

文章编号:1002-2082(2008)03-0351-03

双近贴聚焦微光像增强器分辨力 理论极限问题研究

向世明

(西安应用光学研究所 第二研究室, 微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 分辨力和MTF是微光像增强器的2个重要参数。根据线性系统傅里叶频谱理论,分析了微光像增强器的MTF和分辨力特性。计算出理想条件下,基于光阴极/MCP/荧光屏3部件结构以及带内电子增益机制的光阴极/荧光屏2部件结构的近贴聚焦像管的理论极限分辨力。它们分别是96.6 lp/mm和98.1 lp/mm。该结果可供人们改进像管MTF及分辨力特性时参考。

关键词: 微光像增强器;像增强器;微通道板(MCP);近贴聚焦;分辨力;MTF;傅里叶频谱
中图分类号: TN144-34 文献标志码: A

Theoretical resolution limit of double-proximity focusing image intensifiers

XIANG Shi-ming

(Key Laboratory of Low-Light-Level Technology of COSTIND,
Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Resolution and MTF are two important parameters of an image intensifier. The characteristics of the two parameters of a double-proximity focusing image intensifier were analyzed by means of several expressions based on the Fourier spectral theory of linear systems. Two theoretical limiting resolutions were obtained by calculation under a series of theoretical and technologic conditions, for both constructive modes of double-proximity focusing image tubes, in which one is a normal mode of photocathode/MCP/phosphor screen, and another is a mode of electron-internal amplification photocathode/phosphor screen. The calculated results are 96.6 lp/mm and 98.1 lp/mm.

Key words: image intensifier; MCP; proximity focusing; resolution; MTF; Fourier spectrum

引言

空间(或时间)分辨力和MTF特性是微光器件的2个重要特性参数,它包含了对不同空间频率(或时间)目标调制度信息的传递能力。空间分辨能力(MTF)以1次方的关系决定着微光系统在中等以上照度(≥ 100 lx)时的作用距离和图像清晰度;时间分辨力将直接影响动态微光图像跟踪制导系统的距离、响应速度和打击精确度。在光学像质评

价中,人们普遍认为调制传递函数MTF是评价成像系统和器件像质最全面、最客观的方法;而分辨力是器件MTF曲线 $\sim 2\%$ 调制度对应的一个空间(或时间)频率。

本文根据线性系统傅里叶频谱理论,分析了影响微光像增强器空间MTF和分辨力特性的制约因素,给出了计算公式,并在理想条件下,求得了基于光阴极/MCP/荧光屏3部件结构和带电子内增益

收稿日期:2007-03-02; 修回日期:2007-04-17

作者简介:向世明(1938—),男,陕西安康人,教授,博士生导师,微光夜视技术国防科技重点实验室学术委员会主任,主要从事光电成像技术研究工作。E-mail: xshiming2003@yahoo.com.cn

机制的光阴极/荧光屏 2 部件结构的像管理论极限分辨力,它们分别是 96.6 lp/mm 和 98.1 lp/mm。

1 理论依据

超二代、三代和四代微光管均是双近贴聚焦电子光学系统的 MCP 像增强器,如图 1 所示。它由光阴极、前近贴聚焦电子光学系统、微通道板 (MCP)、后近贴聚焦电子光学系统和荧光屏 5 部分组成。每部分均对输入图像的质量 (MTF 及分辨力) 构成影响。其物理本质是图像信息载体-光子和光电子在输运 (飞行) 过程中发生空间横向弥散或时间先后弥散,二者分别决定了器件的空间和时间分辨力 (MTF)。本文只涉及器件空间分辨力 (MTF) 的理论极限。

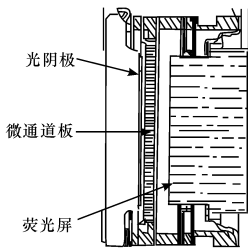


图 1 双近贴 MCP 像增强器结构示意图

Fig. 1 Structure of a double-proximity focusing image intensifier

根据傅里叶频谱分析理论,对于任何线性不变系统,系统总的 MTF 和分辨力可分别表示^[1]为

$$M_{\text{总}}(N) = M_{\text{阴极}}(N) \cdot M_{\text{前}}(N) \cdot M_{\text{MCP}}(N) \cdot M_{\text{后}}(N) \cdot M_{\text{屏}}(N) \quad (1)$$

$$R_{\text{总}}^{-2} = R_{\text{阴极}}^{-2} + R_{\text{前}}^{-2} + R_{\text{MCP}}^{-2} + R_{\text{后}}^{-2} + R_{\text{屏}}^{-2} \quad (2)$$

