

文章编号: 1002-2082(2007)05-0578-05

三代微光像增强器分辨力计算理论模型

程耀进, 向世明, 师宏立

(微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 分辨力和传递函数MTF是微光像增强器的2个重要参数。长期以来,人们对于三代微光像增强器阴极发出的电子初能量分布没有统一的认识,从而没有一个公认的分辨力和MTF计算模型。通过理论分析和假设,给出一定条件下一个分辨力计算模型。把实际测得的第一近贴距、第二近贴距、阴极电压和荧光屏电压等数值代入分辨力计算模型中,可以得到分辨力理论值。经与实际测量值进行比对,发现二者偏差值在12.3%以内,此理论模型基本符合实际需求。该分析方法和所得结果有一定实用价值,可作为设计三代微光像增强器的技术参考。

关键词: 三代微光像增强器;双近贴;微通道板(MCP);分辨力;MTF

中图分类号: TN223-34

文献标志码: A

Theoretical model for resolution calculation of third generation image intensifiers

CHENG Yao-jin, XIANG Shi-ming, SHI Hong-li

(Key Laboratory for Low Light Level Technology of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, Xi'an 710065, China)

Abstract: Resolution and MTF are two important parameters for an image intensifier. Up to now, there is no unified understanding on the primary electronic energy distribution from generation III image intensifier cathode, and no well-established theoretical model on resolution and MTF. A resolution calculation model under a specific condition was obtained by theoretical analyses and assumptions. The theoretical resolution value was obtained by substituting the measured parameters such as 1st proximity distance, 2nd proximity distance, photocathode voltage and phosphor screen voltage into the resolution calculation model. By comparing it with the measured value, it is found that the value of deviation between the calculated and the measured resolution values is less than 12.3%. The method and results are helpful for people engaged in the design of generation III image intensifier.

Key words: generation III image intensifier; double-proximity focus; MCP; resolution; MTF

引言

空间分辨力及MTF特性是微光器件的重要特性参数,它包含了不同空间频率目标调制度信息的传递能力。空间分辨能力以1次方的关系决定着微光系统在中等以上照度(≥ 1 lx)时的作用距离和图像清晰度。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的最全面、最客观方法;而分辨力是器件MTF曲线3%调制度对应的一个空间频率。

由于对三代微光像增强器阴极发出的电子初能量分布至今没有统一的认识,因而器件MTF的计算模型也不统一,长期以来,没有一个公认的分

辨力计算模型。本文通过理论分析,寻求一个分辨力的理论计算模型,并将理论分辨力与实测值进行了比较,用以验证模型的正确性。

1 理论模型

三代微光管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、第一近贴聚焦电子光学系统、微通道板(MCP)、第二近贴聚焦电子光学系统和荧光屏5部分组成。每一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)过程中形成的空间横向弥散,弥散半径决定了器件的空间分辨力(MTF)^[1-2]。

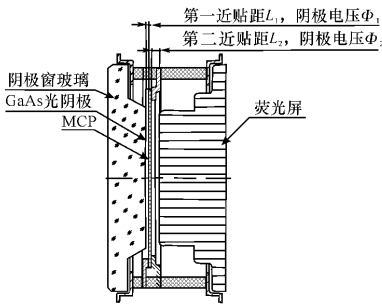


图1 三代微光像增强器结构示意图

Fig.1 The structure of generation III image intensifier

为便于下面计算,定义:

第一近贴距 L_1 : GaAs 光阴极面与 MCP 输入面之间的间距;

第二近贴距 L_2 : MCP 输出面与荧光屏之间的间距;

阴极电压 Φ_1 : GaAs 光阴极面与 MCP 输入面之间的电压;

