

doi:10.3788/gzxb20164506.0604003

# 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析

陶禹<sup>1</sup>, 金伟其<sup>1,2</sup>, 王瑶<sup>1</sup>, 石峰<sup>2</sup>, 郭宏<sup>1</sup>

(1 北京理工大学 光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 微光夜视技术重点实验室, 西安, 710065)

**摘 要:** 为了提升微光夜视系统中高性能近贴式像增强器极限分辨力, 在归纳近贴式像增强器及其部件调制传递函数模型的基础上, 结合高性能超二代和超三代像增强器的结构和电参量以及典型产品性能值, 研究分析了像增强器及其部件调制传递函数分布特性参数, 及它们对像增强器极限分辨力和综合评价参量-信道宽度的影响. 研究表明: 进一步提升像增强器性能需要提升荧光屏的性能或改善调制传递函数分布特征; 信道宽度参量可作为评价像增强器调制传递函数曲线分布特征的有效参量. 研究结论对于进一步提升高性能像增强器的性能具有理论指导意义.

**关键词:** 近贴式像增强器; 调制传递函数; 荧光屏; 分辨力; 信道宽度

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0604003-6

## The MTF Analysis of High Performance Proximity Image Intensifier

TAO Yu<sup>1</sup>, JIN Wei-qi<sup>1,2</sup>, WANG Yao<sup>1</sup>, SHI Feng<sup>2</sup>, GUO Hong<sup>1</sup>

(1 MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of high performance image intensifier in low-light-level night vision systems, the modulation transfer function models of the proximity image intensifier and its parts were summarized, and the structures and electrical parameters of the Super Gen. II and Super Gen. III image intensifiers were reviewed. The image intensifier and its modulation transfer function distribution were studied respectively, further their impact on the resolution limit as well as the channel width of the image intensifier was investigated. The results show that the performance of the screen and the modulation transfer function distribution should be improved to further improve the performance of the image intensifier, channel width can be an effective parameter to evaluate the modulation transfer function distribution of the image intensifier. The results have theoretical significance for the development of high performance image intensifiers.

**Key words:** Proximity image intensifier; Modulation Transfer Function (MTF); Screen; Resolution; Channel width

**OCIS Codes:** 040.3780, 040.5160, 110.2970, 110.4100

## 0 引言

像增强器是微光夜视系统的核心部件, 在军事和民用领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>. 近贴投射式和锐聚焦倒像式是像增强器的主要类型, 提高像增强器的极限分

辨力、信噪比、传递函数等主要性能一直是国内外研究者所追求的主要目标<sup>[2-4]</sup>. 当前广泛应用的近贴式像增强器主要有基于多碱阴极光阴极的二代/超二代像增强器和基于 GaAs 负电子亲和势光阴极的三代/超三代/四代像增强器两大类型. 近年来微通道板 (Micro

**基金项目:** 总装十二五重点预研计划 (No. 40405050302) 和微光夜视技术重点实验室基金 (No. BJ2014003) 资助

**第一作者:** 陶禹 (1975-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为夜视与红外成像总体及其模拟仿真技术. Email: pysty@163.com

**导师 (通讯作者):** 金伟其 (1961-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等. Email: jinwq@bit.edu.cn

**收稿日期:** 2015-12-02; **录用日期:** 2016-02-01

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

Channel Plate, MCP)、光纤面板(Fiber Optic Plate, FOP)以及荧光屏等工艺也得到全面的提升.特别是随着 MCP 通道直径由  $12\ \mu\text{m}$  减小到  $6\ \mu\text{m}$ ,使得高性能像增强器的极限分辨率提高到  $60\ \text{lp/mm}$  以上(信噪比达到  $28\sim 30$ )<sup>[3-4]</sup>.美国 ITT 公司报道的四代像增强器甚至达到  $90\ \text{lp/mm}$ <sup>[5]</sup>;向世明等<sup>[5-6]</sup>在分析双近贴像增强器调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)基础上,认为像增强器分辨率极限可达到  $98\ \text{lp/mm}$ 以上.然而,已有试验表明:当 MCP 的通道直径从  $6\ \mu\text{m}$  减小到  $5\ \mu\text{m}$  时,其对提升像增强器分辨率的效果已不明显,而经过实验验证的像增强器分辨率模型<sup>[7-8]</sup>由于模型本身或模型参数取值等原因,模拟计算结果也出现较明显的偏差,因此,需要从理论上研究进一步提升像增强器分辨率的技术途径.

