

文章编号:1004-4213(2010)10-1729-5

# 磁镜阵列像增强器的调制传递函数研究\*

邵海阳<sup>1,2</sup>, 唐远河<sup>2,†</sup>, 华灯鑫<sup>1</sup>

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 西安理工大学 理学院, 西安 710048)

**摘 要:**基于三代近贴式像增强器,设计了磁镜阵列装置的结构,从理论上计算了该装置的调制传递函数以及将其引入像增强器后整体的调制传递函数,以此来分析对成像质量的影响.通过对实际参量绘制的调制传递函数曲线分析,得出磁镜阵列装置在 X、Y 方向的极限分辨率分别为 117 lp/mm、121 lp/mm,奈奎斯特频率处的调制传递函数值分别为 0.55、0.59,同时磁镜阵列像增强器的极限分辨率也分别达到了 87 lp/mm、89 lp/mm,相应的奈奎斯特频率处的调制传递函数值为 0.49 和 0.52.结果表明 X 和 Y 方向的调制传递函数曲线之间差异较之磁镜阵列装置变小,这对保证成像质量起到了积极的作用.文章为进一步深入研究磁镜阵列像增强器提供了重要的理论依据.

**关键词:**成像系统; 调制传递函数; 磁镜; 夜视技术

**中图分类号:** TN144

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103910.1729

## 0 引言

进几十年来,光电成像技术的迅猛发展在微光夜视领域中得到了充分的体现.为了提高微光探测能力和成像质量,先后出现了多种新型的技术手段:如 CCD 的长时间曝光<sup>[1]</sup>、多像素合并的 Binning 技术<sup>[2]</sup>以及积分延迟 CCD (Time Delay and Integration CCD, TDICCD) 技术<sup>[3]</sup>实现了对光子信号的积累;背照型 CCD (Back-Illuminated CCD, BCCD)<sup>[4]</sup>和电子轰击型 CCD (Electron Bombardment CCD, EBCCD)<sup>[5]</sup>则通过高量子效率提高了对微弱信号的摄取能力;片上电子倍增的技术也使得电子倍增型 CCD (Electron Multiplying CCD, EMCCD)<sup>[6]</sup>成为了最近被广泛关注的新型器件;而像增强型 CCD (Intensified CCD, ICCD)<sup>[7-8]</sup>也凭借着像增强器的更新换代在夜视技术中占据了一席之地.我们课题组在前期研究工作中提出了将核聚变所使用的磁镜装置引入像增强器<sup>[9]</sup>,通过合理的设计实现对电子的长时间约束,来取代通常所采用的对光子进行长时间积分的手段,从而实现常温下进一步提高微光探测能力的目的.本文所提出的磁镜阵列装置<sup>[10]</sup>,通过改变磁镜结构和电子的入射方式来改善逃逸概率对磁镜约束能力所产生的影响.鉴于调制传递函数 (Modulation Transfer

Function, MTF) 是评判成像仪器像质的主要评判标准之一,本文对磁镜阵列装置及应用到像增强器后的 MTF 进行计算和分析,为这一新型技术的进一步应用提供理论依据.

## 1 改进型磁镜阵列装置的结构

### 1.1 磁镜阵列装置

磁镜是一种中间弱、两端强的特殊磁场位形,其最简单的形式之一是两个磁场方向相同且间隔一段距离平行放置的永磁环所构成的磁镜场,通过缓变磁场中的磁矩守恒效应来约束电子.当磁场随时间和空间缓变时,磁场中电子的磁矩大小为一常量,电子磁矩大小为<sup>[11]</sup>

$$\mu = m v_{\perp}^2 / 2B \quad (1)$$

式中是  $v_{\perp}$  垂直于磁场方向电子的横向速度,  $m$  为电子质量,  $B$  为磁感应强度.由于洛伦兹力对电子不做功,因此从磁镜中部入射的电子,其总能量守恒,即横向动能和平行于磁场方向的纵向动能之和不变.当电子在磁镜场中运动时,磁场  $B$  的变化导致横向动能不断变化,从而导致横向与纵向动能互相转化,电子轨迹也就形成了类似“反射”现象的运动,这称之为“磁镜”.

