

文章编号:1002-2082(2010)02-0292-05

MCP 参数对微光像增强器分辨力影响研究

程耀进¹, 石 峰¹, 郭 晖¹, 朱宇峰¹, 袁晓曼²

(1. 西安应用光学研究所 微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为了全面分析微通道板(MCP)参数对微光像增强器分辨力的影响, 利用电子散射理论分析了MCP输出电子横向散射和MCP非开口面的电子散射情况, 得到了MCP通道间距、输出电极结构和开口面积比等参数对微光像增强器分辨力的影响。分析结果指出: 通过减小通道间距、采用MCP输出面镀多层电极或增加MCP输出端电极深度实现减小MCP输出电子横向扩散、增加开口面积比等, 提高整个微光像增强器的分辨力。试验证明该方法有助于提高微光像增强器分辨力。

关键词: 微通道板; 微光像增强器; 分辨力

中图分类号: TN144

文献标志码: A

Effect of MCP parameters on resolution of image intensifier

CHENG Yao-jin, SHI Feng, GUO Hui, ZHU Yu-feng, Yuan Xiao-man

(1. Key Laboratory for Low-light-level Technology of COSTIND, Xi'an Institute of Applied Optics,

Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The performance of microchannel plate (MCP) is very important for the resolution of image intensifier. In order to analyze the impact of MCP parameters on the resolution of image intensifier, the transverse scattering of electrons from the output surface of MCP and the elastic scattering of electrons from the non-open surface of MCP were investigated by using electron scattering theory. The results show that the resolution of image intensifier can be improved by reducing channel distance, using multilayer electrodes, increasing the depth of output electrode and increasing open area ratio.

Key words: microchannel plate; image intensifier; resolution

引言

微光像增强器是一种能够把微弱光图像增强的光电器件。该技术增加了人类活动的时间、空间范围及获取信息和图像的能力, 在军事、工业、农业、科学研究、医药卫生等领域有着广泛的应用^[1]。微光像增强器是由光电阴极、微通道板(MCP)和荧光屏3大部分组成的光电真空器件。其工作原理是将景物反射的微弱可见光聚集到光电阴极上, 光电阴极受激向外发射电子, 在这一过程中, 可实现

把景物的光强分布图像变成与之对应的电子密度分布图像。MCP把光电阴极的电子密度分布图像成千上万倍地增强, 所谓的“微光图像增强”就是在这过程中实现的; 最后用经过倍增的大量电子轰击荧光屏, 实现电子图像——光子图像的转变, 得到增强微光图像供人眼观察。微光夜视装备具有成像清晰、体积小、重量轻、成本低等优点^[2]。微光像增强器的成像质量取决于场景的照度、对比度、动态范围和光谱辐射等特性, 但当照度高于一定条件

收稿日期: 2009-09-18; 修回日期: 2009-10-25

作者简介: 程耀进(1974—), 男, 陕西蒲城人, 西安应用光学研究所在读博士研究生, 主要从事微光像增强器结构和分辨力研究工作。E-mail: yaojin_cheng@sina.com

时成像质量取决于成像器件特性。分辨力是微光像增强器的一项重要指标,它反映了器件分辨物体细节的能力,即能不能看清的问题^[3]。影响像增强器分辨力的因素较多,MCP 的性能参数对于像增强器分辨力的影响较大,本文通过分析讨论 MCP 各种参数对像增强器的分辨力的影响,提出提高分辨力的技术途径。

1 MCP 简介

微通道板是于20世纪60年代末开发成功的一种简单紧凑的电子倍增器件,可以探测带电粒子、电子、X射线和UV光子,具有低功耗、自饱和、高速探测和低噪声等优点,并以多种形式应用于各类探测器中。

