

基于微通道板的像增强器增益饱和效应研究

谢运涛, 张玉钧, 王 玺, 孙晓泉

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为评估像增强器对强光的响应特性, 开展了连续激光对像增强器的辐照实验, 分析了激光辐照对其增益特性的影响。实验结果表明: 持续增加激光功率, 直到光阴极处激光功率密度达到点饱和和阈值激光功率密度的 8×10^4 倍时, 仍未出现像元串扰现象, 表明像增强器出现了增益饱和, 其输出光强受限。建立了像增强器的微通道板等效电路模型, 分析了微通道板的增益特性, 得到微通道板线性增益允许的最大入射电流约为 1.64×10^{-10} A。该结果非常接近实验测量值, 表明通道损失的电子得不到及时补充是增益饱和的主要原因。

关键词: 激光辐照; 像增强器; 增益饱和; 微通道板

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1003005

Research on the gain saturation effect of an image intensifier based on microchannel plate

Xie Yuntao, Zhang Yujun, Wang Xi, Sun Xiaquan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To study the influence of laser radiation on the performance of an image intensifier, the irradiation experiment of CW laser on the image intensifier was carried out and the effect of laser irradiation on its gain characteristics was analyzed. Experimental results show that no pixel crosstalk phenomenon is found as the increase of the laser power until the light illumination arrives 8×10^4 times of the illumination for point saturation, meaning that the gain of the image intensifier is saturated and the output light intensity of image intensifier will not increase indefinitely. The equivalent circuit model of the microchannel plate of the image intensifier was established and its gain characteristic was analyzed. The maximum current for linear gain, got from this model, was approximately 1.64×10^{-10} A, which was very close to experimental data, indicating that the charge extracted from the microchannel wall cannot be replenished in time is the main reason of gain saturation.

Key words: laser irradiation; image intensifier; gain saturation; microchannel plate

收稿日期: 2017-07-13; 修订日期: 2017-09-13

基金项目: 国家杰出青年基金(41605015); 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2016ZR06)

作者简介: 谢运涛(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光干扰损伤技术方面的研究。Email: wsqjian@126.com

导师简介: 孙晓泉(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学技术方面的研究。Email: sunxq@ustc.com

0 引言

像增强器具有高增益、高时间和空间分辨率等特点,不仅在月基地球等离子层探测^[1]、高压电网故障检测^[2]等民用领域应用广泛,而且作为紫外成像仪的核心部件有着非常重要的军事用途^[3-4]。

激光具有峰值功率密度高、方向性好的特点,是一种高亮度光源,适合远距离传输^[5-6]。采用激光对光电成像系统进行干扰、损伤一直是国内外研究的热点^[7-9]。国外方面,2007年,RIC(H.) M.A.Schleijpen研究了干扰激光参数与红外成像系统饱和面积之间的关系^[10];2010年,Titterton D H等分析了四种不同干扰评估指标的性能^[11];2011年,Anne Dureuc比较了不同参数激光对 HgCdTe 焦平面阵列探测器干扰效果^[12]。国内方面,2011年,张震等采用重频激光对 TDI CCD 进行干扰,从理论上解释了图像中等间隔黑线的成因^[13];2012年,张震等采用连续激光对线阵 CCD 进行干扰,研究了图像中三个干扰光斑的成因^[14];2014年,康文运等采用重频激光对推扫相机进行干扰,并与激光对凝视相机的干扰现象进行了对比分析^[15];2016年,盛良等研究了 CMOS 相机受连续激光辐照时的像素反转现象^[16]。可以看出,国内外对于激光干扰、损伤光电系统的研究主要集中于对可见光 CCD(或 CMOS)相机、红外热像仪的干扰损伤机理研究,对于像增强器的干扰损伤,相关的研究还未见公开报道。

像增强器自发明以来,对其进行了大量的改进工作。最为核心的改进在于将倍增机构改为微通道板(MCP)。MCP的使用减少了像增强器的余辉和强光模糊现象,提高了像增强器受强光照时的成像性能。但由于像增强器对光照十分灵敏,强光照射依然容易对其形成干扰。文中通过连续激光对像增强器的辐照实验,对比分析照射前后像增强的成像特点,研究了像增强器的增益饱和机理,该研究对像增强器的激光干扰效果评估以及抗干扰加固具有一定的参考价值。