本文将在简述近贴像增强器及其核心部件的传递函数基础上,分析像增强器发展阶段提升整体分辨率的核心部件作用,并对进一步提升像增强器分辨率的技术途径进行分析.

## 1 近贴式像增强器及其传递函数

如图 1,双近贴式像增强器主要部件包括玻璃或光纤面板输入窗、光阴极、前近贴电子光学系统、防离子反馈膜、微通道板 MCP、后近贴电子光学系统、荧光屏和光纤面板输出窗等.其中二代与三代像增强器的区别除光阴极不同外,三代/超三代在 MCP 前还有一个防离子反馈膜,四代无膜像增强器主要在超三代基础上去除了防离子反馈膜.在忽略 MCP、FOP 等器件的离散效应条件下,像增强器 MTF 由相关部件 MTF 之积构成.鉴于目前的模型不全,或模型参数选择不明确,为了后续模拟分析的基础,简要归纳典型的 MTF 模型,并说明其中参数的选择原则.

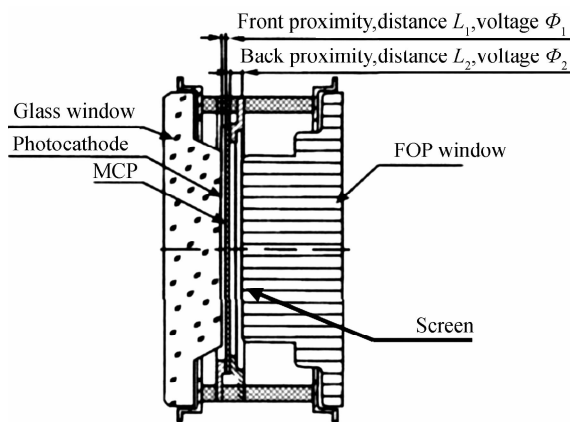


图 1 双近贴像增强器的结构示意图

Fig. 1 The structure of double proximity image intensifier

### 1.1 光阴极的传递函数

由于电子在几个微米的光阴极体内输运过程中横向扩散所造成的弥散很小,理论极限分辨率可达

$1\ 000\ \text{lp/mm}$  以上,故其对像增强器 MTF 的影响可以忽略.

### 1.2 近贴电子光学传递函数

在近贴电子光学系统中电子按抛物线投射成像,其成像电子弥散斑分布不仅与近贴距离  $L$ 、加速电压  $\Phi$  有关,而且与光阴极的电子初能量和初角度分布有关.

#### 1.2.1 前近贴电子光学系统

对于二代和超二代像增强器的多碱光阴极,通常假设其电子出射初角度  $\alpha$  为余弦分布  $\cos\alpha$ ,初能量分布为  $\beta_{1,4}$  分布,且最大初电位  $\epsilon_m=0.25\ \text{V}$ .根据文献[9-10],可得到超二代像增强器前近贴的 MTF 为

$$\text{MTF}_p(f) = \exp\left[-\frac{4}{7}\pi^2 L_1^2 \frac{\epsilon_m}{\Phi_1} f^2\right] \quad (1)$$

式中, $L_1$  和  $\Phi_1$  分别为前近贴距离(mm)和加速电压(V).

对于 GaAs 光阴极,通常假设电子出射初角度  $\alpha$  为余弦三次方分布  $\cos^3\alpha$ ,初能量分布为  $\beta_{1,8}$  分布.根据文献[9-10],可得到超三代像增强器前近贴的 MTF 为

$$\text{MTF}_p(f) = \exp\left[-\frac{8}{33}\pi^2 L_1^2 \frac{\epsilon_m}{\Phi_1} f^2\right] \quad (2)$$

关于 GaAs 光阴极的电子最大初电位  $\epsilon_m$  的取值有不同的观点,文献[5]认为应取  $1.73\ \text{V}$ ,文献[10]则选取  $\epsilon_m=0.5\ \text{V}$ ,本文采用了后者.

