

doi:10.3788/gzxb20174611.1123004

# 像增强器在高速成像应用中的高重频特性

刘璐, 郭明安, 严明, 李刚, 杨少华, 宋岩, 高帅

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:**为了解决像增强器在高重频下的成像应用问题,建立了像增强器高重频特性成像实验平台,并开展了 ICCD 相机双帧成像与曝光时间、双帧延迟时间之间关系的实验研究.实验结果表明 ICCD 相机第二帧成像问题是由第一帧曝光时像增强器饱和造成的,增大 CCD 的 AD 采样增益可避免灰度值反转现象和“浮雕”效应.本文研究可为像增强器在高重频条件下的成像应用提供理论和实验依据.

**关键词:**门控型像增强器;ICCD 相机;高重频;双帧成像

中图分类号:TN29

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1123004-5

## High Repetition Frequency Characteristics of Image Intensifier in High-speed Imaging Application

LIU Lu, GUO Ming-an, YAN Ming, LI Gang, YANG Shao-hua, SONG Yan, GAO Shuai

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** To solve these gray reversal and embossing effect problems, an imaging experiment platform for studying high repetition frequency character of image intensifier was set up. Experimental research was made on the relationship between the double-frame imaging and system parameter like exposure time and delay time. Experimental results show that the problems of the second frame were caused by the saturation of the first frame, and the generation principle of gray reversal and embossing effect was analyzed. By increasing the gain of AD sampling the gray reversal and embossing effect problems were solved. The results of this paper provide theoretical and experimental basis for the imaging application of image intensifier at high repetition frequency.

**Key words:** Gated image intensifier; ICCD camera; High repetition frequency; Double-frame imaging

**OCIS Codes:** 230.0230; 110.2970; 110.3055; 040.5160

## 0 引言

高速成像技术是研究高速运动过程的一种方法,已经成为爆轰效应、高速碰撞和等离子体实验等研究领域的重要光学测试手段<sup>[1]</sup>.门控像增强器是高速成像设备的关键器件之一,它具有  $10^2 \sim 10^5$  的光增益,可以补偿耦合光能损失,起到光增益的作用.同时像增强器的开门时间相对于 CCD(或 CMOS)相机的高速机械快门装置要快 2~3 个数量级,因此,高速成像设备主要使用门控像增强器作为光快门选通器件<sup>[2]</sup>.

像增强器与 CCD 相机耦合组成的成像设备称之为 ICCD(Image-intensified Charge-Coupled Device)相机,受 CCD 像素电荷读出时间的限制,ICCD 相机的帧频率在全分辨率条件下往往只能达到几十帧每秒,因此 ICCD 相机应用于高速成像领域往往只能获取一幅瞬态图像,即像增强器只需开门一次.基于超高速双帧图像获取方法<sup>[3]</sup>,并配合像增强器快速开关两次门,本课题组研制的 ICCD 相机能够一次获取百纳秒时间间隔的两帧图像.实验发现,像增强器在高重频条件下获取到的第二帧图像出现灰度值反转(即部分亮的区域变暗,暗的区域变亮)和“浮雕”效应(即图像目标边界增强造成的视觉效果)等现象,这就需要对像增强器的高重频成像特性进行研究.

目前,针对像增强器的研究包括像增强器性能参数的研究<sup>[4-5]</sup>、开门时间特性的研究<sup>[6-7]</sup>及其性能测试系

基金项目:国家自然科学基金(No.11475138)资助

第一作者:刘璐(1990-),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为高速成像方法和高速图像处理等. Email:liulu@nint.ac.cn

收稿日期:2017-02-08;录用日期:2017-05-10

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

统的研究<sup>[8-9]</sup>等,但是很少有文章报道像增强器在高重频条件下的成像应用.本文基于 ICCD 相机开展像增强器的高重频成像应用研究,针对出现的问题建立了像增强器高重频特性实验平台并开展了相应的成像实验,研究分析图像灰度值反转和“浮雕”效应等问题产生的原理,并给出相应的解决方案.