1 实验装置

实验系统包括激光源、激光功率计、衰减片、半透半反镜、扩束器以及像增强器等,实验装置如图 1 所示。

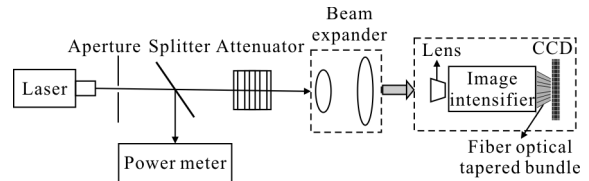


图 1 激光辐照像增强器示意图

Fig.1 Experiment schematic of laser irradiation on image intensifier

激光器与像增强器之间的距离为 10 m,调整激光器位置使激光与像增强器光轴相重合。在激光器出口处放置直径为 2 mm 的小孔,小孔后面放置分束比为 1:1 的分束器。激光经分束后,一束照射到功率计,功率计对激光器的输出功率进行实时监测,另一束经衰减、扩束后照射到像增强器。

采用波长为 632.8 nm 的连续激光对像增强器进行辐照,激光器平均功率为 3 mW。像增强器型号为 LPZ-18SUVC-2T1,像增强器镜头以及光学窗口在 632.8 nm 波长处的透过率约为 6.9×10^{-4} 。像增强器带有光纤光锥以及 CCD 模块,CCD 可接受像增强器荧光屏上的图像信号,得到数字图像。像增强器采用 S25 型多碱光阴极进行光电转换,该光阴极响应波段覆盖紫外和可见光,632.8 nm 波长处的光谱灵敏度为 20 mA/W^[17]。采用反射型中性密度滤光片对入射激光进行衰减,通过叠加使用不同光学密度(OD)的滤光片得到不同的衰减倍率。为防止长时间测量过程中,激光器出射功率发生变化而对测量结果造成影响,采用 S120VC 型标准光电二极管功率探头进行激光功率实时监测。

2 实验结果及分析

由于强光入射很可能导致像增强器损伤,实验开始时,在光路中加入全部的衰减片,通过不断地减少衰减片数量,缓慢提高激光功率。经过多次实验得到,像增强器出现点饱和的阈值激光功率密度约为 $2.79 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;入射光斑面积为 0.0058 cm^2 ,激光光斑面积与像增强器光阴极总面积之比约为 0.23%时,激光功率密度达到 $1371.9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,出现全屏饱和现象,全屏饱和和所需的人射激光功率约为点饱和所需功率的 500 倍。继续增大入射光功率,直到光阴极面上激光功

率密度达到 $2.2 \times 10^5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时(约为点饱和所需激光照度的 8×10^4 倍),干扰图像几乎不发生变化。

参考文献[18]中,入射激光功率密度达到点饱和和激光功率密度阈值的 9×10^3 倍时,CCD 已经出现非常明显的象元饱和串扰现象。参考文献[19]对于某型 CCD 计算得到,入射激光功率密度达到点饱和和激光功率密度阈值的 6.2×10^4 倍时,串扰线将达到饱和。而在实验中,光阴极激光照度达到点饱和所需激光照度的 8×10^4 倍时,依然没有观察到像元饱和和串扰这一现象。推测随着入射激光功率增加,CCD 出现串扰之前,像增强器进入了增益饱和状态。

为验证上述猜想,通过测量不同入射功率时像增强器的输出光强,分析像增强器的增益特性。去除像增强器中的光纤光锥以及 CCD,采用工业相机直接拍摄紫外像增强器中荧光屏上的图像。工业相机型号为 GS3-U3-23S6C,取消相机的自动增益控制,将增益设为 0,快门时间设为 3.5 ms。调整衰减倍率,使得入射激光功率从 0~5 μW 连续变化。采用 MATLAB 对图像进行处理,得到图像的最大灰度值随入射功率的变化曲线,见图 2。可以看出,随着入射激光功率增加,最大灰度值增长速度缓慢下降,表明此时像增强器增益逐渐下降。为测量低入射功率时像增强器的输出情况,将快门时间调整为 20 ms,保持相机其他参数不变。得到入射激光功率从 0 增加到 0.1 μW 时,图像的最大灰度值变化曲线,如图 3 所示。可以看出,入射功率小于 0.06 μW 时,图像最大灰度值随入射功率线性增长,此时像增强器的增益为一常数。实验中得到像增强器点饱和阈值功率

