

引用格式: LI Xiao-feng, CHANG Le, ZENG Jin-neng, *et al.* Study on Resolution Improvement of Microchannel Plate[J].  
*Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1223002  
李晓峰,常乐,曾进能,等.微通道板分辨力提高研究[J].光子学报,2019,**48**(12):1223002

# 微通道板分辨力提高研究

李晓峰,常乐,曾进能,李廷涛,赵恒,汤文梅

(北方夜视技术股份有限公司,昆明 650217)

**摘 要:**在微通道板输出端镀制一层逸出功更高的金属膜以覆盖原有的镍铬电极,从而减小微通道板输出电子的动能以及在荧光屏上的弥散,提高微通道板的分辨力.实验结果表明,在微通道板的输出端镀制一层 20 nm 厚的银层(逸出功为 4.3 eV)后,微光像增强器的分辨力从 60 lp/mm 提高到 64 lp/mm,提高了 6.6%;而镀制一层 20 nm 厚的铂层(逸出功为 6.4 eV)后,超二代像增强器的分辨力从 60 lp/mm 提高到 68 lp/mm,提高 13%.在分辨力提高的同时,微通道板的增益会下降,镀银和镀铂后的微通道板,增益分别下降到原有值的 74%和 33%.金属膜的逸出功越高,分辨力提高的百分比越高,增益下降的百分比也越高.所以采用该方法来提高微通道板分辨力时,需要采用高增益的微通道板,从而使微通道板的增益下降以后仍能满足使用要求.

**关键词:**微通道板;像增强器;分辨力;逸出功;二次电子发射系数;原子层沉积

中图分类号:O462.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20194812.1223002

## Study on Resolution Improvement of Microchannel Plate

LI Xiao-feng, CHANG Le, ZENG Jin-neng, LI Ting-tao, ZHAO Heng, TANG Wen-mei

(North Night Vision Technology Co.,Ltd, Kunming 650217, China)

**Abstract:** A metal film with higher work function is deposited at the output electrode of the microchannel plate to cover the original nickel-chromium electrode, which further reduces the kinetic energy of the output electrons of the microchannel plate and the dispersion of output electrons on the phosphor screen, thus improving the resolution of the microchannel plate. The experiment results show that the resolution of the image intensifier increases by 6.6% from 60 lp/mm to 64 lp/mm when a 20 nm thick silver layer with work function of 4.3 eV is deposited on the output electrode of the microchannel plate, while the resolution of the image intensifier increases by 13% from 60 lp/mm to 68 lp/mm when a 20 nm thick platinum layer with work function of 6.4 eV is deposited on the output electrode of the microchannel plate. At the same time, the gain of microchannel plate decreases. For silver plated microchannel plate and platinum plated microchannel plate, the gain decreases to 74% and 33% of the original value respectively. The higher the work function of metal film, the higher the percentage of resolution improvement, and the higher the percentage of gain decreases. Therefore, when the proposed method is used to improve the resolution of microchannel plate, it is necessary to use the microchannel plate with higher gain, so as to make up the influence caused by the decrease of microchannel plate gain.

**Key words:** Microchannel plate; Image intensifier; Resolution; Work function; Secondary electron emission yield; Atomic layer deposition

**OCIS Codes:** 230.2090; 040.3780; 040.5250; 040.5160; 060.2350

基金项目:国家自然科学基金(No.11535014)