## 1 像增强器高重频成像应用及问题

CCD 相机采用双帧采集技术,它的技术原理是 CCD 相机进行两次曝光,然后将两次产生的光生电荷分别存储在垂直寄存器和光敏区像素中,最后再连续输出这两帧图像.采用该技术第一帧图像的曝光时间是可控的,而第二帧图像的曝光时间由第一帧图像数据的读出时间决定,两帧图像的时间间隔由第一次曝光的光生电荷转移至垂直寄存器的时间有关.像增强器通过光锥与 CCD 相机进行耦合组成 ICCD 相机,这样相机的两次曝光时间可由像增强器的导通或阻断来实现,在应用过程中,获取到的图像如图 1 所示.

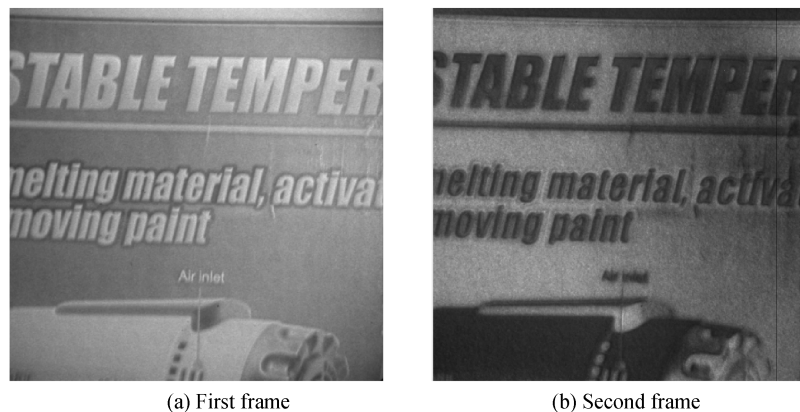


图 1 ICCD 相机采集到的两帧图像对比

Fig.1 Comparison of two frames acquired by the ICCD camera

可以看出图像第一帧是正常的,而图像第二帧存在“浮雕”效应和灰度值反转等问题,灰度值反转是第一帧图像中较亮的区域(如字母区域),在第二帧图像中反而较暗,而第一帧中较暗的区域(如背景区域),在第二帧图像中反而较亮,就好像是图像的灰度大小做了反转变换;其中“浮雕”效应即是图中字母等图案的边界信息得到了增强,使图像出现视觉上的立体效果.

## 2 像增强器高重频特性试验平台

为了解决 ICCD 在双帧图像采集时出现的问题,需要对像增强器的高重频成像特性进行研究,为此搭建了像增强器高重频成像实验平台,平台由 ICCD 相机、图像采集电路、同步控制电路、脉冲氙灯、电脑等组成,平台结构如图 2.

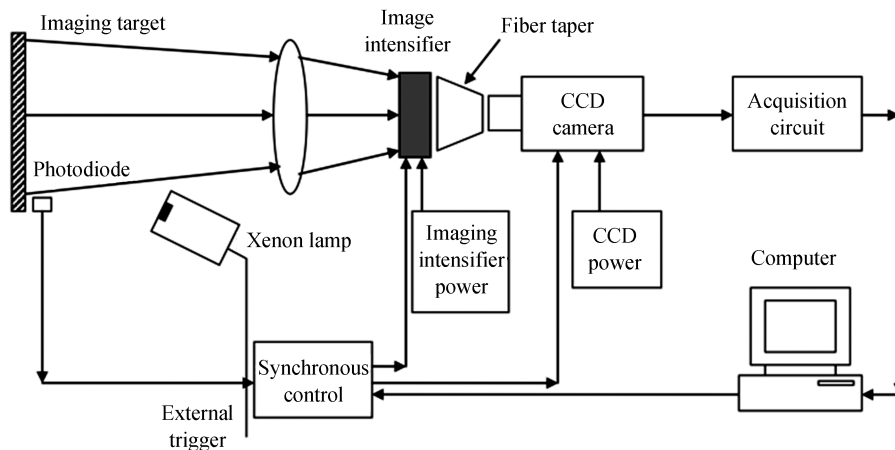


图 2 像增强器高重频成像实验平台结构

Fig.2 Structure of high repetition frequency imaging experiment of image intensifier

其中,ICCD 相机采用的是快衰减余晖的像增强器,像增强器的两次开门时间由电脑通过同步控制电路进行控制;CCD 相机为自研相机,其像素数为  $1\,024 \times 1\,024$ ,图像数据垂直分辨率为 16 bit,采用双帧曝光技术两帧图像的时间间隔最小为  $5\ \mu\text{s}$ . 脉冲氙灯的作用是增强像增强器开门时间内的曝光量,使目标图像不会太暗,氙灯触发一次的发光持续时间(从开始触发到发光强度降为峰值的 10% 为止)约为  $60\ \mu\text{s}$ ,其发光曲线如图 3.