荧光屏电压 Φ_2 : MCP 输出面与荧光屏之间的电压。

根据傅里叶频谱分析理论,对于任何线性不变系统,器件总的 MTF 和分辨力可分别表示为

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{\text{总}}(f) &= \text{MTF}_{\text{阴极}}(f) \cdot \text{MTF}_1(f) \cdot \\ &\text{MTF}_{\text{MCP}}(f) \cdot \text{MTF}_2(f) \cdot \\ &\text{MTF}_{\text{屏}}(f) \end{aligned} \quad (1)$$

$$R_{\text{总}}^{-2} = R_{\text{阴极}}^{-2} + R_1^{-2} + R_{\text{MCP}}^{-2} + R_2^{-2} + R_{\text{屏}}^{-2} \quad (2)$$

理论证明,对于 $2 \mu\text{m}$ 厚的 GaAs 光阴极,由于光电子在其体内输运过程中的横向扩散造成的

MTF 下降是很小的,其理论极限分辨力可达 $1\ 000 \text{ lp/mm}$ 以上,故在本文计算中不考虑它的影响。

荧光屏的传输特性主要因素包括基底(光纤面板)、基底与粉层界面处的光晕、粉层及反射铝膜。它可近似地采用下面公式进行计算:

$$\text{MTF}_{\text{屏}} = \text{EXP}[-(f/46)^{1.1}] \quad (3)$$

对于粒度为 $(3 \sim 5) \mu\text{m}$,厚度为 $(8 \sim 10) \mu\text{m}$ 的荧光屏,其分辨力大于 100 lp/mm ,故它对双近贴聚焦型微光器件分辨力的影响可以忽略不计。于是(1)式和(2)式可简化成

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{\text{总}}(f) &= \text{MTF}_1(f) \cdot \text{MTF}_{\text{MCP}}(f) \cdot \\ &\text{MTF}_2(f) \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_{\text{总}}^{-2} = R_1^{-2} + R_{\text{MCP}}^{-2} + R_2^{-2} \quad (5)$$

1.1 GaAs 光阴极发射电子模型和器件的第一近贴分辨力

在成像系统中,从阴极面逸出的电子运动方向与轴线的夹角 α 一般服从 Lambert 分布,即光电子以初始角 α 逸出的几率是:

$$G(\alpha) = \cos\alpha \quad (6)$$

式中 $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ 。

GaAs 阴极光电子初始发射能量的分布是一种缺乏普遍被接受的理论模型,主要有 2 种:一种是 β 分布;一种是 Maxwell 分布。因为 Maxwell 阴极发射体有一个长的发射能量尾巴,而实际发射体中不存在长的发射尾巴,并且 Maxwell 分布计算出来的第一近贴距分辨力值太低,与实际极不相符,故不适合采用 Maxwell 分布。GaAs 光阴极发射光电子的物理机制较为复杂,其具体光电子初始发射能量分布超出本文研究范围,有待于进一步探讨。本文采用普适性较强的 $\beta_{k,l}$ 分布进行讨论^[3]。

Maxwell 分布为

$$\text{MTF} = \exp\left[-4\pi^2 f^2 L^2 \frac{\epsilon_p}{\Phi}\right] \quad (7)$$

β 分布为

$$\begin{aligned} \text{MTF} &= \frac{(k+l+1)!}{k!} \cdot \\ &\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (\pi f (2L \sqrt{\frac{\epsilon_m}{\Phi}}))^{2n} (n+k)!}{n!(n+1)!(n+k+l+1)!} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ϵ_m 为光电子最大发射初电位(eV); ϵ_p 为光电子最几可发射初电位; f 为分辨力(lp/mm); L 为极间距(mm); Φ 为极间电压(V)。

取 $\beta_{1,8}$ 的分布为

$$MTF = \exp\left[-\frac{4}{11}\pi^2 f^2 L^2 \frac{\epsilon_m}{\Phi}\right] \quad (9)$$

MTF=3%时对应的分辨力值(极限分辨力)为

$$MTF = \exp\left[-\frac{4}{11}\pi^2 R_1^2 f^2 L^2 \frac{\epsilon_{m1}}{\Phi_1}\right] = 3\% \quad (10)$$