第一作者:李晓峰(1963-),男,正高级工程师,博士,主要研究方向为微光夜视技术. Email:984118295@qq.com

收稿日期:2019-07-03;录用日期:2019-08-05

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

## 0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)<sup>[1-3]</sup>是一种大面阵的通道电子倍增器,广泛应用于微光像增强器中.在微光像增强器中,光电阴极所发射的电子图像在阴极电场作用下进入 MCP,在 MCP 中得到增强,之后在其输出端输出.由于 MCP 各通道的增益相同,因此电子图像在 MCP 中的传输过程中,相当于将 MCP 输入端上的电子图像经过增强后映射在输出端面上.微光像增强器(简称像增强器或像管)是成像器件<sup>[4-6]</sup>,电子图像在 MCP 通道的传输过程中,除要求强度得到增强外,还要求对比度不降低,即需要分辨力足够高. MCP 的每一根通道相当于一个像素,因此要提高其分辨力,最直接的途径就是进一步减小 MCP 的通道孔径.但孔径的减小,意味着制造难度的增加以及制造成本的上升.另外, MCP 孔径的减小并不是无限的.因为 MCP 的孔径越小,在保证其最佳长径比以及最大开口比的前提下, MCP 的厚度越薄,同时也意味着 MCP 的机械强度越低,导致像管抗机械冲击和振动的能力降低,因而会限制像管的使用范围.因此在 MCP 孔径一定的条件下,通过采取一些行之有效的方法来提高 MCP 的分辨力更具现实意义.关于这方面研究很多,其中也包括了 MCP 的末端损失技术<sup>[7-11]</sup>.该项技术的核心是加深 MCP 输出电极的深度,由此来减小 MCP 输出电子的散射角,从而提高 MCP 的分辨力.由于输出电极过深会影响到 MCP 的增益,因此一直以来, MCP 输出电极的深度一般控制在通道孔径的 2.5 倍,这样既兼顾了 MCP 分辨力的要求,同时也兼顾了 MCP 增益的要求.然而随着微光夜视技术的发展,对像增强器的分辨力提出了更高的要求,而像增强器的分辨力很大程度上取决于 MCP,所以有必要进一步研究提高 MCP 分辨力的方法.本文通过在微通道板输出端镀制一层金属膜来提高其分辨力.

## 1 MCP 分辨力提高机理

MCP 由无数根单通道电子倍增器组成.每一根通道电子倍增器的结构都相同,均包括通道孔、通道壁、输入电极和输出电极.输入电极和输出电极之间施加有一定的直流工作电压,其作用是在通道电子倍增器的通道内壁建立起从低到高的电场分布,使得电子在通道内运动并有足够的动能轰击通道内壁产生二次电子.另外所施加的工作电压会产生带电流,给通道内壁的电子发射补充电子.从每根通道输入的电子,经过通道内的多次二次电子倍增,从输出端输出时,电子数量得到了倍增,见图 1.

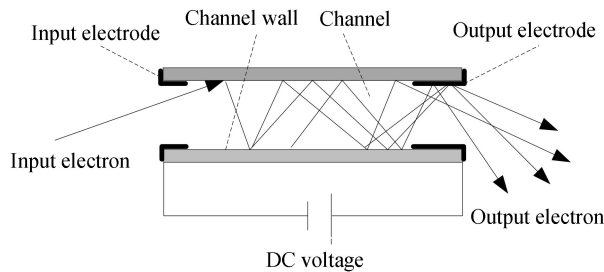


图 1 MCP 通道二次电子倍增示意图

Fig.1 Schematic diagram of secondary electron multiplication in channel of MCP

MCP 输出电子的能量有高有低,服从一定的分布<sup>[12]</sup>,见图 2,图中,纵坐标  $N(E)$  表示电子数量(非定量值),横坐标表示电子能量.从图 2 中可以看出,该分布(曲线 C)明显存在两个峰,前一个峰的能量较低,但峰值较高且半峰宽较窄,而后一个峰的能量较高,但峰值较低且半峰宽较宽,因此该分布(曲线 C)可以看作两个分布的合成,即 A 分布(曲线 A)和 B 分布(曲线 B)的合成.

A 分布对应的电子称为 A 电子,来源于 MCP 的输出电极;B 分布对应的电子称为 B 电子,来源于 MCP 的通道内壁,见图 3. A 电子的动能低于 B 电子的动能. A 电子的动能较低,意味着速度较低,不仅轴向的速度较低,径向的速度也较低.所以在运动过程中,偏离通道轴的角度较小,弥散半径较小,可以获得较高的分辨力.来源于 MCP 输出电极的电子能量越低,所获得的分辨力越高,因此可以通过降低 MCP 输出电子的能量来进一步提高 MCP 的分辨力.