整个测试实验系统的运行原理是:首先通过电脑设置 ICCD 相机的两帧曝光时间、两帧延迟时间等相关参数,然后触发外触发使氙灯开始发光,光电管将光信号转换为触发电信号并传输给同步控制电路,同步控制电路在触发电信号到来后,根据电脑预设的参数值来控制像增强器开关门、CCD 相机开始曝光等状态,从而完成 ICCD 成像系统对测试目标的双帧图像采集.

### 3 实验结果及分析

研究第一帧曝光量对第二帧图像的影响,由于氙灯的发光特性是一定的,在实验中,通过改变第一帧图像的曝光时间来改变其曝光量.设置两帧延迟时间为  $5\ \mu\text{s}$ ,第二帧的曝光时间为  $1\ \mu\text{s}$ ,第一帧曝光时间从  $100\ \text{ns}$  依次增加到  $1\,500\ \text{ns}$ (步进  $100\ \text{ns}$ ),分别取第一帧曝光时间  $100\ \text{ns}$ 、 $500\ \text{ns}$ 、 $1\,000\ \text{ns}$ 、 $1\,500\ \text{ns}$  对应的两帧图像如图 4,图中右下角数字表示的是第一帧的曝光时间.从图中可以看出,在第一帧曝光  $100\ \text{ns}$  时,系统获取的第二帧图像是正常的;在  $500\ \text{ns}$  时,第二帧图像已经出现“浮雕”效应,同时第二帧图像对比度下降;在  $1\,000\ \text{ns}$  和  $1\,500\ \text{ns}$  时,第二帧部分暗的区域亮度已经大于背景亮区域,出现灰度值反转.