本课题组的前期研究中提出了一种“微通道电子平板”装置<sup>[12]</sup>,耦合入像增强器中,以期达到在常温下提高微光探测能力的目的.在该装置中,电子从磁镜的“磁喉”处入射,导致电子逃逸概率较大.本文基于这一缺陷对该装置提出了改进方案——磁镜阵列装置,使电子能够像核聚变中所采用的磁镜原理

\* 国家自然科学基金(10874138)、陕西省教育厅科学研究计划项目(09JK653)和西安理工大学联合基金项目资助

† Tel: 029-82066357

Email: ltp1801@163.com

收稿日期: 2010-02-01

修回日期: 2010-03-26

一样,从磁镜中部入射,也即入射方向与磁力线保持垂直或很小的夹角,这种入射方式能将逃逸概率降至最低<sup>[13]</sup>.为了与后续部件微通道板、光锥及 CCD 相匹配,并尽量降低对成像系统空间分辨率产生的影响,我们将磁镜阵列装置设计为二维栅状面阵结构,通过改变磁镜结构和电子入射方式来改善逃逸概率对磁镜约束能力所产生的影响<sup>[12]</sup>.同时,考虑到电子在外加电场中的锐聚焦特性,通过分析和计算模拟,当电压满足一定条件时,出射电子的轨迹和角度分布能够被控制在合理的范围内,同时也能够间接地增加微通道板(Microchannel Plate, MCP)的二次电子发射系数<sup>[14]</sup>.

图 1 是本文提出的磁镜阵列装置示意图.将永磁片切割成栅状,横向充磁并打孔,上下两端用抗磁性材料固定(例如铜),前后端面各镀一层渗透电极,电极与栅状永磁体之间设置有陶瓷制成的绝缘垫圈,以便在积累时间充分后可以将电子引出,每一组横向小孔排列在同一条轴线上,这样构成了栅状且整齐排列的微小磁镜阵列,每一微小磁镜单元的限度由小孔孔径及相邻孔间距的大小控制,理想情况

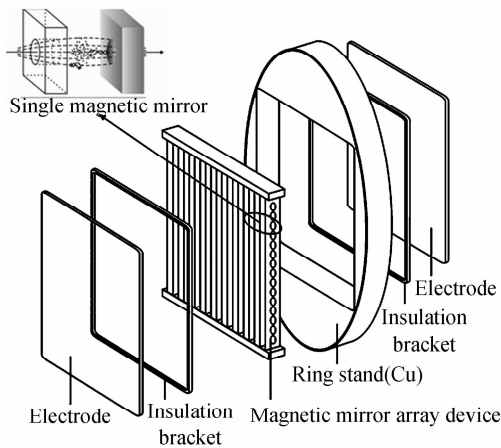


图 1 磁镜阵列装置结构示意图  
Fig. 1 Sketch of magnetic mirror array device

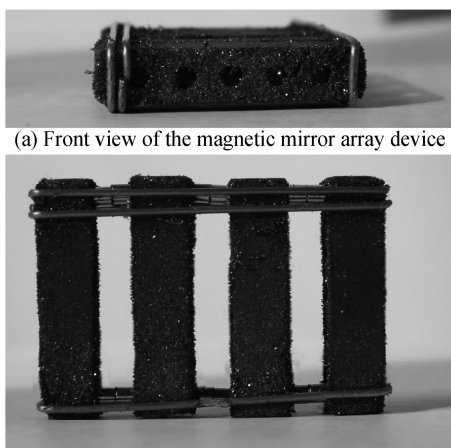


图 2 大孔径磁镜阵列装置实物图  
Fig. 2 Large aperture magnetic mirror array device

下可以达到每个磁镜单元与微通道板的各个微通道一一对应.图 2 是本文所制作的大孔径磁镜阵列装置实物图.