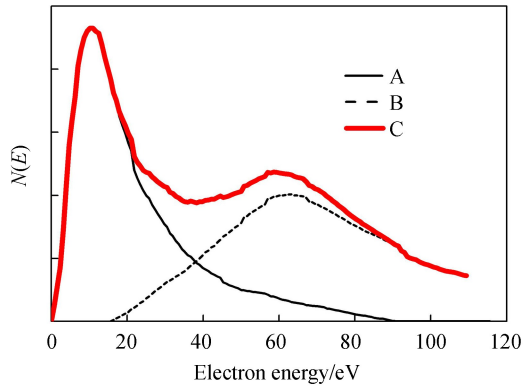


图 2 MCP 输出电子能量分布  
Fig.2 Energy distribution of output electrons from MCP

来源于 MCP 输出电极的电子主要为二次电子,而二次电子的能量在入射电子能量一定的条件下与电极材料的逸出功有关.逸出功越高,二次电子的能量越小.MCP 的电极材料一般采用镍铬合金,这是因为 MCP 由铅玻璃制成,镍铬合金与其粘附性(牢固性)较好,另外镍铬合金的电阻等其他性能也满足要求.虽然 MCP 的输出电极采用镍铬合金,其逸出功是一定的,但可以在 MCP 输出电极上再蒸镀一层逸出功更高的金属膜层来覆盖原来的电极,见图 4.这样就可以提高 MCP 输出电极的逸出功,获得动能更低的输出电子,提高 MCP 的分辨力.

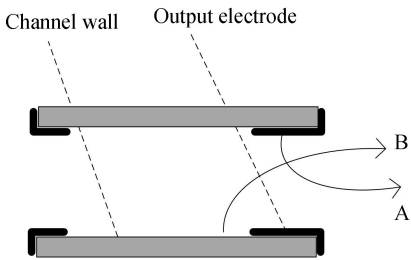


图 3 MCP 输出电子示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the output electron from MCP

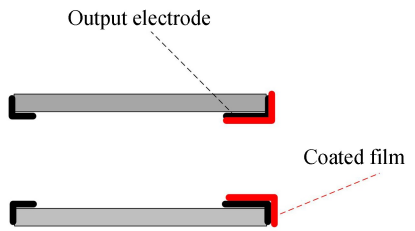


图 4 MCP 输出电极镀膜示意图  
Fig.4 Schematic diagram of output electrode with coated film

## 2 试验过程及数据分析

### 2.1 试验条件和方法

为了验证所述提高 MCP 分辨力方法的可行性,选择了银(Ag)和铂(Pt)两种金属进行试验.之所以选择这两种金属,是因为银或铂与镍铬合金电极粘附较好,同时也不会影响像增强器的性能,另外其逸出功也较高.银的逸出功为 4.3 eV,铂的逸出功为 6.4 eV.两种材料逸出功一低一高,有利于进行分辨力比较.试验所用的 MCP 为  $\Phi 25-6/8$  型号的 MCP,其外径为 25 mm,厚度为 0.31 mm,孔径为 6  $\mu\text{m}$ ,斜切角为  $6^\circ$ ,开口比为 65%,输入和输出电极材料为镍铬合金,输入电极深度约为  $0.5d$ ,输出电极深度约为  $2.5d$ ,其中  $d$  为 MCP 的孔径.镀制银膜或铂膜的方法与镀制镍铬电极的方法类似,深度为  $2.5d$ ,即刚好覆盖 MCP 原有的镍铬输出电极,厚度约为 20 nm.在镀制银膜或铂膜时,在 MCP 下方放