#### 2.2.2 后近贴电子光学系统

由于微通道板逸出电子有一个高的峰值,并带有一个长发射能量拖尾,因此,通常认为微通道板输出端电子逸出角分布为朗伯分布,电子初能量分布符合麦克斯韦分布<sup>[5]</sup>.但是,按此计算结果与实际情况相差较大.实际上,由于 MCP 输出端电极的末端损失,逸出电子初始角较多地集中在轴线附近很窄的立体角范围内,且 MCP 输出面到荧光屏间的均匀电场在微通道口处产生畸变,导致电子会聚作用.因此,文献[5,11]假设 MCP 输出端的电子出射初角度为  $\cos 3\alpha$  分布,初能量为  $\beta_{2,32}$  分布,且最大初电位  $\epsilon_m=5\ \text{V}$ .由此得到后近贴电子光学系统的 MTF 为

$$\text{MTF}_B(f) = \exp\left[-\frac{1}{9}\pi^2 L_2^2 \frac{\epsilon_m}{\Phi_2} f^2\right] \quad (3)$$

式中, $L_2$  为后近贴距离(mm); $\Phi_2$  为后近贴加速电压(V).

### 1.3 MCP 传递函数

MCP 是由百万紧密排列且内壁具有高二次发射特性的空心通道组成的二维电子倍增元件,一般通道芯径间距约  $12\ \mu\text{m}$ ,长径比为  $40\sim 60\ \mu\text{m}$ ,电子倍增率在  $10^3$  以上.在忽略 MCP 通道离散效应的条件下,以 MCP 单通道圆孔为响应函数,可得 MCP 的 MTF 为

$$\text{MTF}_{\text{MCP}}(f) = \left| \frac{J_1(2\pi f d_c)}{\pi f d_c} \right| \quad (4)$$

式中,  $J_1(\cdot)$  为一阶贝塞尔函数;  $d_c$  为 MCP 单丝直径 ( $\mu\text{m}$ ).

MCP 是影响像增强器分辨力和信噪比的主要因素,近年来通过工艺改进,出现高性能 MCP,芯径间距从  $12\ \mu\text{m}$  减小到  $8\sim 9\ \mu\text{m}$  及  $6\ \mu\text{m}$ ,对应像增强器分辨力从  $36\ \text{lp/mm}$  提高到  $45\sim 50\ \text{lp/mm}$  及  $64\ \text{lp/mm}$ ,同时通过材料改进和加大 MCP 的开口面积等工艺, MCP 的噪声特性得到较大的改善.

#### 1.4 荧光屏传递函数

荧光屏的 MTF 可近似地表示为<sup>[1]</sup>

$$\text{MTF}_{\text{PS}}(f) = \exp[-(f/f_c)^{n_c}] \quad (5)$$

式中,  $(f_c, n_c)$  为特征参数. 在早期采用离心沉淀工艺的荧光屏,往往取  $(f_c, n_c) = (30, 1.1)$ ,对于目前的荧光屏工艺常用  $(f_c, n_c) = (46, 1.1)$ .

通常以 MTF 降低到 3% 或 5% 对应的频率  $f_m$  为极限频率,则荧光屏的极限分辨力为

$$f_m = f_c [-\ln(\text{MTF}_m)]^{1/n_c} \quad (6)$$

对于  $(46, 1.1)$  荧光屏的极限频率  $f_m$  分别约为  $125\ \text{lp/mm}$  (5%) 和  $144\ \text{lp/mm}$  (3%). 早期研究<sup>[5-6]</sup>认为荧光屏的极限分辨力远大于像增强器的分辨力,可忽略其影响.

#### 1.5 光纤面板的传递函数

与 MCP 类似,在忽略 FOP 通道离散效应条件下,以 FOP 单通道圆孔为响应函数,可得 FOP 的 MTF 为

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

式中,  $d_s$  为 FOP 单丝直径 ( $\mu\text{m}$ ),目前光纤面板  $d_s$  约为  $5\sim 6\ \mu\text{m}$ .

#### 1.6 防离子反馈膜的传递函数

防离子反馈膜是三代/超三代 GaAs 光阴极特有的部件,主要防止高速电子轰击 MCP 得到电子倍增时,产生的离子反向加速对光阴极材料的破坏.其在阻碍离子的同时也会带来高速电子穿过时的衰减和弥散.文献<sup>[12]</sup>研究了三代像增强器离子壁垒膜对成像质量的影响,给出传递函数为

$$\text{MTF}_i(f) = \exp[-(f/f_c)^2]; \quad f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\lambda'}{z^3}} \quad (8)$$

式中,  $\lambda'$  是电子散射平均自由程,  $z$  为膜厚.