式中 $M_{\text{阴极}}(N)$ 和 $R_{\text{阴极}}$ 分别为光阴极的 MTF 和分辨力。理论证明,对于 2 μm 厚的 GaAs 光阴极,光电子在其体内输运过程中横向扩散造成的 MTF 下降是很小的,其理论极限分辨力可达 1 000 lp/mm 以上^[2],本文计算不考虑它的影响。 $M_{\text{前}}(N)$ 、 $R_{\text{前}}$ 、 $M_{\text{后}}(N)$ 和 $R_{\text{后}}$ 分别为前/后近贴聚焦电子光学系统的 MTF 和分辨力,且有关系式:

$$M_{\text{前}}(N) = \exp(-16.4 L_{\text{前}}^2/V_{\text{前}}) \quad (3)$$

$$M_{\text{后}}(N) = \exp(-16.4 L_{\text{后}}^2/V_{\text{后}}) \quad (4)$$

式中: $L_{\text{前}}$ 、 $L_{\text{后}}$ 、 $V_{\text{前}}$ 和 $V_{\text{后}}$ 分别是前后近贴距离和前后近贴场工作电压。上述两式说明,近贴距离愈近,工作电压愈高,电子在飞行过程中的横向扩展愈少,MTF 和分辨力会愈高。(3)式和(4)式的具体形式与光阴极 (或 MCP) 输出电子的初角度分布和

初能量分布有关。以上两式是在假定朗伯初角度分布和余弦初能量分布的前提下得出的。

令 $M_{\text{前}}(N) = M_{\text{后}}(N) = 0.02$, 则前后近贴聚焦电子光学系统的极限分辨力可分别表示为

$$R_{\text{前}} = 0.49 V_{\text{前}}^{1/2}/L_{\text{前}} \quad (5)$$

$$R_{\text{后}} = 0.49 V_{\text{后}}^{1/2}/L_{\text{后}} \quad (6)$$

对于三代管,当 $L_{\text{前}} = 0.3 \text{ mm}$, $V_{\text{前}} = 800 \text{ V}$ 和 $L_{\text{后}} = 0.6 \text{ mm}$, $V_{\text{后}} = 6\ 000 \text{ V}$ 时, $R_{\text{前}} = 46 \text{ lp/mm}$, $R_{\text{后}} = 63 \text{ lp/mm}$ 。

(1) 式和 (2) 式中的 $M_{\text{MCP}}(N)$ 和 R_{MCP} 分别是 MCP 的 MTF 和分辨力,且有关系式:

$$M_{\text{MCP}}(N) = 2J_1(2\pi Nd)/2\pi Nd \quad (7)$$

$$R_{\text{MCP}} = 1000/1.72 p = 581.4/p \quad (8)$$

式中: $J_1(2\pi Nd)$ 是关于自变量 $2\pi Nd$ 的一阶贝塞尔函数; d 为 MCP 单丝直径; p 为 MCP 丝芯距。当 $p = 8 \text{ μm}$ 时, R_{MCP} 等于 73 lp/mm。

(1) 式和 (2) 式中的 $M_{\text{屏}}(N)$ 和 $R_{\text{屏}}$ 分别是荧光屏的 MTF 和分辨力。它们与荧光粉粒度、屏厚度、致密程度以及铝层质量等有关。例如,在粒度 (3~5) μm, 厚度 (8~10) μm 情况下, $R_{\text{屏}} \geq 100 \text{ lp/mm}$ 。由 (2) 式可见,它对双近贴聚焦型微光器件分辨力的影响可以忽略不计。

根据以上分析,(2) 式可近似为

$$R_{\text{总}} = (R_{\text{前}}^{-2} + R_{\text{MCP}}^{-2} + R_{\text{后}}^{-2})^{-1/2} \quad (9)$$