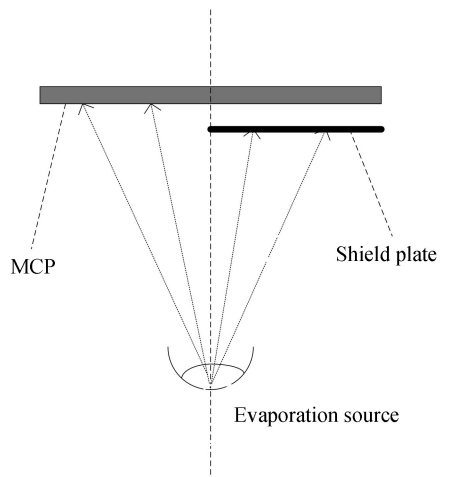


图 5 MCP 输出电极膜层镀制方法示意图  
Fig.5 Schematic diagram of MCP in evaporation

置一片挡板,将 MCP 输出端面积遮挡一半,见图 5.放置挡板之后,MCP 的输出端只有一半的面积上能够蒸镀上银膜或铂膜,另一半面积上仍然保留原有的镍铬电极膜.将 MCP 均分为两部分之后,就可以在同一只像管中比较同一片 MCP 在镀膜和不镀膜条件下的分辨力变化情况.

为了比较 MCP 输出端镀膜前后的分辨力变化,将其装入像增强器中进行试验.试验样品共 8 支,其中镀银的样品 4 支,镀铂的样品 4 支.像增强器的输入直径  $\Phi$  为 18 mm,输入窗为玻璃窗,输出窗为光纤面板(直径为  $4\ \mu\text{m}$ ).光电阴极为多碱阴极,阴极前近贴聚焦距离为 0.15 mm,聚焦电压为 200 V;荧光屏后近贴聚焦距离为 0.5 mm,聚焦电压为 6 kV.试制过程中,试验样品的制作工艺与正常像增强器的制作工艺完全相同,制作完成的试验样品也是完整的像增强器,简称试验管.

## 2.2 测试过程及数据分析

试验管制作完成以后,首先对其荧光屏亮度均匀性进行检查.检查时,对试验管施加正常工作电压,同时施加照射光.照射光的色温为 2 856 K,照度约为  $5 \times 10^{-4}\ \text{lx}$ .采用 10 倍显微镜观察荧光屏并通过调节 MCP 电压来调整荧光屏亮度,使其达到人眼所需的舒适亮度.正常情况下,像增强器因其光电阴极、MCP 和荧光屏都是均匀的,所以其荧光屏亮度也是均匀的.但当检查试验管荧光屏时,发现其荧光屏亮度并不均匀,明显分为亮暗两个区,即一半面积较亮,而另一半面积较暗,并且 8 支试验管的现象都相同,见图 6.与 MCP 在试验管中的安装位置比较后发现,荧光屏上的亮区和暗区分别对应于 MCP 的非镀膜区和镀膜区.