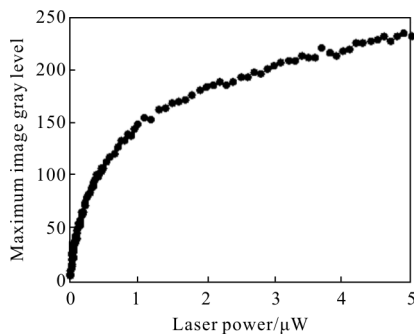


图 2 快门时间为 3.5 ms,入射激光功率与 CCD 峰值灰度值之间的关系

Fig.2 Maximum image gray level as a function of laser irradiation when shutter time is set at 3.5 ms

约为 0.018 μW ,小于 0.06 μW 。表明随着激光功率增加,直至出现点饱和,像增强器都工作于恒定增益状态,与推测正好吻合。

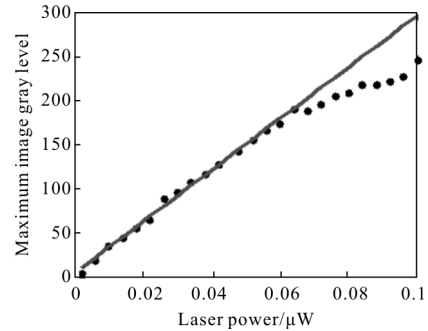


图 3 快门时间为 20 ms,入射激光功率与 CCD 峰值灰度值之间的关系

Fig.3 Maximum image gray level as a function of laser irradiation when shutter time is set at 20 ms

3 像增强器增益饱和和效应

像增强器结构如图 4 所示,主要由 S25 多碱光电阴极、微通道板、P22 荧光屏等三个部分。设入射激光功率为 1 μW ,此时像增强器已经进入饱和状态。对应的入射激光照度为 $149 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,光阴极的出射电流密度约为 $2.06 \text{ nA}/\text{cm}^2$ 。像增强器前近贴电压为 200 V,近贴距离为 0.5 mm,依据参考文献[20]给出的阴极极限电流密度公式,得到光阴极的极限电流发射密度为 $1.8 \text{ A}/\text{cm}^2$,远大于实验中的阴极电流密度,认为光阴极没有发生饱和。实验中像增强器采用单级 MCP,通道开口面积比为 61.2%,非饱和时的增益为 1 115,因此,入射激光功率为 1 μW 时,微通道板的出射电流密度约为 $1.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。参考文献[21]中,当电流密度达到为 $7.3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时,P22 荧光粉的性能依然没有发生变化。因此,可认为荧光屏没有发生饱和。综合以上分析,推断像增强器的增

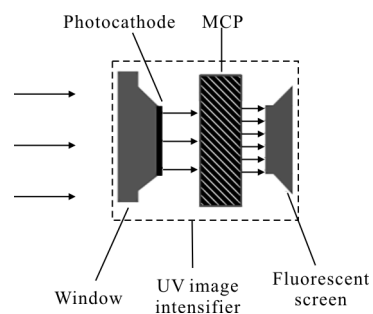


图 4 像增强器结构图

Fig.4 Structure of the image intensifier

益饱和和来源于微通道板。

微通道板通过二次电子发射实现信号的放大,微通道板内壁的电子倍增将消耗通道内电子,如果通道内的电子得不到及时补充,将会影响通道内的电场分布,从而降低微通道板的增益。

采用等效电路模型对微通道板内的电压分布特性进行分析。见图 5,将微通道板沿轴向细分,每一份由一个电阻和一个电容的并联,然后将每一份串联起来。设 MCP 总长度为 L ,电阻为 R ,电容为 C 。令 $r=R/L$, $h=1/CL$,则每一小份的电阻为 $r\Delta z$,电容为 $h\Delta z$ 。