微通道板的形状如一聚集了上百万个细微的平行空心玻璃管的薄圆片,每一空心管通道的作用犹如一个连续的打拿极倍增器,薄片两端面镀

有镍铬金属薄膜。外环为一圈镀有镍铬金属薄膜但没有通道的实体边,用于提供良好的端面接触以便施加电压。微通道板必须工作于真空环境中,因其工作机理是利用通道内表层产生二次电子。在薄片两面加上电压,当电子或其他粒子以一定能量撞击低电势输入面的通道内壁时产生二次电子,二次电子在场强的作用下沿着通道加速前进。重复多次碰撞过程,最后在高电势的输出端面产生大量的电子,这个过程被形象地比喻为“电子雪崩”,如图1所示。这个倍增器件的增益取决于施加的电压值、长径比和通道内壁材料的二次电子发射特性。通过调节微通道板端面间的电压,可以控制这个倍增器的增益。由于增益取决于长径比而非通道的绝对尺寸,所以微通道板的尺寸及孔径可以做得很小而不改变其基本性能。在提供信号倍增的同时,还可以获得良好的空间分辨能力,微通道板主要应用于微光像增强器^[4]。

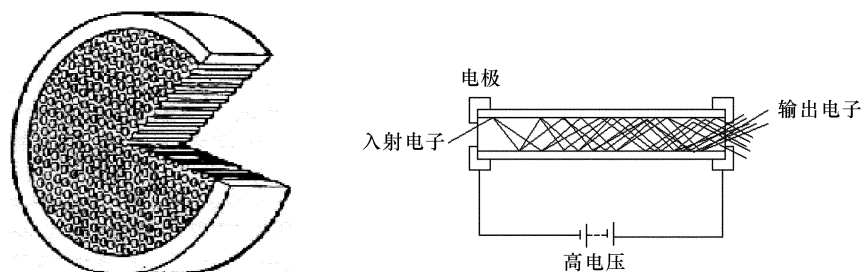


图1 微通道板工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle for MCP

2 MCP 参数对微光像增强器 MTF 和分辨力影响分析

2.1 MCP 的通道间距 D

MCP 分辨率定义为每毫米内通道阵列的阵列数。MCP 的 MTF 和分辨力的计算公式^[3]分别为 $MTF_{MCP}(f) = |J_1(2\pi fd)/\pi fd|$ 和 $R_{MCP} = 1000/\sqrt{3}D$ 。式中 $J_1(2\pi fd)$ 是关于自变量 $2\pi fd$ 的一阶贝塞尔函数, d 为 MCP 单丝直径(μm), D 为 MCP 通道间距(μm)。

当 $D=10\ \mu\text{m}$, $R_{MCP}=58\ \text{lp/mm}$; 当 $D=8\ \mu\text{m}$, $R_{MCP}=72.2\ \text{lp/mm}$ 。显然减小通道间距可提高像管 MTF 和分辨力性能。

2.2 MCP 出射电子横向散射

电子从 MCP 出射后,其出射方向与法线有一

定夹角,其速度除了有 MCP 轴向分量,还有横向分量,横向分量不受 MCP 与荧光屏间的静电场作用,因此,电子以抛物线轨迹发散,在荧光屏上形成一个弥散斑,最终造成图像模糊,降低了器件分辨力。电子出射角度越大,其横向散射就越大,弥散斑越大,器件分辨力越低。减小 MCP 出射电子角度和降低 MCP 出射电子横向散射是提高器件分辨力的有效途径。

2.3 MCP 非开口面电子散射

一般研究者在推导近贴聚焦系统的 MTF 时,前提都是建立在从阴极发射出来的电子被后面部件全部接收。而实际三代像增强器的 MCP 是由很多带孔的细管组成,开口面积约为 60%,如图 1 所示。也就是说,从阴极发出的电子有 60% 直接进入通道内被接收,而其余 40% 的电子和 MCP 非开口

面电极碰撞,大约有20%来自阴极的电子被吸收成为电流,大约有20%来自阴极的电子发生弹性散射。当它们弹回时,由于MCP与阴极之间的电场作用而被拉回MCP表面,在MCP表面形成一个散射圆,散射圆直径约为前近贴距的4倍^[5],如图2所示。