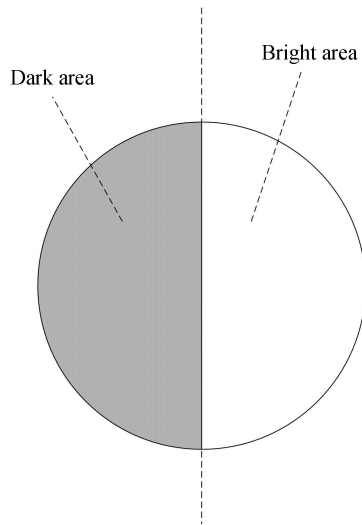


图 6 荧光屏亮度分布示意图

Fig.6 Schematic diagram of brightness in phosphor screen

为了比较试验管亮区和暗区的分辨力,需要分别对亮区和暗区的分辨力进行测量.测量条件与正常像增强器的测量条件相同,即在增益为  $10\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$  的条件下进行测量.增益的测量方法是用光度计测量荧光屏的亮度,用照度计测量阴极的照度,亮度与照度之比即为增益.因为试验管荧光屏亮区和暗区的增益不一样,所以在进行分辨力测量之前,需要先测量出试验管亮区和暗区增益为  $10\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$  条件下所对应的 MCP 工作电压.测量方法与增益的测量方法类似,区别是对亮区和暗区分别进行测量,同时在测量过程中需要变化 MCP 的工作电压.测量亮区 MCP 工作电压时,需将光度计的光轴移动到亮区的中心区,并且调节光度计的视场角,使光度计的测量视场限制在荧光屏的亮区范围内.在测量过程中,需要不断变化 MCP 的工作电压,使光度计测量的亮度达到试验管亮区增益为  $10\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$  时所需的亮度为止,此时的电压即为对应试验管亮区增益为  $10\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$  条件下的 MCP 工作电压.同理测量暗区 MCP 工作电压时也一样,需将光度计的中心轴移动到暗区的中心区,然后调节光度计的视场角,使光度计的测量视场限制在荧光屏的暗区范围内.在试验管亮区和暗区 MCP 的工作电压测量完成以后,即可进行分辨力的测量.先移动分辨力靶板使其成像在荧光屏亮区的中心位置上,然后调节 MCP 的电压到其相应的工作电压,之后进行测量.亮区分辨力测量完成以后,再移动分辨力靶板使其成像在荧光屏暗区的中心位置上,再次调节 MCP 的电压到其相应的工作电压,然后再进行测量.表 1 是 8 支试验管 MCP 亮区和暗区在增益为

10 000 cd · m<sup>-2</sup> · lx<sup>-1</sup>条件下的 MCP 工作电压以及在此电压下所测得的分辨力数据.其中, $G$  为试验管亮区或暗区的增益, $V_{M1}$  为亮区对应 10 000 cd · m<sup>-2</sup> · lx<sup>-1</sup> 增益时的 MCP 工作电压, $V_{M2}$  为暗区对应 10 000 cd · m<sup>-2</sup> · lx<sup>-1</sup> 增益时的工作电压, $R_1$  为亮区的分辨力, $R_2$  为暗区的分辨力.

表 1 MCP 镀膜区和非镀膜区的分辨力  
Table 1 The resolution of MCP in coated area and non-coated area

Sample	Film	$G/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1})$	$V_{M1}/V$	$V_{M2}/V$	$R_1/(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	$R_2/(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$
7058 #	Ag	10 000	798	820	60	64
7059 #	Ag	10 000	773	804	60	64
7046 #	Ag	10 000	851	870	60	64
7025 #	Ag	10 000	771	793	60	64
7018 #	Pt	10 000	795	899	60	68
7037 #	Pt	10 000	821	917	60	68
7052 #	Pt	10 000	861	956	60	68
7067 #	Pt	10 000	798	916	60	68

8 支试验管中,亮区的分辨力相同,均为 60 lp/mm.这是因为在亮区,MCP 为非镀膜区,同时又由于 MCP、近贴聚焦距离、荧光屏等均相同,因此分辨力也相同.但在暗区部分,MCP 为镀膜区,正如理论所预计的那样,分辨力普遍相对于非镀膜区均有所提高.前 4 支镀银的试验管,暗区的分辨力均达到了 64 lp/mm,较亮区的分辨力提高了 4 lp/mm,平均提高了 6.6%.而对于后 4 支镀铂的试验管,其 MCP 暗区的分辨力达到了 68 lp/mm,较亮区的分辨力提高了 8 lp/mm,平均提高了 13%.镀铂分辨力提高的百分比约为镀银提高百分比的 2 倍.试验管分辨力的提高意味着微通道板分辨力的提高.所以在 MCP 的输出端蒸镀一层逸出功较高的金属材料以后,可以提高 MCP 分辨力.另外逸出功越高,分辨力提高的百分比越大.

然而在 MCP 输出端蒸镀高逸出功的金属膜层以后,在分辨力提高的同时,MCP 的增益降低了.表 2 是 8 支试验管的增益测试数据,其中  $S$  为阴极灵敏度, $\eta$  为荧光屏发光效率, $G_1$  和  $G_2$  分别试验管亮区和暗区的增益, $G_{M1}$  和  $G_{M2}$  分别表示亮区和暗区的 MCP 增益. $S$ 、 $\eta$ 、 $G_1$  和  $G_2$  (MCP 电压为 800 V) 为实测值, $G_{M1}$  和  $G_{M2}$  为理论计算值,计算公式为

$$G_M = \frac{G \cdot \pi}{S \cdot \eta \cdot V} \quad (1)$$

式中, $G_M$  为 MCP 的增益, $V$  为荧光屏电压.