式中: ϵ_{m1} 为 GaAs 光电阴极发射光电子最大初电位(eV); R_1 为第一近贴分辨力(lp/mm); L_1 为第一近贴距(mm); Φ_1 为阴极电压(V)。

GaAs 光电阴极的短波截止波长 λ_1 为 400 nm, 长波截止波长 λ_2 为 900 nm, 由能量公式可知, 光电阴极发射光电子最大初能量为

$$\begin{aligned} \epsilon_{m1} &= hc\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = 6.6262 \times 10^{-34} \times 3.0 \times \\ &10^8 \times \left(\frac{1}{400 \times 10^{-9}} - \frac{1}{900 \times 10^{-9}}\right) = \\ &2.76 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.73 \text{ eV} \end{aligned}$$

把 ϵ_{m1} 代入(10)式, 可得:

$$R_1 = 0.75 \frac{\sqrt{\Phi_1}}{L_1} \quad (11)$$

1.2 MCP 的 MTF 和分辨力

$$M_{MCP}(f) = |J_1(2\pi fd)/\pi fd| \quad (12)$$

$$R_{MCP} = 1000/\sqrt{3} D \quad (13)$$

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 丝芯距(μm)。当 $D=8 \mu\text{m}$ 时, $R_{MCP}=72.2 \text{ lp/mm}$ 。

1.3 MCP 发射电子模型和第二近贴分辨力

因为微通道板逸出电子有一个高的峰值, 故而带有一个长发射能量尾巴。据报道, 微通道板输出端电子分布主要有 2 种类型: 1) 电子逸出初始角分布为朗伯分布; 2) 电子初能量分布符合麦克斯韦分布。计算所得的 MTF 和分辨力与实际值相差较远, 这是因为 MCP 输出端电极深入到 1~2 个通道直径会产生末端损失, 使逸出电子初始角分布在轴线附近很窄的立体角内。另外, MCP 输出面到

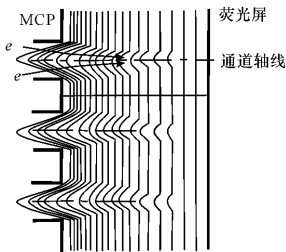


图2 微通道板输出面与荧光屏之间的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution between MCP output plane and phosphor screen

荧光屏间的均匀电场在微通道口处产生畸变, 导致电子发生会聚作用, 并且 MCP 输出端电极越深, 会聚作用越明显。很显然, MCP 输出端逸出电子的初始角分布不再符合朗伯分布规律, 所以用 Maxwell 公式计算不能得到正确结果。

从微通道板出来的电子初始角分布在近轴方向上的几率通常比朗伯分布的大, 不妨假定为 $\cos^3 \alpha$ 规律^[4]。

$\beta_{2,32}$ 分布可近视模拟 MCP 输出电子分布:

$$MTF = \exp\left[-\frac{1}{9}\pi^2 f^2 L_2^2 \frac{\epsilon_{m2}}{\Phi_2}\right] \quad (14)$$

如图 3 所示, 从 MCP 输出电子能量分布可知, $\epsilon_{m2}=5 \text{ eV}$ ^[5], MTF=3%时对应的分辨力值(极限分辨力)为

$$MTF = \exp\left[-\frac{1}{9}\pi^2 f^2 L_2^2 \frac{\epsilon_{m2}}{\Phi_2}\right] = 3\% \quad (15)$$

$$R_2 = 0.8 \frac{\sqrt{\Phi_2}}{L_2} \quad (16)$$

把(11)、(13)和(16)式代入(5)式并整理得

$$R_{\Sigma} = (1.77L_1^2/\Phi_1 + 3 \times 10^{-6} D^2 + 1.56L_2^2/\Phi_2)^{-1/2} \quad (17)$$