把 (5) 式、(6) 式和 (8) 式代入 (9) 式并整理,得:

$$R_{\text{总}} = (4.165 L_{\text{前}}^2/V_{\text{前}} + 2.96 \times 10^{-6} p^2 + 4.165)^{-1/2} \quad (10)$$

(10) 式是本文进行双近贴聚焦型微光像增强器理论极限分辨力分析的主要依据。

2 双近贴聚焦微光像增强器极限分辨力的计算及分析

2.1 前提条件

1) 分辨力理论极限分析必须以保证像管有足够的亮度增益为前提。

2) 被分析的像增强器原理结构有: ① 光阴极/MCP/荧光屏 3 部件; ② 电子内增益机制的光阴极/荧光屏 2 部件。

3) 按照分辨力标准测试条件输入照度 (适度), 不考虑暗背景对 MTF 的影响, 即仅以 (10) 式所包含的像管几何及电器参数为分析依据。

4) 采用最先进的制管工艺, 适当考虑影响管

体分辨力3因素((10)式中的前、后近贴距离,工作电压和MCP丝芯距)的“理想”设定值的可行性。

2.2 分析结果

2.2.1 光阴极/MCP/荧光屏像增强器的理论极限分辨力

假定像管前后近贴距离 $L_{前}=0.05\text{ mm}$, $L_{后}=0.3\text{ mm}$; 前后近贴工作电压 $V_{前}=800\text{ V}$, $V_{后}=8\,000\text{ V}$; MCP丝芯距 $p=4\text{ }\mu\text{m}$ 。将上述设定值代入(10)式,可得到光阴极/MCP/荧光屏像增强器的极限分辨力为 96.6 lp/mm 。

2.2.2 带电子内增益机制的光阴极/荧光屏像增强器的极限分辨力

假定像管前、后近贴距离 $L_{前}=0\text{ mm}$, $L_{后}=0.5\text{ mm}$; 前后、近贴工作电压 $V_{前}=100\text{ V}$, $V_{后}=10\,000\text{ V}$; MCP丝芯距 $p=0\text{ }\mu\text{m}$ (连续靶面)。将上述设定值代入(10)式,可得到带电子内增益机制的光阴极/荧光屏像增强器的理论极限分辨力为 98.1 lp/mm 。

3 结果评价

1) 本文根据线性系统傅里叶频谱理论,分析了影响微光像增强器MTF和分辨力特性的制约因素,给出了计算公式,并在适当的理论及工艺条件下,求得了基于光阴极/MCP/荧光屏3部件结构和带电子内增益机制的光阴极/荧光屏2部件结构的像管理论极限分辨力,它们分别是 96.6 lp/mm 和

98.1 lp/mm 。以上极限值已十分接近当前最好水平的荧光屏分辨力($\geq 100\text{ lp/mm}$),它为人们改进像管MTF及分辨力特性提供了一个奋斗目标和研究思路,具有重要的实用价值。

2) 计算所依据的理想条件实现起来会非常困难。例如,对像管前近贴距离 0.05 mm , 后近贴系统高场强($10\text{ kV}/0.5\text{ mm}$)相关工艺的难度很大;此外,由于长径($40:1$)的限制, $4\text{ }\mu\text{m}$ 丝芯距MCP的板厚度仅为 $160\text{ }\mu\text{m}$,故器件的抗冲击振动性能必须认真对待。然而,这些前提条件并非绝对不可能实现,美国ITT公司四代微光管的分辨力已高达 90 lp/mm 便是一个范例,值得借鉴。

3) 本文分析中未考虑器件暗背景对MTF及分辨力特性的影响。实际上,暗背景亮度大的器件,其分辨力特性会受到较大影响,图像看起来是雾蒙蒙的。

参考文献:

- [1] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
XIANG Shi-ming, NI Guo-qiang. The principle of photoelectronic imaging devices [M]. Beijing: National Defence Press, 1999. (in Chinese)
- [2] FISHER D G, MARTINELLI R U. Negative electron affinity material for imaging devices [J]. Advances in Image Pickup and Display, 1974(1): 71-162.