一般认为,防离子反馈膜对成像的影响很小,带膜超三代像增强器分辨力可达无膜四代管分辨力的 94%. 若以三代像增强器分辨力  $60\ \text{lp/mm}$  计算,则防离子反馈膜的特征参数  $(f_c, n_c) = (241, 2)$ ,对应的极限分辨力约为  $450\ \text{lp/mm}$ . 故在现有技术状态下,防离子反馈膜的影响可忽略.

#### 1.7 近贴式像增强器的传递函数

综合光电阴极、前近贴电子光学、防离子反馈膜、MCP、荧光屏和光纤面板等环节,近贴式像增强器的传

递函数可表示为

$$\text{MTF}(f) = \text{MTF}_p(f) \cdot \text{MTF}_{\text{MCP}}(f) \cdot \text{MTF}_B(f) \cdot \text{MTF}_{\text{PS}}(f) \cdot \text{MTF}_{\text{FOP}}(f) \quad (9)$$

## 2 近贴像增强器 MTF 及其极限分辨力的分析

基于 1.7 节近贴式像增强器传递函数模型,结合典型的电学和结构参数,可以对像增强器的传递特性进行有效的理论分析.

### 2.1 超二代与超三代近贴像增强器 MTF 及其分析

假设像增强器的典型结构和电参数如表 1 (为了在图中区分 MCP 和 FOP 的传递特性,将 FOP 的通道直径  $d_s$  取为  $5.8\ \mu\text{m}$ ). 利用 1.7 节模型得到超二代和超三代像增强器及其各部件的 MTF 曲线,如图 2,图

表 1 典型超二代/超三代像增强器电学与结构参数  
Table 1 Typical super gen. II / super gen. III image intensifier's electrical and structural parameters

| Structure        | Parameters            | Super gen. II | Super gen. III |
|------------------|-----------------------|---------------|----------------|
| Front proximity  | $L_1/\text{mm}$       | 0.2           | 0.2            |
|                  | $\Phi_1/\text{V}$     | 300           | 400            |
|                  | $\epsilon_m/\text{V}$ | 0.25          | 0.5            |
| Back proximity   | $L_2/\text{mm}$       | 0.6           | 0.5            |
|                  | $\Phi_2/\text{V}$     | 6 000         | 5 000          |
|                  | $\epsilon_m/\text{V}$ | 5             | 5              |
| Ion barrier film | $(f_c, n_c)$          | —             | (241, 2.0)     |
| MCP              | $d_c/\mu\text{m}$     | 6             | 6              |
| FOP              | $d_s/\mu\text{m}$     | 5.8           | 5.8            |
| Screen           | $(f_c, n_c)$          | (46, 1.1)     | (46, 1.1)      |

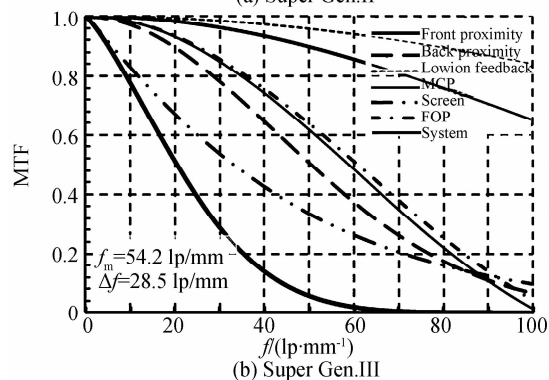
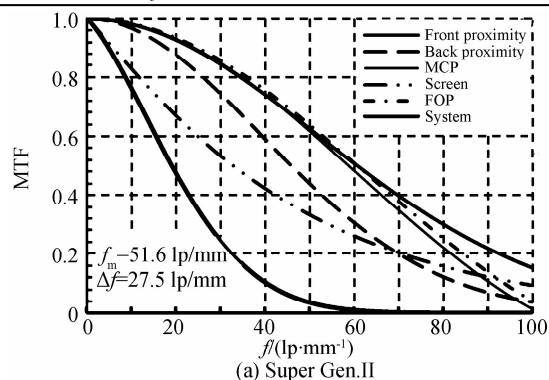


图 2 超二代和超三代像增强器及其部件的 MTF 曲线  
Fig. 2 Super gen. II and super gen. III image intensifier and these components' MTF curves

中  $f_m$  是整管 MTF 降低到 3% 对应的极限分辨率;  $\Delta f$  称为信道宽度 (lp/mm), 定义为

$$\Delta f = \int_0^{f_m} \text{MTF}_s^2(f) df \quad (10)$$

表示信息通过像管的能力, 数值越大成像质量越佳.