### 1.2 磁镜阵列像增强器

基于三代近贴式像增强器,本文提出在光电阴极与 MCP 之间耦合磁镜阵列装置<sup>[15]</sup>,采用了三近贴设计,使用近贴聚焦电子光学系统实现耦合,这样的设计能尽可能减少像差,但是图像 1:1 的缩放比不可调.使用磁镜阵列装置对负电子亲合势光电阴极逸出的光电子进行约束积累,并通过加在两端的透明电极将积累后的光电子引出,入射至带有防离子反馈膜的 MCP,从而实现将微光探测极限的进一步提高.图 3 为本文设计的三代近贴式磁镜阵列像增强器的内部结构示意图.

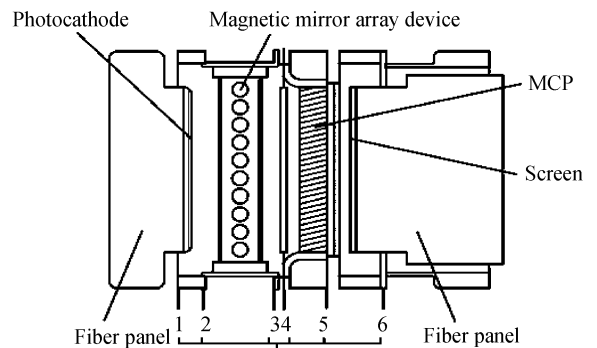


图 3 三代近贴式磁镜阵列像增强器的内部结构  
Fig. 3 Internal sketch of the 3th generation proximity magnetic mirror array image intensifier

## 2 磁镜阵列装置的 MTF

图 3 为磁镜阵列像增强器的核心部件由 4 部分组成:光电阴极、磁镜阵列装置、MCP 和荧光屏.根据线性不变光学成像系统的规律,该像增强器的 MTF 应由四个部分的 MTF 所组成的调制传递函数链之积来表示,下面分别计算各部分的 MTF.

### 2.1 磁镜阵列装置的 MTF

本文所提出的磁镜阵列装置的 MTF 计算模型可以简化为图 4 的模型.

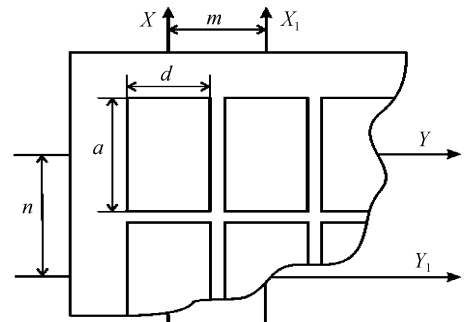


图 4 磁镜阵列装置的 MTF 计算模型  
Fig. 4 MTF calculation model of magnetic mirror array device

磁镜阵列装置作为线性不变成像系统中的一个部件,其  $MTF$  的计算可以分解为多个矩形“光敏面”来处理,即一个光敏面代替一个磁镜单元,其尺寸为  $a \times d$ ,则单个光敏面的脉冲响应函数为

$$t(x, y) = \text{rect} \left( \frac{x}{d}, \frac{y}{a} \right) \quad (2)$$

将式(2)进行傅里叶变换并归一化,从而得到磁镜阵列装置单个“光敏面”的  $MTF_{m\text{-sin}}$

$$MTF_{m\text{-sin}} = |p(f_x, f_y)| = \left| F \left\{ \text{rect} \left( \frac{x}{d}, \frac{y}{a} \right) \right\} \right| = |\text{sinc}(df_x, af_y)| \quad (3)$$

式中  $f_x$  和  $f_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的空间分辨率. 整个磁镜阵列装置,需要在光阴极像面上采样,  $X$  轴两个光敏面相距  $m$ ,  $Y$  轴相距  $n$ ,用函数表示为

$$\text{samp}(x, y) = \text{rect} \left( \frac{x}{m}, \frac{y}{n} \right) \quad (4)$$