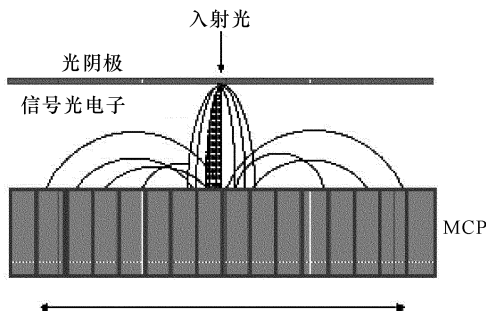


图2 MCP非开口面电子散射示意图

Fig. 2 Schematics of electrons scattering for MCP non-open area

若入射光较弱,则散射电子数量较小,即从阴极出射的电子及散射返回的电子只是数量上减小,投射到MCP输入面上的弥散斑不会产生明显变化,几乎不影响近贴聚焦系统的MTF和分辨力。但是若入射光较强或场景中存在局部强光,则散射电子数量较多,从而产生一个很大的投射光晕,此时像管的MTF和分辨力与弱光下相比有很大的不同,图像中局部强光掩盖了周围弱信号,分辨力会大大降低。对比观察图3中的(a)和(b)、(c)和(d),就可看到强光或局部强光下对图像分辨力的影响。通过增加开口面积比OAR,减小非开口部分面积,可减小电子在非开口部分的散射,提高像管分辨力,尤其是对强光分辨力更为明显。

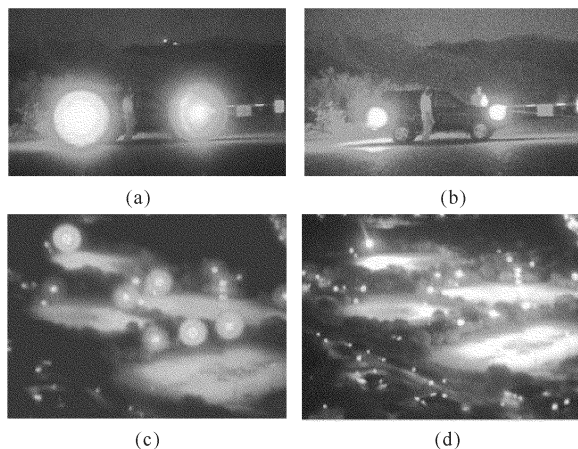


图3 强光微光图像和消除强光微光图像的对比

Fig. 3 Comparison between LLL image under strong light and LLL image after removing strong light

3 提高微光像增强器MTF的技术途径

根据以上MCP参数对微光像增强器MTF影响因素的研究分析,提出改善MCP参数提高微光像增强器MTF的技术途径。

3.1 减小MCP通道间距D

从MCP分辨力计算公式 $R_{MCP}=1\ 000/D$ 中可以看到,若要提高MCP的分辨力,则必须减小MCP通道间距,但为了有一个较大增益,一般MCP都有一个最佳长径比(MCP厚度与单丝直径之比),过小的丝径会要求MCP较薄,MCP强度变差,也不能做成大面积,同时也会对制作工艺带来很大挑战。微通道板的厚度薄到一定程度会严重降低其机械强度,操作处理时极易损坏,并且增加了制造难度,所以应在权衡工艺制造难度的同时,尽量选择相对合适的长径比参数,使之接近于最佳长径比,以获得相对较为满意的微通道板增益。目前通道直径可以做到 $5\ \mu\text{m}$,美国的Burle公司已经公布了 $2\ \mu\text{m}$ 的微通道板。

表1 MCP通道间距D和像管分辨力关系计算表

Table 1 The relation between channel distance D and resolution of image intensifier

MCP通道间距/ μm	$R_{MCP}/(\text{lp/mm})$	阴极电压/V	前近贴距/mm	屏电压/V	后近贴距/mm	$R/(\text{lp/mm})$
10	58	400	0.20	4 000	0.5	42
8	73	400	0.20	4 000	0.5	46
6	97	400	0.20	4 000	0.5	51
10	58	400	0.15	4 000	0.5	45
8	73	400	0.15	4 000	0.5	51
6	97	400	0.15	4 000	0.5	57

从表1可看出,当阴极电压、前近贴距离、荧光屏电压和后近贴距相同时,MCP通道间距D每减小 $2\ \mu\text{m}$,可把像增强器分辨力提高大约 $5\ \text{lp/mm}$ 。这说明通过减小MCP通道间距D可明显提高像增强器的分辨力。