图 2 给出按照本文模型和表 1 参数计算的高性能超二代和超三代像增强器 MTF 曲线. 可以看出:

1) 在现有参数配置下, 虽然超二代与超三代像增强器的结构和电参量有一些差别, 但两者具有基本相近的 MTF 特性, 超二代的 MTF、极限分辨率  $f_m$  和信道宽度  $\Delta f$  均略低于超三代; 这与文献[3]超二代像增强器 XD-4 的典型 MTF 曲线大于超三代 OMNI IV/V 有所不同(如图 3).

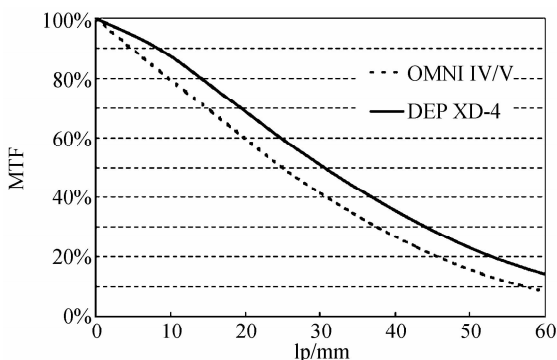


图 3 超二代与超三代像增强器 MTF<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Super gen. II and super gen. III image intensifier's MTF curves

2) 表 2 给出模型与实际超二代 XD-4、XR5 和超三代 F9800K 像增强器产品典型值<sup>[3-4, 13]</sup>的对比, 可以看出: ①F9800K 的 MTF 典型值与 XD-4 基本相当, 未呈现图 3 的差异, 只有 XR5 较 F9800K 存在明显的提升; 图 3 在典型频点的 MTF 明显大于产品典型值, 曲线趋势与产品极限频率  $f_m$  基本一致, 说明图 3 数据不完全准确; ②在小于 15lp/mm 的部分, MTF 计算值略大于 XD-4 和 F9800K 的产品典型值, 但在之后逐渐偏离并小于产品值, 且  $f_m$  低于典型值 64 lp/mm; 说明计算模型在中低频范围内基本符合产品值, 但在中高频范围内逐渐偏离并低于产品值.

表 2 像增强器性能测试与计算值的比较

Table 2 The comparison of image intensifier's performance test and calculated value

| Type $f/$<br>(lp · mm <sup>-1</sup> ) | Super gen. II |     |       | Super gen. III |       |
|---------------------------------------|---------------|-----|-------|----------------|-------|
|                                       | XD-4          | XR5 | Model | F9800K         | Model |
| 2.5                                   | 92            | 93  | 95.50 | 92             | 95.57 |
| 7.5                                   | 80            | 82  | 83.16 | 80             | 83.65 |
| 15                                    | 58            | 67  | 61.53 | 61             | 63.01 |
| 25                                    | 38            | 46  | 34.88 | 38             | 37.27 |
| 30                                    | 30            | 35  | 24.46 |                | 26.91 |
| $f_m/(lp \cdot mm^{-1})$              | 64            | 70  | 51.6  | 64             | 54.2  |

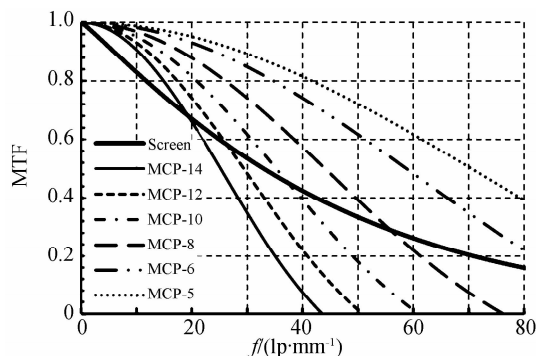


图 4 荧光屏和不同直径 MCP 的传递函数

Fig. 4 The MTFs of screen and MCP's of different diameters

3) 图 4 给出荧光屏以及 MCP 直径分别为 14、12、10、8、6 和 5 $\mu$ m 的部件 MTF 曲线, 在表 1 参数中只改变 MCP 直径的条件下, 超二代、超三代像增强器的 MTF 曲线如图 5 (图中表格给出 MCP 直径及其对应的极限分辨率), 前 4 种 MCP 直径对应的极限分辨率分别为 36、40、45 和 49 lp/mm, 基本对应二代、DEP 超二代/三代、国产超二代/Omni II 超三代和 Omni III 超三代像增强器情况; 6  $\mu$ m 的极限分辨率约为 51~55 lp/mm, 与国产高性能超二代 1XZ18/18HS 相当; 6  $\mu$ m 和 5  $\mu$ m 的极限分辨率均低于 DEP XD-4 和 Omni III Plus 以上的产品典型值<sup>[3-4, 13]</sup>. 对图 4 及极限分辨率的分析可推论: ①在 MCP 直径较大时, 荧光屏 MTF