表 2 MCP 镀膜区和非镀膜区的增益  
Table 2 The gain of MCP in the coated area and non-coated area

Sample	Film	$S/(\mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1})$	$\eta/(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	$G_1/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1})$	$G_2/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1})$	$G_{M1}$	$G_{M2}$
7058 #	Ag	886	13.9	11 975	8 884	508	377
7059 #	Ag	771	15.2	17 305	11 335	772	506
7046 #	Ag	829	14.5	5 721	4 335	249	188
7025 #	Ag	900	16.7	18 336	15 315	638	533
7018 #	Pt	834	15.5	18 150	5 716	734	231
7037 #	Pt	830	14.8	13 528	5 376	576	229
7052 #	Pt	865	15.3	9 541	2 671	377	105
7067 #	Pt	817	15.7	11 743	4 138	479	168

从表 2 中可以看出,无论 MCP 所镀膜层材料是银还是铂,MCP 镀膜区的增益均低于非镀膜区的增益.4 支 MCP 镀银的试验管,镀膜区 MCP 增益分别是未镀膜区 MCP 增益的 74%、65%、75% 和 83%,平均为 74%.而 4 支 MCP 镀铂的试验管,其镀膜区 MCP 增益分别是未镀膜区 MCP 增益的 31%、39%、27% 和 35%,平均仅仅为 33%.对比银和铂两种膜层对 MCP 增益降低的影响,可以看出铂的影响更大,增益下降的比例是银的 2 倍以上.MCP 增益下降的原因是在 MCP 输出电极上镀制高逸出功的银或铂以后,提高了原有镍铬电极的逸出功,降低了其二次电子发射系数<sup>[13]</sup>,由此造成了 MCP 的增益下降.同时逸出功越高,MCP 增益也越低.

## 2.3 讨论

当在 MCP 的输出端镀制一层高逸出功的金属膜覆盖原有的输出镍铬电极之后, 会提高 MCP 的分辨力, 但同时也会降低 MCP 的增益. MCP 增益降低以后, 又会影响到像管的增益. 目前像增强器的增益要求为  $15\ 000\sim 25\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ , 因此要求 MCP 的增益在  $500\sim 1\ 000$  之间. 但从表 2 可以看出, 如果采用镀银的方法来提高 MCP 的分辨力, 4 支试验管中, 仅有 2 支的 MCP 增益达到要求, 即有约 50% 的 MCP 增益达不到要求; 而如果采用镀铂的方法来提高 MCP 的分辨力, 4 支试验管中, 没有 1 支的 MCP 增益达到要求, 即 100% 的 MCP 增益达不到要求, 所以本方法在实际应用中需要采用高增益的 MCP, 这样才能保证在提高 MCP 分辨力的同时 MCP 增益也能满足要求. 目前高增益的 MCP, 即原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) MCP 已经研制成功<sup>[14-16]</sup>. 由于该种 MCP 采用了 ALD 技术在 MCP 的通道内壁制作了一层高二次电子发射系数的材料, 因此大大提高了 MCP 的增益, 其增益与传统的 MCP 相比较 3~5 倍以上, 这样就可以解决因提高分辨力所带来的 MCP 增益降低以至达不到要求的问题.

## 3 结论

在 MCP 的输出端蒸镀一层逸出功高于镍铬合金的金属层覆盖原有镍铬电极后, 其分辨力会得到提高, 并且所镀制材料的逸出功越高, 分辨力提高的程度越大. 在 MCP 分辨力提高的同时, MCP 的增益会降低, 并且逸出功越高, 增益下降的程度也越大. 因此分辨力的提高与增益的下降是一对矛盾. 为了使 MCP 在增益下降之后仍然能满足像管的使用要求, 需要采用高增益的 MCP, 如原子层沉积 MCP, 这样下降以后的增益仍然能满足像管的使用要求, 所以本文所提出的提高 MCP 分辨力的方法具有一定的实用性.

