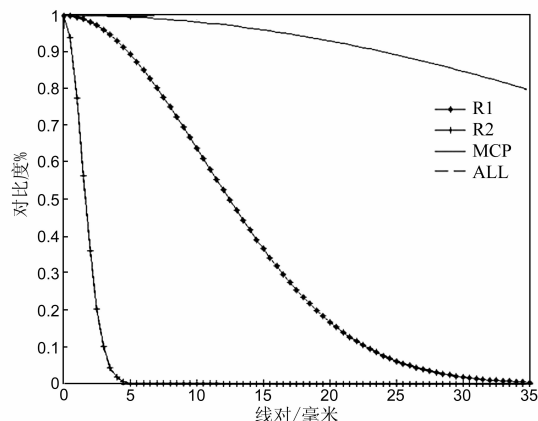


图6 光学调制函数

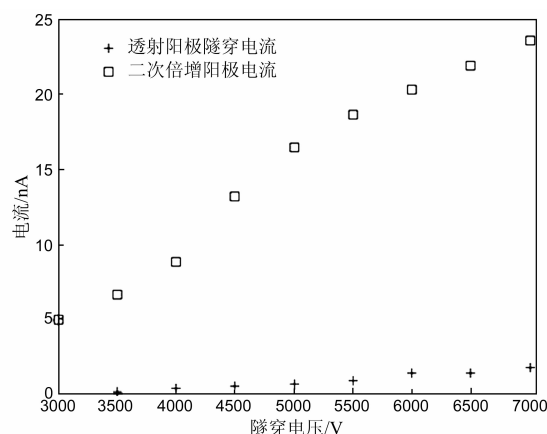


图7 复合阳极电流变化趋势

随之大幅下降,进而导致位敏阳极输入信噪比也将大幅随之下降,最终导致薄膜散射、暗电流等噪声影响将越发明显,具体影响效果如图 5 所示.反之随着隧穿电压升高,第二块微通道板的饱和趋势将越发突显出来,位敏阳极的细分精度下降.可见该复合式波导阳极在该光照条件下的最佳隧穿电压出现在 5000 ~ 4500V 之间(这部分电流变化梯度最为明显,微通道板的增益特性与信噪比均可达到最佳状态).可见探索复合式波导阳极自适应隧穿门控技术将是在复杂光场环境中实现精准光轴定位的前提.以 5000V 隧穿电压为例,透射阳极读出电流约 9.7nA 并约有 6% 的电子完成了隧穿.四象限读出电流分别约为 6.15nA、3.35nA、2.45nA、4.55nA,即光轴 X 方向脱靶量约为 1.485mrad.由此可见,复合式波导阳极的“二次倍增”可行性得到了较好证明.

6 结论与展望

本文首次提出了一种适用于空间激光通信的微通道光电倍增管;通过改用复合波导阳极进而使该器件具备射频信号检测能力与入射光轴精确定位能力,并对这种新型器件设计方法展开研究并建模.首先分析

了真空器件设计参数与成像能力之间的对比关系,然后又从器件模型的角度分析了高速信号检测功能对入射光轴精确定位功能的约束情况,最后又给出了相应电子光学系统设计方法与修正方法,并在真空炉中进行该新型器件的验证性实验。

虽然这类真空器件与目前的主流半导体器件相比互有伯仲,但是这种新型的专用器件或许将对运动平台的空间光通信系统总体设计带来一种全新的设计思路. 为未来全面实现轻小型化的动态空间光通信奠定器件基础。

参考文献

- [1] 姜会林,佟首峰,等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010. 23-24.
Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al. The Technologies and System of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2010. 23-24. (in Chinese)
- [2] Mu Yining, Li Ping, Jiang Huilin. Pulse state interval modulation and open loop communication experiment in the hostile environments[J]. Optik, 2014, 125(5): 2466-2471.
- [3] 母一宁,刘泉,于林韬,李平. 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.
Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao, Li Ping. Application of Hartmann technique in sequence spot detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2197-2204. (in Chinese)
- [4] Devaney N, Dalimier E, Thomas F, et al. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: a comparison of the performance of various deformable mirrors[J]. Appl Opt, 2008, 47: 6550-6562.
- [5] Kazaura, KOMae K, et al. Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing-based predictions[J]. Optics Express, 2006, 14: 4958-4968.
- [6] 任斌,佟首峰,宋延嵩,陈安松. 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.
Ren Bin, Tong Shoufeng, Song Yansong, Chen Ansong. Research on the driving technique of high precision and speed piezo-electric ceram IC transducer in fine tracking system of air laser communication[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 420-425. (in Chinese)
- [7] 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.
Chen Yuyu. Research on property of MCP-PMT's pulse output linearity[J]. Nuclear Physics Review, 2014, 31(2): 177-182. (in Chinese)
- [8] 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.
Wu Cuiqin, Zhang Xiangdong, Wang Xingzhi, et al. MCP-PMT position-sensitive-device module based on ir-upconversion[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1096-1100. (in Chinese)
- [9] 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.
He Lingping, Ni Qiliang, Li Ming, 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): 2699-27004. (in Chinese)
- [10] 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.
Yuan Zheng, Liu shenye, Cao Zhurong, et al. Selective photoemission of Au photocathode[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4967-4971. (in Chinese)

作者简介



母一宁 男,1985 年生于吉林长春. 长春理工大学电子科学与技术系讲师,硕士生导师. 研究方向为空间光通信与光电子器件.



李野(通信作者) 男,1969 年生于吉林白城. 长春理工大学电子科学与技术系研究员,博士生导师. 研究方向为物理电子学.
E-mail: der040303020@163.com