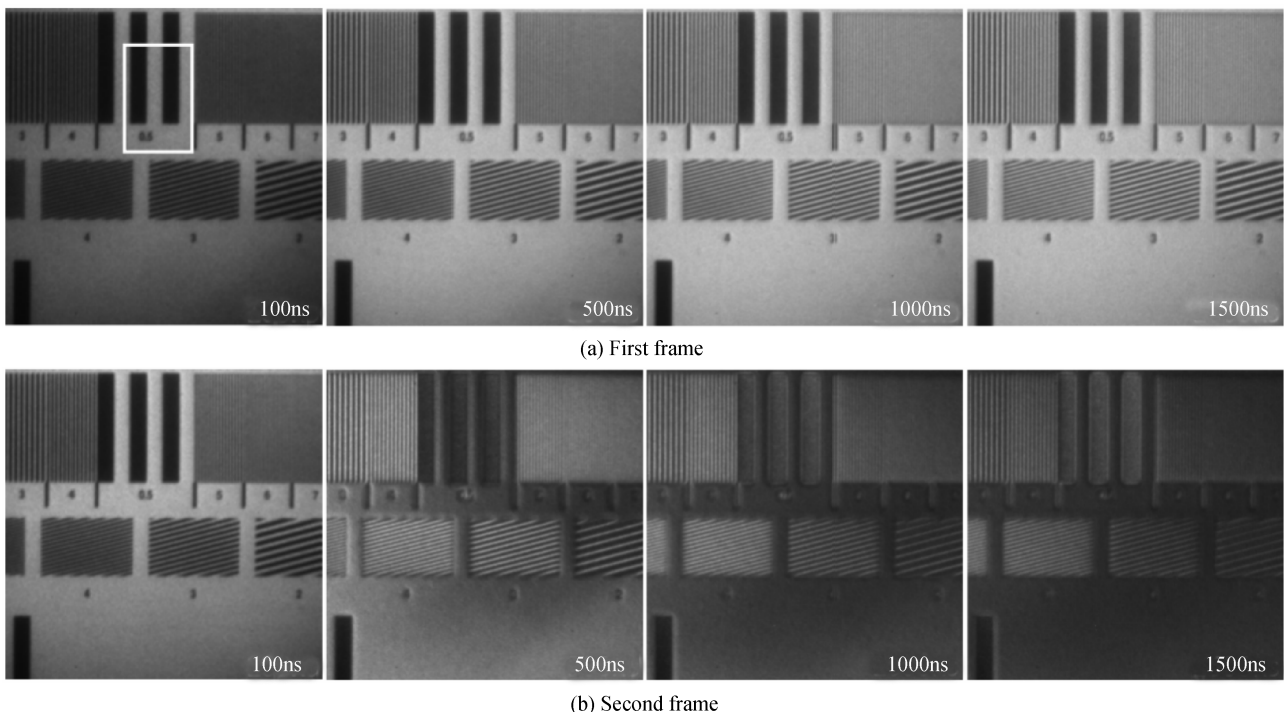


图 4 不同第一帧曝光时间下的双帧图像变化

Fig.4 Changing of two frames with different exposure time of first frame

以图 4 中白色方框区域为代表,计算第一帧图像灰度值随曝光时间变化的曲线如图 5,按照式(1)计算第二帧图像明暗对比度得到结果如图 6.图 5 显示第一帧图像的灰度值随着曝光时间的增加而增加,在曝光时间超过  $1\,300\ \text{ns}$  之后,图像灰度值基本保持不变,说明方框区域内所有像素都已经饱和,CCD 相机本身的饱和灰度值大概为  $6 \times 10^4$  左右,说明 CCD 本身并未饱和,而是像增强器出现饱和状态,即随着第一帧曝光

时间的增加,像增强器饱和的微通道管数越多,在 1 300 ns 之后几乎方框区域内的所有微通道管都已饱和.图 6 显示第二帧图像对比度随着第一帧曝光时间的增加而减小,最后趋于稳定,在 600ns 之后出现负值,说明图像灰度值出现反转.对比两条曲线,曲线的走势是对称的,变化状态是一致的,都是先急剧变化后趋于稳定,这说明第二帧图像的灰度值反转与第一帧图像的饱和程度相关.

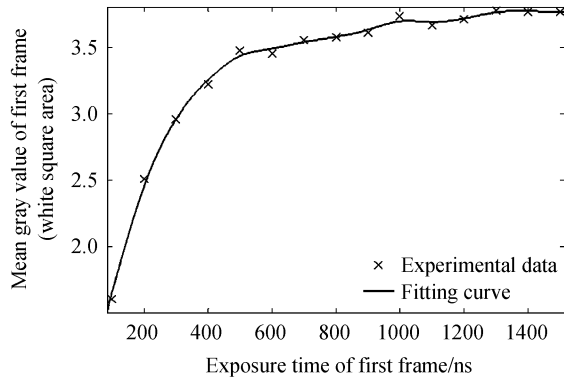


图 5 第一帧平均灰度值随曝光时间的变化曲线  
Fig.5 Mean gray value changing curve of first frame with different exposure time

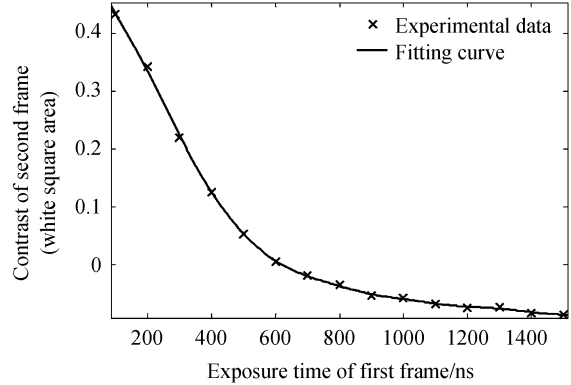


图 6 第二帧明暗对比度随第一帧曝光时间的变化曲线  
Fig.6 Contrast changing curve of second frame with different exposure time of first frame

$$\text{明暗对比度} = \frac{\text{亮区域灰度值} - \text{暗区域灰度值}}{\text{亮区域灰度值} + \text{暗区域灰度值}} \quad (1)$$