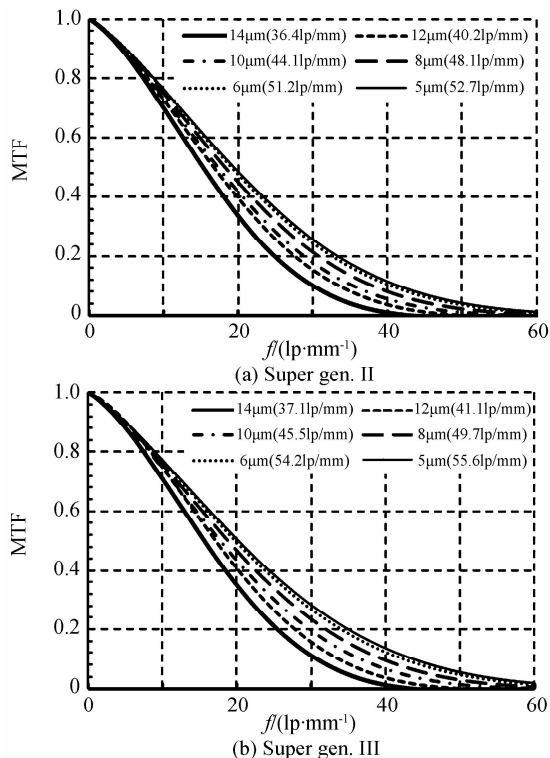


图 5 MCP 直径变化时超二代和超三代像增强器的 MTF 曲线

Fig. 5 Super gen. II and super gen. III image intensifier's MTF curves with MCP diameter's transformation

及其极限分辨力明显高于 MCP, 早期忽略荧光屏 MTF 对极限分辨力影响的观点<sup>[5]</sup>基本成立, 但是随着 MCP 直径小于  $8\ \mu\text{m}$  后, 在  $55\ \text{lp/mm}$  以下的频率范围内, 荧光屏 MTF 变为传递特性最差的环节(短板), 逐渐成为影响像增强器 MTF 及其极限分辨力的主要因素; ②按照目前荧光屏的模型和参数, MCP 直径从  $6\ \mu\text{m}$  降低到  $5\ \mu\text{m}$ , 对整管极限分辨力的提升不足  $2\ \text{lp/mm}$  即分辨力的改善已不明显, 这与目前的摸底实验情况基本一致。

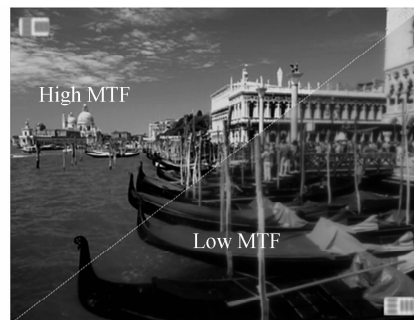
## 2.2 提升三代像增强器成像质量的技术途径分析

按照现有模型和参数, 仅靠 MCP 直径的减小难以将像增强器的极限分辨力提升到  $64\ \text{lp/mm}$  乃至  $70\ \text{lp/mm}$ , 常规的方法是通过减小前/后近贴的距离或提升加速电压实现, 但受工艺限制, 且由于此时前近贴的 MTF 并不是各环节中最低的环节, 因此, 整管极限分辨力的提升程度有限。例如, 在现有参数条件下, 将三代像增强器的前近贴距离由  $0.2\ \text{mm}$  分别减小到  $0.15\ \text{mm}$  和  $0.12\ \text{mm}$ , 则对应的整管极限分辨力只能分别提升到  $55.2\ \text{lp/mm}$  和  $55.9\ \text{lp/mm}$ , 信道宽度  $\Delta f$  分别提升到  $29.07\ \text{lp/mm}$  和  $29.33\ \text{lp/mm}$ 。那么, 针对业已实现的  $64\ \text{lp/mm}$  以上分辨力像增强器, 除了减小前/后近贴的距离或提升加速电压等措施外, 现有模型及其参数也可能存在偏差, 这些偏差在早期性能较低时对整管的性能影响并不显著, 而在目前高性能像增强器中则难以忽略, 需要进一步的研究和考证:

1) 由图 2 可见, 后近贴 MTF 也属于传递特性较差的环节, 但目前其模型最大初电位  $\epsilon_m$  取值  $5\ \text{V}$  需进一步考证, 若将  $\epsilon_m$  降低为  $1\ \text{V}$ , 则整管极限分辨力可达到  $60.7\ \text{lp/mm}$ (超三代) 和  $58.8\ \text{lp/mm}$ (超二代), 若进一步将 MCP 和 FOP 的直径减小到  $5\ \mu\text{m}$ , 则极限分辨力可达到  $65.7\ \text{lp/mm}$ (超三代) 和  $63.1\ \text{lp/mm}$ (超二代), 接近于典型产品值;

2) 虽然荧光屏模型的特征参数  $(f_c, n_c) = (46, 1.1)$  是目前分析中常用的模拟参数, 但从图 2 和图 4 的曲线中荧光屏 MTF 已成为“木桶定律”<sup>[14]</sup> 的短板, 因此, 提升荧光屏 MTF 性能成为提高像增强器性能的关键因素之一。注意到 DEP 公司<sup>[4]</sup> 曾专门探讨在极限

频率相同情况下, 高 MTF 和低 MTF 对应的微光图像差异(如图 6<sup>[3-4]</sup>), 而荧光屏是能使像增强器 MTF 曲线产生如此变化的主要环节之一, 这说明荧光屏的性能改善应是高性能像增强器工艺的一个重要环节。例如, 提高荧光屏的分辨力(即提高  $f_c$ ) 或者在与现有荧光屏极限分辨力(决定于荧光粉的颗粒度)基本一致的情况下提高  $n_c$ , 均可使像增强器的极限分辨力得到提高。因此, 应加强对高性能荧光屏的研究以及 MTF 的测试验证工作;



(a) The images of high/low MTF

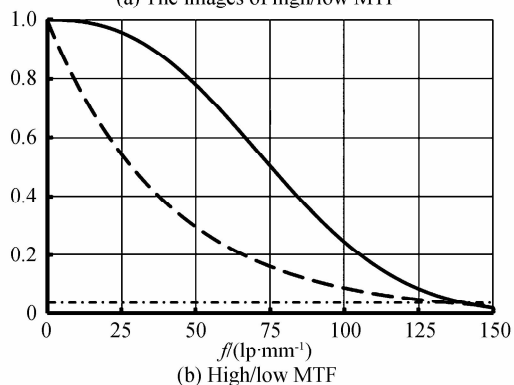


图 6 高/低 MTF 及其图像对比

Fig. 6 The comparison of high/Low MTF

3) 为了评价像增强器 MTF 分布的高与低, 可采用式(10)的信道宽度参量进行有效的评价。表 3 给出在荧光屏极限分辨力不变的条件下, 改变荧光屏 MTF 分布特征参数时超三代像增强器的极限分辨力和信道宽度计算值。可以看出: 虽然荧光屏极限分辨力未变, 但分布特征的变化也能够带来明显的像增强器极限分辨力和信道宽度的变化, 可有效提高系统的成像质量。

表 3 在表 2 中仅改变荧光屏参数时的超三代极限分辨力和信道宽度

Table 3 Resolution and channel width of Super gen. III with the change on the screen parameter in Table 2

| $(f_c, n_c)$                                | (41.07,1) | (46.00,1.1) | (50.62,1.2) | (54.86,1.3) | (58.77,1.4) | (62.39,1.5) | (65.74,1.6) | (68.84,1.7) | (71.72,1.8) |
|---|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $f_m/(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$      | 53.1      | 52.2        | 54.8        | 55.8        | 56.6        | 57.3        | 58.1        | 58.6        | 59.3        |
| $\Delta f/(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$ | 25.82     | 28.51       | 30.78       | 33.03       | 34.86       | 36.44       | 37.80       | 38.97       | 39.97       |

## 3 结论

本文在归纳总结像增强器及其部件 MTF 模型的基础上, 通过模拟计算结果与实际像增强器产品典型值的比较分析, 研究了影响像增强器 MTF 的模型参数

以及部件性能, 给出了提高系统性能的主要途径以及评价系统综合传递特性的 MTF 信道宽度, 并指出荧光屏 MTF 已成为影响高性能像增强器 MTF 和综合性能的主要因素, 应加强对荧光屏性能优化研究以及 MTF 分布特征、后近贴 MTF 模型的测试验证工作; 信

道宽度可以有效地描述像增强器 MTF 分布特性. 本文归纳的像增强器 MTF 模型以及相关的结论对于高性能像增强器的研制以及微光夜视系统的设计和分析具有理论指导意义.