3.2 减小MCP输出电子散射

3.2.1 聚焦输出型MCP(FMCP)

在MCP输出面沉积多层导电层,导电层之间由绝缘介质层隔离,当导电层之间有电势差时,多层导电层就会在每个通道口处形成静电透镜,如图4、图5和图6^[6]所示。每个静电透镜都可约束从MCP微通道出射的电子,最终将电子聚焦到荧光屏上,这样,电子的空间散射就会大大被减小。而且,允许荧光屏离FMCP有更远的距离而不会牺

性分辨率,有利于减少荧光屏与FMCP之间的场助发射、高压击穿和荧光屏铝层脱落等现象。

工艺制作步骤:在MCP输出面先沉积第一导电层,在第一导电层上沉积绝缘介质层,在绝缘介质层上沉积第二导电层。每层进入MCP微通道内的深度要小于前一层进入MCP通道的深度。由3种膜层形成了聚焦结构,使每个通道口都形成了一个静电透镜,可对MCP出射电子起聚焦作用,减小电子径向散射,改善器件分辨力。

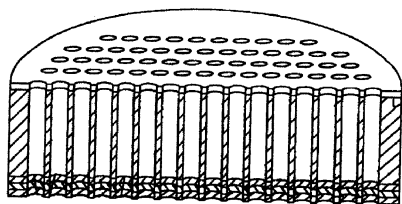


图4 FMCP的截面图

Fig. 4 Cross section of FMCP

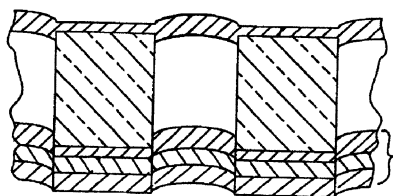


图5 多层电极聚焦结构放大图

Fig. 5 The enlarged cross section of multiplayer electrode focusing structure

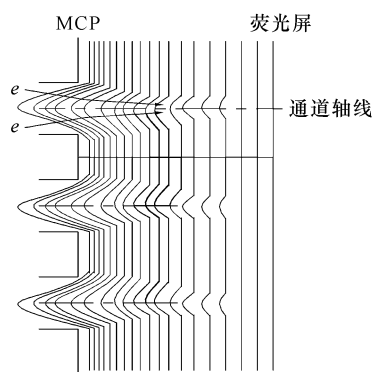


图6 微通道板输出面与荧光屏之间的电场分布

Fig. 6 The electric field distribution of MCP and phosphor screen

镍或镍铬铁合金可作为第一金属电极和第二金属电极的材料。任何合适的绝缘材料,如玻璃可作为绝缘层的材料。制作第一金属电极、第二金属电极的方法和制作MCP输入电极的方法相同,采用真空蒸镀法制作,工件不停地旋转以保证蒸镀的

均匀性。绝缘层也可用真空蒸镀法制作。

3.2.2 增加MCP输出端电极深度

为了最大限度提高微通道板的分辨率,通常采用“末端损失(end spoiling)”方法,即微通道板输出面金属膜层电极深入到通道内一定程度,通常“末端损失”的深度在1.0~2.0个通道直径之间,使出射电子的掠出角减小,以便于达到会聚出射电子的目的,但“末端损失”法会降低MCP增益。

MCP输出端电极进入通道的部分可对出射电子起准直的作用,电极进入通道部分的长度称为电极深度。电极深度越长,对电子的准直作用越好,但增益也会下降。MCP输出端电极深度是通道直径的两倍时,MCP增益达到8 000。当然MCP增益的损失可通过其他途径得到补偿。电极深度可通过调整镀电极夹具得以实现。经过计算,如果电极深度为通道直径的两倍时,最大出射电子散射角为 27° ,散射角度 $27^\circ \sim 90^\circ$ 的电子被深入通道的电极吸收。如果将电极深度延长为通道直径的3倍,最大出射电子散射角变为 18° ,散射角度 $18^\circ \sim 90^\circ$ 的电子被深入通道的电极吸收,相应像管分辨率也会提高。