固定第一帧和第二帧曝光时间都为  $1 \mu\text{s}$ ,改变两帧图像之间的延迟时间,分别得到的第二帧图像如图 7 所示,图中右下角标注的是两帧的延迟时间.根据氙灯的发光曲线,延迟时间越长,第二帧曝光时间内的氙灯发光量越少,对应图像越暗.但从图中也能够分辨出,随着延迟时间的增加,白色方框内的黑色条纹相比于背景越暗,同样按照式(1)计算四幅图像的对比度分别为:  $-0.111$ 、 $-0.017$ 、 $0.020$ 、 $0.067$ ,即两帧之间的延迟时间越长,第二帧图像出现的灰度值反转现象越不明显.

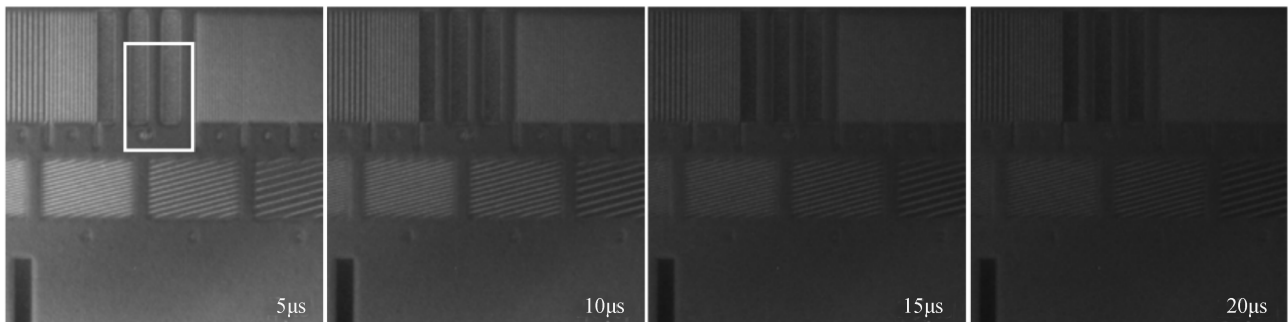


图 7 不同延迟时间下的第二帧图像变化  
Fig.7 Changing of second frame with different delay time

分析以上实验结果,第二帧图像出现的显示问题与第一帧曝光时像增强器饱和有关.由像增强器原理<sup>[10]</sup>可知,微通道管在出现饱和时其增益下降,由于两次曝光时间间隔很短,在第二帧图像曝光时并没有完全恢复,致使第二帧图像在暗的区域微通道管增益是正常的,在亮的区域增益是不正常的,从而导致第二帧暗区域变亮、亮区域变暗的灰度值反转现象.随着两帧延迟时间的增加,增益不正常的微通道管逐渐恢复,致使第二帧图像显示逐渐趋于正常.由于成像系统的点扩散效应,图像中的图形边界出现模糊扩散,边界处的灰度值介于亮区域和暗区域之间,且并没有导致微通道管出现饱和,这样在第二帧图像中其亮度比亮区域和暗区域都要高,这就形成了边界增强,造成了视觉上的“浮雕”现象.

为了在应用过程中避免出现像增强器饱和现象,可以采用以下解决方案:一是减弱第一帧曝光时的光强,使像增强器不出现饱和,但是这种方法严重降低了 CCD 的成像动态范围;二是增大两帧之间的延迟时间,但是在超高速成像领域往往要求两帧间隔比较短,该方法也不适用;三是增大 CCD 输出 AD 采样的增益,来匹配 CCD 和像增强器的线性光强区间范围,使得在较强光强下 CCD 能够先于像增强器达到饱和状



态,这样在实际应用过程中在满足 CCD 线性成像要求的条件下就不会出现像增强器饱和问题.第三种方法虽然本质上不能够消除像增强器的饱和效应,但是在 CCD 的线性应用范围内很好地避免了此问题发生,该方法简单易实现,适用性最广,效果也最好.图 8 是将 CCD 的 AD 采样增益增大了一倍,此时第一帧图像的最大灰度值达到了  $4.3 \times 10^4$ ,但是第二帧是正常的,没有出现灰度值反转和“浮雕”效应等问题.