本式是计算三代微光像增强器理论极限分辨力的主要依据。

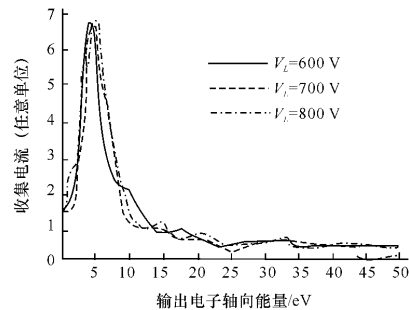


图3 微通道板输出电子轴向能量分布
Fig. 3 Axial energy distribution of MCP output electron

2 结果分析

选取 7 只三代微光像增强器, 测量它们的第一近贴距 L_1 , 第二近贴距 L_2 , 阴极电压 Φ_1 , 荧光屏电压 Φ_2 , 代入(17)式, 计算结果如表 1 所示。从表 1 和图 4 中可看到理论值和实测值偏差小于 12.3%。

表1 分辨力理论计算数据表

Table 1 The data of theoretically-calculated resolution

像管号	实测第一近贴 L_1/mm	阴极电压 Φ_1/V	实测第二近贴 L_2/mm	荧光屏电压 Φ_2/V	理论计算分辨力 $/\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	实测分辨力 $/\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	偏差百分比/%
2006-105	0.268	400	0.633	4200	39.0	42	7.1
2006-52	0.337	380	0.695	4000	33.2	36	7.8
2005-115	0.313	450	0.730	4000	35.7	32	11.6
2006-30	0.193	480	0.673	4200	44.9	40	12.3
2006-76	0.310	400	0.717	4300	35.3	36	1.9
2006-38	0.381	300	0.650	4000	28.7	32	10.3
2006-88	0.234	550	0.680	4200	43.1	42	2.6

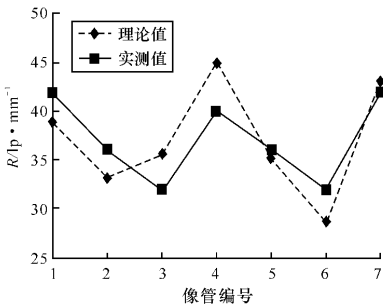


图4 分辨力理论计算值与实测值的比对

Fig. 4 Comparison between theoretically-calculated and measured resolution values

3 结论

在一定假设条件下,通过理论分析得出分辨力的计算模型,并把实测的第一近贴距,第二近贴距,阴极电压和荧光屏电压等数值代入公式,将理论分辨力与实际测得的分辨力进行比较,发现二者偏差小于12.3%,基本上可以认为此计算模型比较符合三代微光像增强器分辨力的实际情况。本分析方法及结果有一定实用价值,可作为人们设计三代微光像增强器的技术参考。

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,1999:42-49.

XING Shi-ming, NI Guo-qiang. The principle of photoelectronic imaging devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 42-49. (in Chinese)

[2] 艾克聪. 微光夜视技术的进展和展望[J]. 应用光学, 2006,27(4):303-307.

AI Ke-cong. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(4):303-307. (in Chinese)

[3] 周立伟. 宽束电子光学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993,95-404.

ZHOU Li-wei. Electron optics with wide beam focusing [M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1993:95-404. (in Chinese)

[4] 宋克昌. 双近贴聚焦象增强器的MTF评价[J]. 光子学报,1985,12(3):1-22.

SONG Ke-chang. Evaluation of MTF of double proximity focused image intensifier [J]. Acta Photonica Sinica, 1985,12(3):1-22. (in Chinese)

[5] 檀慧明. 近贴聚焦开口式微通道板象增强器调制传递函数的近似计算[J]. 应用光学, 1990,11(1): 21-24.

TAN Hui-ming. Apporximate calculation of MTF of proximity focused open MCP image intensifier [J]. Journal of Applied Optics, 1990, 11(1): 21-24. (in Chinese)