将式(4)进行傅里叶变换并归一化,从而得采样传递函数的  $MTF_{\text{samp}}$

$$MTF_{\text{samp}} = |p(f_x, f_y)| = |F\{\text{samp}(x, y)\}| = |\text{sinc}(mf_x, nf_y)| \quad (5)$$

则磁镜阵列装置的  $MTF_m$  为单个磁镜矩形“光敏面” $MTF_{m\text{-sin}}$  与采样传递函数  $MTF_{\text{samp}}$  的乘积,也即式(3)与式(5)的乘积

$$MTF_m = MTF_{m\text{-sin}} MTF_{\text{samp}} = |\text{sinc}(df_x, af_y)| \cdot |\text{sinc}(mf_x, nf_y)| \quad (6)$$

由此可见,  $X$  和  $Y$  轴方向的  $MTF$  并不相同.

## 2.2 磁镜阵列像增强器的 $MTF$

磁镜阵列像增强器中另外 3 个部件的  $MTF$  可以根据计算分别获得,具体为:

光阴极的  $MTF_p$  由本身的  $MTF_{p0}$  和电子出射表面的电子光学系统的  $MTF_{e1}$  共同决定. 其中光阴极中的光电子在体内运输过程中横向扩散造成的  $MTF$  下降非常小,其理论极限分辨力可达 1 000 lp/mm 以上<sup>[16]</sup>,因此光阴极本身的  $MTF_{p0}$  比像增强器中其他部件高出很多,本文计算不考虑它的影响. 电子光学系统又分为静电聚焦和近贴聚焦两大类,本文所设计磁镜阵列像增强器采用的是近贴聚焦方式,该方式实际上是投射成像,其像差主要由弥散斑造成,因此,该近贴聚焦电子光学系统的  $MTF_e$  与前后部件的近贴距离以及工作电压有关,近贴距离愈近,工作电压越高,电子在飞行过程中的横向扩展越少,  $MTF_e$  会越高. 从而得到  $MTF_p$  的表达式为

$$MTF_p = MTF_{p0} MTF_{e1} = \exp(-16.4D_1^2/U_1) \quad (7)$$

式中  $D_1$  为光阴极与磁镜阵列装置的近贴距离,  $U_1$  为近贴电压.

微通道板的  $MTF_{MCP}$  可以表示为<sup>[17]</sup>

$$MTF_{MCP} = 2J_1(2\pi fs)/2\pi fs \quad (8)$$

式中  $f$  为空间频率,  $s$  为单丝直径,  $J_1$  为一阶贝氏函数.

荧光屏的  $MTF_s$  与光电阴极类似,也由两部分组成:本身的  $MTF_{s0}$  和近贴聚焦电子光学系统的  $MTF_{e2}$ . 荧光屏调制度受荧光粉层厚度、工艺及结构的影响,会使光在传输过程中出现横向散射,导致分辨率下降,但对于目前粉粒度为 3  $\mu\text{m}$  和厚度为 4  $\mu\text{m}$  的荧光屏,其极限分辨率能达到 235 lp/mm<sup>[15]</sup>,远高于像增强器中其他部件,因此其对整体分辨率的影响可以忽略不计,则  $MTF_s$  可表示为

$$MTF_s = MTF_{s0} MTF_{e2} = \exp(-16.4D_2^2/U_2) \quad (9)$$

式中  $D_2$  为 MCP 与荧光屏的近贴距离,  $U_2$  为近贴电压,  $MTF_{e2}$  为近贴荧光屏的电子光学系统调制传递函数.