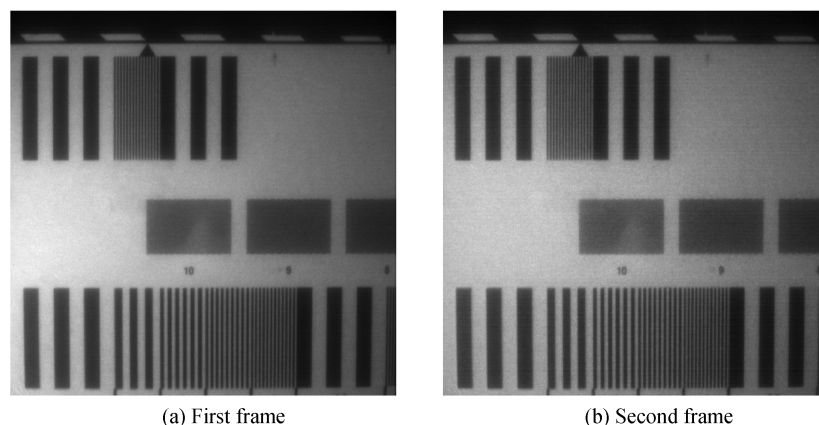


图 8 AD 增益提高一倍后获取的两帧图像  
Fig.8 Two frames acquired after doubling AD gain

## 4 结论

针对 ICCD 相机在超高速双帧图像采集实验中出现的第二帧图像灰度值反转和“浮雕”效应等问题,建立了像增强器高重频特性成像实验平台,开展了像增强器在高重频条件下的成像应用研究.实验结果显示第二帧图像灰度值反转和“浮雕”效应等问题随着第一帧图像像增强器饱和通道的增加而加强,随着两帧之间延迟时间的增加而减弱.实验结果结合理论分析表明,灰度值反转问题是由第一帧图像曝光时像增强器饱和造成像增强器微通道管增益下降造成的,“浮雕”效应是由第一帧图像边界模糊扩散导致灰度下降从而像增强器微通道管达不到饱和状态引起的.为了避免在实际应用中出现此类问题,可将 CCD 的 AD 采样增益增大,使 CCD 先于像增强器达到饱和,这样在 CCD 线性成像范围内就不会出现像增强器饱和问题.

## 参考文献

- [1] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] XIE Hong-wei, CHEN Jin-chuan, LI Hong-yun, *et al.* The study of turn on/turn off gated MCP image intensifier[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2014, **34**(10): 1196-1200.  
谢红卫, 陈进川, 李宏云, 等. MCP 像增强器开门/关门时间特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(10): 1196-1200.
- [3] 杨少华, 李斌康, 罗通顶, 等. 一种超高速双帧图像获取方法: 中国, CN201410386427.X [P]. 2014-10-21.
- [4] PAN Jing-sheng. Micro-channel plate and its main characteristics[J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(5): 25-29.
- [5] TAO Yu, JIN Wei-qi, WANG Yao, *et al.* The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0604003.  
陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0604003.
- [6] LIU Ning-wen, CHANG Li-hua, XIAO Zheng-fei, *et al.* Measuring gating time of gated image intensifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2447-2450.  
刘宁文, 畅里华, 肖正飞, 等. 门控型像增强器开门时间测量[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(10): 2447-2450.
- [7] WU Kan, LI Xin-wan, SHAO Chong, *et al.* Theoretical and experimental analysis of the gating performance of a photocathode-gated image tube using a femtosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(18): 3337-3343.
- [8] BAI Xiao-feng, YIN Lei, HU Wen, *et al.* Repetitive characteristic of image intensifier's luminance gain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2): 495-498.  
拜晓峰, 尹雷, 胡文, 等. 像增强器亮度增益测试的重复性研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 495-498.
- [9] ZHU Hong-quan, WANG Kui-lu, XIANG Shi-ming, *et al.* Dynamic modulation transfer function measurement of image intensifiers using a narrow slit[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(2): 023708.
- [10] 汪贵华. 光电子器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.