对比这两种方法,聚焦输出型MCP采用改变电场分布,在MCP输出口形成微聚焦电子透镜,限制电子的横向散射。这种方法效果较好,基本不会降低MCP的其他性能,但是制作工艺较复杂。增加输出电极深度法是通过删去散射角度较大的出射电子,减小了散射斑大小,提高分辨力。这种方法效果也较好,制作工艺简单,但是降低了MCP的增益。两种方法可以综合衡量,予以采用。

3.3 增加MCP开口面积比OAR

开口面积比OAR定义为微通道板工作区的通道开口面积与整个工作区面积之比。开口面积比决定了微通道板的探测效率,并在一定程度上影响微通道板的分辨力和噪声因子。大的开口面积比可增加阴极出射电子进入通道的比例,减小电子与MCP非开口面的碰撞而产生的电子散射,从而提高像管分辨力。

但若只考虑追求大的开口面积比参数,会给微通道板的制造工艺带来非常大的困难。通常微通道板的开口面积比为58~63,但也有将微通道板输入面的通道口处理成漏斗状^[7],使开口面积比达到70甚至80,如图7所示。美国的Galileo公司曾进行过这方面的工作,但由于工艺难度大,这项技术没有进入实质

性应用,还有将微通道孔做成方形的MCP^[8](如图8所示),它们都可以提高开口面积比OAR。

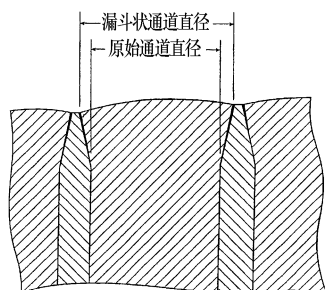


图7 漏斗状MCP

Fig. 7 Infundibular MCP

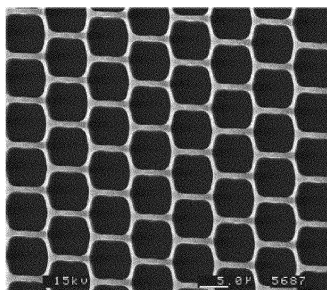


图8 方型孔MCP

Fig. 8 Square hole MCP

4 结论

为提高微光像增强器分辨力,除了减小前后近贴距离、提高阴极电压和荧光屏电压外,还可以通过以下技术途径改善MCP参数来提升像增强器MTF特性,提高像管分辨力:

1) 减小MCP通道间距 D 可大幅提升像增强器MTF和分辨力性能;

2) 在MCP输出面镀多层电极或增加MCP输出电极深度都可减小MCP出射电子横向散射,提高像管MTF和分辨力;

3) 增加MCP开口面积比OAR可减小MCP入射电子散射,提高像管MTF和分辨力,特别强光

或局部强光时的MTF和分辨力性能。

参考文献:

- [1] 周立伟,刘玉岩. 目标探测与识别[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
ZHOU Li-wei, LIU Yu-yan. Target recognition and detection [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 程耀进,向世明,师宏立. 三代微光像增强器分辨力计算理论模型[J]. 应用光学,2007,28(5):578-581.
CHENG Yao-jin, XIANG Shi-ming, SHI Hong-li. Theoretical model for resolution calculation of third generation image intensifiers[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 578-581. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 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.
XIANG Shi-ming. Theoretical resolution limit of double-proximity focusing image intensifiers [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 351-353. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. 应用光学, 2005,25(5):25-29.
PAN Jin-sheng. Microchannel plates and its main characteristics [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 25(5):25-29. (in Chinese with an English abstract)
- [5] ESTRERA J P, SALDANA M R. Gated power supply technologies for advanced image intensifiers [J]. SPIE, 2003, 4796: 60-70.
- [6] JACKSEN N F. Bonding method for microchannel plates[P]. US, 7021522[P]. 2006-04-04.
- [7] ROSINE S D, DEVOE N C. Microchannel plate having microchannels with deep funneled and/or step funneled openings and method of manufacturing same[P]. US, 6876802[P]. 2005-04-05.
- [8] SIEGMUND O HW, TREMSIN A S, VALLERGA J V. Advanced MCP sensors for UV/visible astronomy and biology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 510: 185-189.