将式(6)、(7)、(8)和式(9)相乘,就能够得到磁镜阵列装置整体的调制函数传递链表达式

$$MTF_{\text{samp}} = MTF_p MTF_{MCP} MTF_m MTF_s = \exp \left[ -16.4 \left( \frac{D_1^2}{U_1} + \frac{D_2^2}{U_2} \right) \right] |\text{sinc}(df_x, af_y)| \cdot |\text{sinc}(mf_x, nf_y)| \frac{J_1(2\pi fs)}{\pi fs} \quad (10)$$

## 3 计算结果及分析

选择三代像增强器的实际参量进行数值模拟,选近贴距离  $D_1 = 0.3 \text{ mm}$  和电压  $U_1 = 800 \text{ V}$ ,  $D_2 = 0.6 \text{ mm}$  和  $U_2 = 6\,000 \text{ V}$ ;考虑到磁镜阵列装置整体面积中被支架占去一部分,因此像增强器直径和微通道板选择面积都选择较大的型号,如北方夜视公司所生产的 M33/6/ $\Phi$ 26,单丝直径  $s = 6 \mu\text{m}$ ,丝芯距 8  $\mu\text{m}$ ;要提高磁镜阵列装置约束电子的能力,就必须加大尺寸,但为了尽可能不降低整管的分辨率,其矩形孔尺寸不能大于 MCP 的单丝直径,单个磁镜单元在  $X$  方向是没有间距,但可通过调节圆孔使得约束电子的有效尺度与 MCP 的单丝直径基本一致,因此其尺寸  $a$  和  $n$  可选择为 6  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ ,而  $Y$  方向的尺寸因为栅状的设计,一部分面积被永磁条所占用来提供约束电子的磁场,经计算永磁条的宽度与缝隙的比值为 1:1 时比较理想,若取  $m = 8 \mu\text{m}$ ,则  $d$  需选择 4  $\mu\text{m}$  的尺寸.

图 5 为磁镜阵列装置的  $MTF_m$  曲线. 经计算,  $MTF_m = 0.03$  时  $X$  和  $Y$  方向对应的极限分辨率分别为 117 lp/mm 和 121 lp/mm,在奈奎斯特频率处  $MTF$  值分别为 0.55 和 0.59,但  $X$ 、 $Y$  方向上  $MTF$  变化差异较明显.

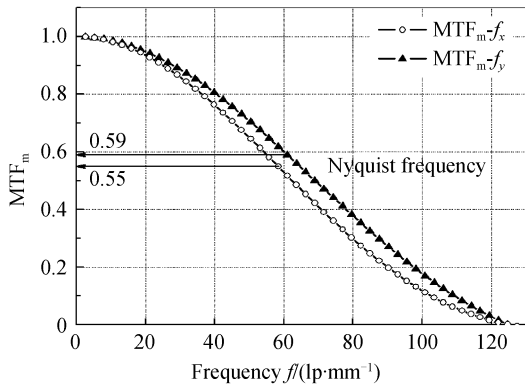


图5 磁镜阵列装置在 X 和 Y 方向的  $MTF_m$

Fig. 5  $MTF_m$  of magnetic mirror array device in the direction of X and Y respectively

图6为磁镜阵列像增强器的MTF曲线。经计算,其X和Y方向的极限分辨率有所下降分别为87 lp/mm和89 lp/mm,奈奎斯特频率处的MTF值也有一定程度的下降,分别达到0.49和0.52。多级系统MTF传递链级联的乘积关系是导致整体MTF下降的主要原因,但对比图5、6可以看出,也正是由于多个部件耦合导致X和Y方向的MTF曲线差异变小,这对保证成像质量起到积极作用。从MTF曲线以及理论上的极限分辨率看,加入磁镜阵列装置后的像增强器对成像带来的影响并不大,能够满足现有像增强器的要求。