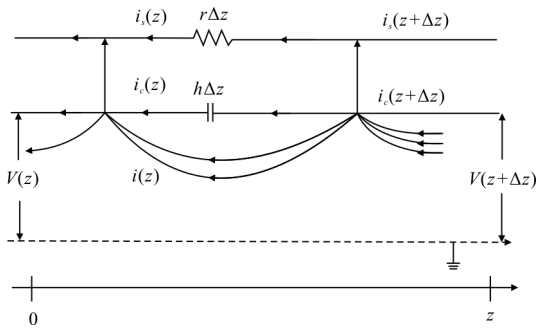


图 5 微通道板等效电路模型
Fig.5 Equivalent circuit model of the microchannel plate

饱和情况下,微通道板的增益以及电压偏移 $\Phi(z)$ 可表示如下^[22]:

$$E \ln g(z) + M \ln (B g(z) - D) = D H z \quad (1)$$

$$\Phi(z) = v_s \left[(C - D) z + \frac{E}{H} \ln g(z) \right] \quad (2)$$

式中: $E=A+B+2$, $A=I_0/I_s$, I_s 为非饱和情况下通道内的电流; $I_s=V_s/R$, V_s 为通道两端电压; $g(z)=i(z)/i_0$, i_0 为入射电流; $M=2G/(G+2.05)-2$, $G=\ln(V_s/V_m)$, V_m 为使得通道增益等于 1 时通道两端的电压; $B=i_0/I_s$; $D=A+B+2G/(G+2.05)-2$; $H=G+2.05$; $v_s=2V_s/L$; $C=A+B$ 。

像增强器 MCP 参数如表 1 所示,对公式(1)和公式(2)进行数值求解,得到 MCP 增益随入射电流的变化如图 6 所示。可以看出,随着电流强度增加, MCP 增益逐渐下降,下降速度逐渐减小。图 7 显示了 MCP 输出电流强度与入射电流强度之间的关系,可以看出,出射电流强度随着入射电流强度单调上升,但两者之间不是单纯的线性关系。当入射电流小于 $B0=1.64 \times 10^{-10}$ A 时,两者为近似线性关系,之后随着入射电流增大,输出电流的上升速度越来越小,直至趋于饱和。实验得到的线性增益临界照度为 $8.95 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,

表 1 微通道板性能参数

Tab.1 Parameters of the MCP characteristics

Quantity	Symbol	Value
Photocathode area/cm ²	A	2.544 7
Signal channel diameter/ μm	D	5
Center-to-center/ μm	D_c	6
Length/ μm	L	320
Resistance/ Ω	R	10^9
Logarithmic gain	G	0.78
Open area fraction	A_{or}	61.2%
Bias voltage/V	V_s	800
Crossover voltage/V	V_m	366.7
Strip current/A	I_s	8×10^{-7}
Unsaturated gain	e^{GL}	1 115

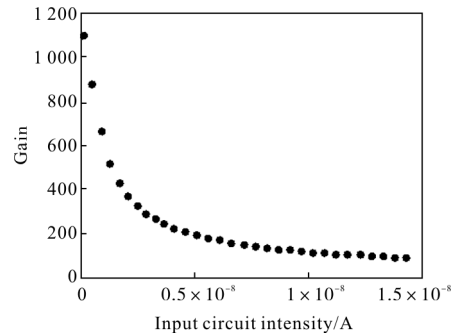


图 6 增益随入射电流强度的变化关系

Fig.6 Variation of the gain with the input circuit intensity

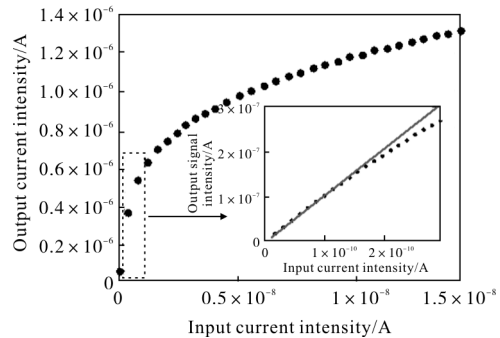


图 7 输出电流强度随入射电流强度的变化关系

Fig.7 Variation of the output current intensity with the input current intensity

对应的电流密度为 $1.23 \times 10^{-10} \text{ A}/\text{cm}^2$,乘以阴极面积和通道开口比例得到阴极发射电流约为 $1.92 \times 10^{-10} \text{ A}$,与模型计算得到的最大线性增益电流 $B0$ 相近,可认为微通道板的增益饱和是像增强器输出光强饱和的主要原因。