## 参考文献

- [1] SHYMANSKA A. Numerical analysis of electron optical system with microchannel plate[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2011, **10**(3): 57-60.
- [2] GAO Xiu-min, CAI Chun-ping. Second electron emission coefficients of micro-channel plate glass[J]. *Journal of Applied Optics*, 1998, **19**(4): 9-18.
- [3] PAN Jing-sheng, SHAO Ai-fei, SUN Jian-ning, *et al.* Analysis of the effect of ion feedback of MCP on performance upgrade of image intensifier and exploration of improvement ways[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(4): 327-332.  
潘京生, 邵爱飞, 孙建宁, 等. 微通道板的离子反馈对像增强器性能升级的影响分析及改进途径探究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(4): 327-332.
- [4] BAI Xiao-feng, YIN Lei, CHENG Hong-chang, *et al.* Research on dynamic range testing for image intensifier with microchannel plate[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(5): 21-23.  
拜晓峰, 尹雷, 程宏昌, 等. 微通道板像增强器动态范围测试技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2012, **10**(5): 21-23.
- [5] 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.  
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.
- [6] ZHOU Li-wei. On quality factor of low light level image intensifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 331-337.  
周立伟. 关于微光像增强器的品质因数[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 331-337.
- [7] WU Mei-juan, REN Ling, CHANG Ben-kang, *et al.* Simulation of image intensifier resolution in Monte Carlo method[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, **32**(9): 798-801.  
武梅娟, 任玲, 常本康, 等. 运用蒙特卡罗方法分析像增强器分辨率[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, **32**(9): 798-801.
- [8] XIANG Shi-ming. Study on the theoretical limit of resolution of double-proximity focusing low-light-level image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(3): 351-353.  
向世明. 双近贴聚焦微光像增强器分辨力理论极限问题研究[J]. *应用光学* 2008, **29**(3): 351-353.
- [9] WU Mei-juan. Effect of MCP end electron reflection on resolution of image intensifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.  
武梅娟. MCP 端面电子反射对像增强器分辨力的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [10] CHENG Yao-jin, SHI Feng, GUO Hui, *et al.* Study on the influence of MCP parameters on the resolution of LLL image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(2): 292-296.  
程耀进, 石峰, 郭晖, 等. MCP 参数对微光像增强器分辨力影响研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(2): 292-296.
- [11] SHI Ji-fang, YANG Bin, HAN Zhan-suo, *et al.* Objective evaluation for low-light-level image intensifier based on dual-model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(9): 2260-2265.  
史继芳, 杨斌, 韩占锁, 等. 基于双重模型的微光像增强器分辨力[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(9): 2260-2265.

- [12] HOENDERKEN T H, HAGEN C W, BARTH J E, *et al.* Influence of the microchannel plate and anode gap parameters on the spatial resolution of an image intensifier[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2001, **19**(3): 843-850.
- [13] LI Chen, LUO Chong-tai, WANG Duo-shu, *et al.* Preparation methods of MgO thin films with secondary electron emission[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2009, **15**(4): 187-192.  
李晨,罗崇泰,王多书,等.MgO 二次电子发射功能薄膜的制备方法[J].真空与低温,2009,**15**(4):187-192.
- [14] LU Nian-hua, YANG Yi-gang, LV Jing-wen, *et al.* Neutron detector design based on ALD coated MCP[J]. *Physics Procedia*, 2012, **26**: 110-115.
- [15] HAO Zi-heng, LI Xiang-xin, ZHANG Ni, *et al.* Preparation of high gain secondary electron emission layer for microchannel plate [J].*Infrared Technology*, 2018, **40**(11): 1077-1080.  
郝子恒,李相鑫,张妮,等.微通道板高增益二次电子发射层制备研究[J].红外技术,2018,**40**(11): 1077-1080.
- [16] YAN Bao-jun, LIU Shu-lin, HENG Yue-kun, *et al.* Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J].*Nanoscale Research Letters*, 2015, **10** (1): 1-11.