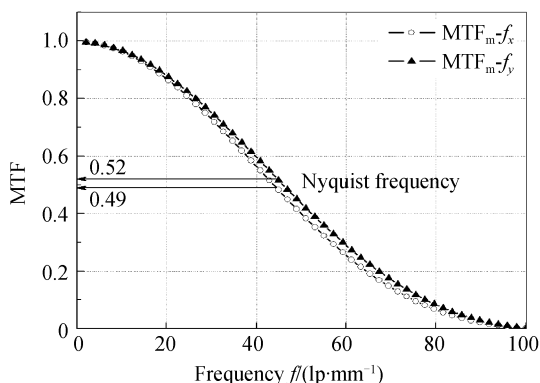


图6 磁镜阵列像增强器在 X 和 Y 方向的 MTF

Fig. 6 MTF of magnetic mirror array image intensifier in the direction of X and Y respectively

## 4 结论

文章提出了磁镜阵列像增强器这一新型微光成像探测器件,并根据磁镜阵列装置的结构计算了该装置的  $MTF_m$  及其引入像增强器后的整体MTF,代入实际参量得到MTF曲线以及极限分辨率,结果表明:

1)磁镜阵列装置在X和Y方向的极限分辨率分别为117 lp/mm和121 lp/mm,奈奎斯特频率处的MTF值分别为0.55和0.59,但X和Y方向的MTF变化差异较明显;

2)磁镜阵列像增强器在X和Y方向的极限分辨率有所下降,分别为87 lp/mm和89 lp/mm,奈奎斯特频率处的MTF值也有一定程度的下降,分别为0.49和0.52,但X和Y方向的MTF曲线差异变小,这对保证成像质量起到积极的作用。

通过对MTF的计算和分析表明本文对磁镜阵列装置的设计可以满足像增强器对分辨率的要求。但作为一个新型的成像器件,磁镜阵列装置的制作不但要考虑分辨率的影响,还要考虑到其磁场的强度和位形分布、约束电子的能力以及永磁体加工工艺等本身的特性,也要考虑将其引入像增强器后所带来的噪音及配置不同电压等因素对像管整体的影响,加入这些因素后,整体MTF值会相应下降。本文所做的MTF分析为下一步研究工作提出了问题和方向,也为磁镜阵列像增强器的进一步发展提供了重要的理论依据。

## 参考文献

- [1] DU Yun-fei, LIU Bo, HU Bing-liang, *et al.* Precision control technology of exposure time for Full-Frame CCD digital camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 1025-1028.  
杜云飞, 刘波, 胡炳樑, 等. 全帧型CCD数码相机曝光时间的精确控制[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 1025-1028.
- [2] ZHOU Z, PAIN B, FOSSUM E R. Frame-transfer CMOS active pixel sensor with pixel binning [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1997, **44**(6): 1764-1768.
- [3] ASUNDI A, SAJAN M R. Dynamic recording using a TDI camera [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(34): 8102-8105.
- [4] ROBERT K R. Sub-poisson statistics observed in an electronically shuttered and back-illuminated CCD pixel [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1997, **44**(1): 69-73.
- [5] WILLIAMS G M, RHEIHEIMER A L, AEBI V W, *et al.* Electron-bombarded back-illuminated CCD sensors for low-light-level imaging applications [C]. *SPIE*, 1995, **2415**: 211-235.
- [6] EMCCD; <http://www.emccd.com/>
- [7] ZOU Ji-jun, CHEN Huai-lin, CHANG Ben-kang, *et al.* Study of relation between surface electron escape probability of GaAs photocathode and incident photon wavelength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1400-1403.  
邹继军, 陈怀林, 常本康, 等. GaAs光电阴极表面电子逸出概率与波长关系的研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1400-1403.
- [8] SAARA K, HEIKKI H, JOUKO K T. Laser-induced plasma spectroscopy to as low as 130 nm when a gas-purged spectrograph and ICCD detection are used [J]. *Appl Opt*, 2003, **42**(30): 6036-6039.
- [9] DU Yu-fei, TANG Yuan-he, LIU Kai, *et al.* Study of the magnetic mirror device to enhance the photoelectrons accumulation time [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1973-1979.  
独育飞, 唐远河, 刘楷, 等. 基于增加光电子积分时间的磁镜装置研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1973-1979.
- [10] GAO Hai-yang, TANG Yuan-he, LIU Kai, *et al.* A image intensifier of improving the detect performance of low-light-level imaging systems at room temperature [P]. *China Invention Patent Number*: ZL200810150762. 4, Authorization Day: 2010. 2. 4.