图 8 为增益随通道轴向的分布,五条曲线分别对应不同的入射电流强度。当入射电流等于 $B0$ 时,

增益随通道轴向成指数增长关系, 没有出现增益饱和和现象。之后随着入射电流增加, 增益曲线不再呈指数上升。在靠近通道出口一侧, 增长速度趋于平缓。入射电流越大, 进入饱和的位置距离通道出口越远。

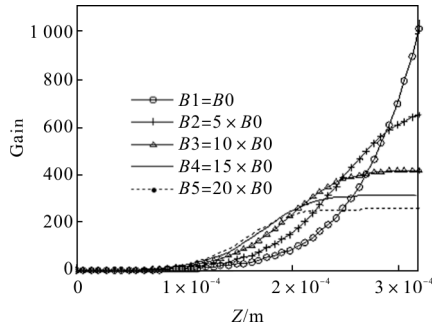


图 8 增益随轴向距离的变化关系

Fig.8 Gain along the channel axial distance

图 9 和图 10 分别表示偏移电压和电压随通道轴向的变化关系。可以看出, 当入射电流较小(如 $i_0=B_0$)时, 偏移电压幅度很小, 几乎不会对原始轴向电压形成影响, 其对通道增益的影响可以忽略。随着入射电流增加, 偏移电压显著增加, $i_0=20 \times B_0$ 时, 最大偏移电压为 346 V, 此时偏移电压的影响不可忽略。从图 10 可以看出, 入射电流较小时, 电压随轴向距

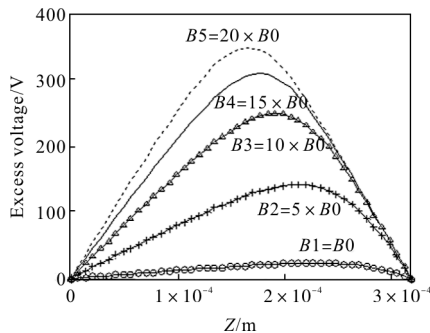


图 9 偏移电压随轴向距离的变化关系

Fig.9 Excess voltage along the channel axial distance

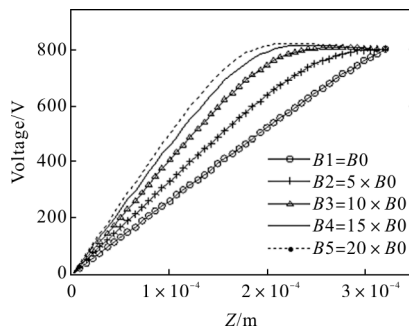


图 10 电压随轴向距离的变化关系

Fig.10 Voltage along the channel axial distance

离线性增长, 表明通道内电场均匀分布。随着入射电流增加, 通道内轴向电压将提前达到最大值, 通道前端电场强度增加, 前端增益大于非饱和时的增益。通道后端电压差减少, 电场强度减弱, 后端增益小于非饱和时的增益。

4 结论

开展了连续激光辐照像增强器的实验。实验结果表明: 随着入射激光功率增加, 像增强器由点饱和逐渐发展到面饱和, 但不会出现串扰现象。分析了串扰缺失现象的机理, 认为增益饱和使得像增强器的输出光强增长受限, 输出光强难以达到 CCD 像元势阱电荷溢出所需的光强。通过建立微通道板等效电路模型, 对像增强器的增益饱和和效应进行了分析, 得到了通道增益以及通道电场分布与入射电流之间的关系。结果表明, 微通道板存在一个饱和电流, 当入射电流远小于该值时, 微通道板将对信号实现线性放大。当入射电流接近或者大于饱和电流时, 由于信号倍增过程中大量地消耗通道内的电子, 这部分电子得不到及时补充, 导致通道内电场的扭曲, 影响了通道内电子倍增过程。宏观上体现为通道后端增益下降, 通道增益不随通道轴向距离而指数增长, 出现增益饱和。

参考文献:

- [1] Yoshikawa I, Yamazaki A, Murakami G, et al. Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE: science from the Moon[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(4): 407-416.
- [2] Fang Chenyan. Research on the ultraviolet features and multi-spectral imaging technology of high voltage air discharge [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
房陈岩. 空气高压放电紫外特性及多光谱成像技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [3] Song Shanshan. Design of solar blind ultraviolet warning optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
宋珊珊. 日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [4] Wang Hong. Optical system study and design used for the ultraviolet warning camera with ultra-wide field [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2): 160-164. (in Chinese)
王红. 大视场紫外告警相机光学系统研究与设计[J]. 光子

- 学报, 2014, 43(12): 160–164.
- [5] Cui Jianfeng, Gao Tao, Zhang Yanan, et al. High efficiency and high peak power 351 nm quasi-continuous ultraviolet laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0605004. (in Chinese)
崔建丰, 高涛, 张亚男, 等. 高效率、高峰值功率 351 nm 准连续紫外激光器[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0605004.
- [6] Mao Xiaojie. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 182–190. (in Chinese)
毛小洁. 高功率皮秒紫外激光器新进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(2): 182–190.
- [7] Qian Fang, Sun Tao, Guo Jin, et al. No-reference laser-dazzling image quality assessment based on feature-point complexit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4):1179–1186. (in Chinese)
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 无参考的特征点复杂度激光干扰图像评估[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1179–1186.
- [8] Wu Chunting, Li He, Cai Jixing, et al. Measurement of real-time stress damage of monocrystal silicon by Mach-Zehnder interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1395–1401. (in Chinese)
吴春婷, 李贺, 蔡继兴, 等. 采用马赫-曾德尔干涉法测量单晶硅在线应力损伤 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1395–1401.
- [9] Liao Z M, Nostrand M, Carr W, et al. Modeling of laser-induced damage and optic usage at the National Ignition Facility [C]//Pacific Rim Laser Damage 2016: Optical Materials for High Power Lasers. International Society for Optics and Photonics, 2016: 998304–1–6.
- [10] Dimmeler A, Eberle B, van den Heuvel J C, et al. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]//Optics/Photonics in Security and Defence, International Society for Optics and Photonics, 2007, 6738: 673800–1–10.
- [11] Titterton D H. Application of laser technology to optical countermeasures[J]. *The Imaging Science Journal*, 2010, 58(5): 286–294.
- [12] Durécu A, Bourdon P, Fleury D, et al. Infrared laser irradiation breadboard: dazzling sensitivity analysis of a HgCdTe focal plane array [C]//SPIE Security + Defence. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8187: 81870K–1–10.
- [13] Zhang Z, Cheng X, Wang R, et al. Dazzling effect of repetitive short pulse laser on TDI CCD camera [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(2): 292–296.
- [14] Zhang Z, Cheng X, Jiang T, et al. A dazzling phenomenon of CW laser on linear CCD camera [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(3): 223–227.
- [15] Kang Wenyun, Wei Jun, Song Xiaoquan, et al. Jamming of laser to push-broom camera [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(6): 608–612. (in Chinese)
康文运, 危峻, 宋小全, 等. 激光对推扫相机的干扰[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(6): 608–612.
- [16] Sheng Liang, Zhang Zhen, Zhang Jianmin, et al. Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606004. (in Chinese)
盛良, 张震, 张检民, 等. 连续激光辐照 CMOS 相机的像素翻转效应及机理[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0606004.
- [17] Wang Guihua. Optoelectronic Device [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 72–73. (in Chinese)
汪贵华. 光电子器件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 72–73.
- [18] Zhang Zhen. Experimental study of laser induced effect on visible light CCD [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
张震. 可见光 CCD 的激光辐照效应实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [19] Zhang Jianmin, Zhang Zhen, Feng Guobin, et al. Estimating method of jamming thresholds for laser irradiated interline transfer CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0314004. (in Chinese)
张检民, 张震, 冯国斌, 等. 行间转移型 CCD 激光干扰效应阈值估算方法[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0314004.
- [20] Girardeau -Montaut J P, Girardeau -Montaut C. Space-charge-limited current density as a function of electron flow duration in an emissive diode [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(8): 2889–2895.
- [21] Kwo J L, Yokoyama M, Wang W C, et al. Characteristics of flat panel display using carbon nanotubes as electron emitters [J]. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9(3): 1270–1274.
- [22] Giudicotti L. Analytical, steady-state model of gain saturation in channel electron multipliers [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2002, 480(2): 670–679.