诚然, 超三代像增强器的 Halo 效应<sup>[15]</sup> 以及图像处理<sup>[16]</sup> 对成像质量都具有一定的影响, 但目前其模型及其描述参量等均尚未建立, 难以对其影响效果进行有效描述, 这是下一步需要深入研究的内容.

#### 参考文献

- [1] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 周立伟. 微光成像技术的发展与展望, 《现代光学与光子学的进展—庆祝王大珩院士从事科研活动六十五周年专集》[M]. 红外与激光工程编辑部, 天津: 天津科学技术出版社, 2003, 316-339.
- [3] JIN Wei-qi, WANG Zhi-hong, LIU Guang-rong, *et al.* Image intensifier's progress and division of generations[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 460-463.  
金伟其, 王志宏, 刘广荣, 等. 微光像增强器的进展及分代方法[J]. 光学技术, 2004, **30**(4): 460-463.
- [4] BOSCH L A. Image intensifier tube performance is what matters[C]. SPIE, 2000, 4128: 66-78.
- [5] XIANG Shi-ming. Theoretical resolution limit of double-proximity focusing image intensifiers[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.
- [6] 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.  
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.
- [7] ZHOU Hong-quan, WANG Kui-lu, XIANG Shi-ming, *et al.* MTF measurement and analysis of micro-channel plate image intensifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 1983-1987.  
朱宏权, 王奎禄, 向世明, 等. 微通道板像增强器的调制传递函数的测量与研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 1983-1987.
- [8] YIN Hao, LIU Guang-rong, JIN Wei-qi, *et al.* Analysis of the resolving power of ICCD system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(S1): 96-100.  
阴浩, 刘广荣, 金伟其, 等. 像增强型 CCD 成像系统的分辨力分析[J]. 光子学报, 2010, **39**(S1): 96-100.
- [9] ZHOU Li-wei, AI Ke-cong, FANG Er-lun. Study of electron-optical modulation transfer function and root mean square radius in the photoelectronic image focusing systems[J]. *Journal of Beijing Institute Thehnology*, 1982, **2**(3): 36-51.  
周立伟, 艾克聪, 方二伦. 成像系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究[J]. 北京工业学院学报, 1982, **2**(3): 36-51.
- [10] ZHOU Li-wei, ZHNG Zhi-quan, NI Guo-qiang. On modulation transfer function of cathode lenses in image tube [C]. *Photoelectronic Image Devices*, 1991 The Institute of Physics Conference Series, 121, 405-419.
- [11] SONG Ke-chang. MTF Evaluation of double-proximity focusing image intensifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1985, **12**(3): 1-22.  
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.
- [12] LIU Qing-fei, YANG Bo, HU Bo. The effect of ion barrier film on the performance of third generation image intensifiers [J]. *Jichengdianlu Tongxun*, 2008, **26**(3): 14-16.  
刘庆飞, 杨博, 胡波. 离子壁垒膜对三代微光像增强器成像的影响[J]. 集成电路通讯, 2008, **26**(3): 14-16.
- [13] Image intensifier Generation 3 18-mm, MX-10160 (F9800 Series)[EB/OL]. www.exelisinc.com.
- [14] 西武. 木桶定律[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [15] REN Ling, SHI Feng, GUO Hui, *et al.* Effect of proximity pulse voltage on the third-generation low light image intensifiers halo effect[J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, **62**(1): 014206.  
任玲, 石峰, 郭晖, 等. 前近贴脉冲电压对三代微光像增强器 halo 效应的影响[J]. 物理学报, 2013, **62**(1): 014206.
- [16] DIJK J, VAN EEKEREN A W M, TOET A, *et al.* Evaluation of intensified image enhancement through conspicuity and triangle orientation discrimination measures [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(4): 041105.