- 郜海阳,唐远河,刘锴,等.一种常温下提高微光成像系统探测性能的像增强器[P].发明专利号:ZL200810150762.4,授权日:2010.2.4.
- [11] YAO Ruo-he, WU Wei-jing, ZHANG Xiao, *et al.* Numerical simulation of charged particles motion in magnetic field confinement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **24**(2): 105-108.
- 姚若河,吴为敬,张晓,等.磁镜场约束中粒子运动的数值计算[J].物理学报,2004,**24**(2):105-108.
- [12] TANG Yuan-he, DU Yu-fei, LIU Kai, *et al.* An image intensifier of improving the low-light-level detect performance of imaging systems[P]. *China Invention Patent Number*: ZL200710017276.0.
- 唐远河,独育飞,刘锴,等.一种提高成像系统微光探测性能的像增强器[P].发明专利号:ZL200710017276.0.
- [13] LIU Hong-xiang, WEI He-lin, LIU Zu-li, *et al.* Effect of the magnetic mirror field on the ion energy distributions in a radio frequency plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(9): 1764-1768.
- 刘洪祥,魏合林,刘祖黎,等.磁镜场对射频等离子体中离子能量分布的影响[J].物理学报,2000,**49**(9):1764-1768.
- [14] TANG Yuan-he, GAO Hai-yang, DU Yu-fei, *et al.* The electron's velocity direction through the magnetic mirror field for the low-light imaging system[C]. *SPIE*, 2008, **6621**(21): 1-11.
- [15] TANG Yuan-he, YANG Xu-san, LIU Kai, *et al.* A partial gated low-light-level detector at room temperature based on the 3th generation proximity image intensifier[P]. *China Invention Patent Number*: ZL200810232002.8.
- 唐远河,杨旭三,刘锴,等.基于三代近贴式像增强器在常温下局部选通的微光探测器[P].发明专利号:ZL200810232002.8.
- [16] XIANG Shi-ming. Theoretical resolution limit of double-proximity focusing image intensifiers[J]. *J Appl Opt*, 2003, **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.
- [17] ZHU 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.

## MTF of Magnetic Mirror Array Image Intensifier

GAO Hai-yang<sup>1,2</sup>, TANG Yuan-he<sup>2</sup>, HUA Deng-xin<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The structure of the magnetic mirror array device is designed. The modulation transfer function (MTF) of this device is calculated as well as that of magnetic mirror array image intensifier. The limiting resolutions of 117 lp/mm and 121 lp/mm of the magnetic mirror array device, by means of the analysis of MTF curves with the actual parameters, are obtained at X and Y directions in which the Nyquist frequencies are 0.55 and 0.59 respectively; while the limiting resolutions of magnetic mirror array image intensifier based on this device are 87 lp/mm and 89 lp/mm, and the corresponding Nyquist frequencies are 0.49 and 0.52 respectively. The results show that the difference between two curves at X and Y directions can be reduced to ensure better image quality. The calculation of this research provides an important theoretical basis for further research on the magnetic mirror array image intensifier.

**Key words:** Imaging systems; Modulation transfer function; Magnetic mirror; Night-vision technology



**GAO Hai-yang** was born in 1984. Now he is a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology and his current research interests focus on the low-light level detection and remote sensing of upper atmospheric wind field.



**TANG Yuan-he** was born in 1965. Now she is a professor at School of Science, Xi'an University of Technology, and she received the Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University. Her research interests focus on the low-level light detection and remote sensing of upper atmospheric wind field.