

光电探测器上多组圆环条纹的现象与机理

王彦斌, 陈前荣, 朱荣臻, 任广森, 周旋风, 李 华

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 在开展激光对光电成像系统的干扰实验时, 观察到光电探测器上多组圆环条纹并存的现象, 并采用对光学系统拆解、测量、建模重构和光线追迹的方法揭示了每一组圆环条纹的产生机理。首先, 对实验所用的光学系统进行拆解, 测量各个镜片的曲率半径、厚度、通光孔径等几何结构参数, 并采用 TRACEPRO 光线追迹软件建立了该光学系统的理论模型。基于该光学系统模型, 追迹大量光线经光学系统传输后在光电探测器上的能量分布, 分析每一种能量组分的来源, 发现多组圆环条纹的出现是由于不同激光能量组分的干涉效应而产生的, 并揭示了产生每组圆环条纹的对应能量组分。文中的研究结果可为激光对光电成像系统的干扰效果评估提供技术支撑。

关键词: 光电成像系统; 圆环条纹; 光学系统模型; 光线追迹法

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1003004

Phenomenon and mechanism of multi-group circular fringes on the optoelectric detector

Wang Yanbin, Chen Qianrong, Zhu Rongzhen, Ren Guangsen, Zhou Xuanfeng, Li Hua

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: The multi-group circular fringes on the optoelectric detector were observed in the experiment of laser disturbing optoelectric imaging systems. The method of disassembly, measurement, modeling and ray tracing of optical system was used to investigate the formation mechanism of multi-group circular fringes. First of all, the radius of curvature, thickness, pupil of every lens were measured and the model of optical system in TRACEPRO software was built. Based on the model, large number of random rays to propagate in the optical system were traced secondly and the energy distribution on the optoelectric detector was obtained. By analyzing the origin of every energy component, it was found out that the multi-group circular fringes were caused by interference effect of the different energy component on the optoelectric detector. The research results can provide the technical support for evaluating laser disturbing effect on optoelectric imaging systems.

Key words: optoelectric imaging systems; circular fringes; model of optical system;
ray tracing method

收稿日期: 2017-07-28; 修订日期: 2017-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(11504420)

作者简介: 王彦斌(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。Email: wangyanbin82@163.com

0 引言

光电成像系统主要由光学系统和光电探测器组成,光学系统将收集到的目标和背景的光信息会聚到光电探测器上,光电探测器再将光信息转化为电信号,并对电信号进行存储、转移、传输、检测、采样、放大、数模转换、生成所需要的图像信号。随着新兴材料的大量涌现、探测技术的迅猛发展以及制作工艺的日益完善,光电成像系统越来越多地应用于军事和民用的各个方面^[1-3]。

激光有源压制干扰是对抗光电成像系统的有效手段,可以扰乱光电探测器上的能量分布,严重时造成整个像面无法识别,甚至损伤探测器乃至整个光电成像系统^[4-6]。在激光对光电成像系统的干扰试验中,在探测器上除了光学系统会聚的激光光斑以外,还经常观察到规律性的圆环条纹^[7-9],以前的文章报道探测器上只观察到一组圆环条纹,项目组在光电探测器上观察到了多组圆环条纹并存的现象。由于难以获取实际光学系统的结构组成和镜片参数,人们只能基于激光传输理论推测圆环条纹的产生机理,有的认为是光瞳衍射效应产生的多级衍射环^[7],有的认为是激光加热胶合透镜松动以后形成空气薄膜而产生的等厚干涉条纹^[8],有的认为是光学系统胶合上下表面反射所产生的等厚干涉条纹^[9],没有形成统一的认识。孙可等人^[10]率先采用光线追迹的方法,借助 ASAP 软件研究了强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布,但是没有涉及到圆环条纹的产生机理。项目组采用对实验所用的光学系统进行拆解、测量、建模重构、光线追迹的方法,揭示每一组圆环条纹的产生机理,光线追迹的软件是 TRACEPRO,该软件可获取探测器上的每一处能量组分,并分析其形成原因。

1 多组圆环条纹的现象

1.1 实验简介

图 1 是开展不同入射角下激光对光电成像系统实施干扰实验的布局图。其中,1 064 nm 的纳秒激光是由北京镭宝激光技术有限公司生产的 Nd:YAG 激光器输出的,单脉冲能量为 180 mJ。衰减片组调节入射到光电成像系统的功率。光学系统选用福州浩蓝

光电有限公司生产的型号为 AZURE-3514MM 的镜头,焦距是 35 mm。光电探测器是由北京联合赛仪科技有限公司代理生产的型号为 DMK23G 445 CCD,像元规模为 1 280×960、像元大小是 3.75 μm×3.75 μm。光电成像系统放置在二维精密转台上,通过调节转台的方位来调节光学系统的光轴方向(如图 1 中标号 1、2、3、4、5 和 6 所示),从而实现激光以不同的角度对光电成像系统实施干扰。定义激光的入射方向与光学系统光轴的夹角为激光入射角,记为 α 。调节转台的高度使得光学系统的光轴与激光出光口等高,调节转台的方位使得光轴指向激光器的出光口,即 α 为 0°,如图 1 中标号 1 所示,干扰现象对应图 2(a),光斑中心在像元(484, 625)上。

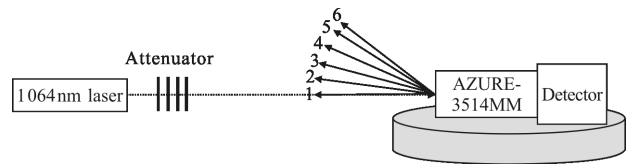


图 1 不同入射角下激光干扰的实验布局图

Fig.1 Experimental layout of laser disturbing under different incident angles

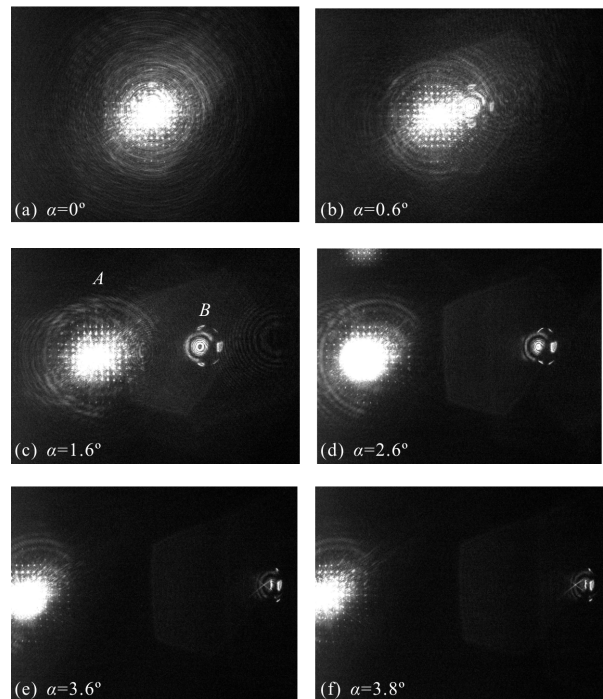


图 2 不同入射角下的激光干扰现象

Fig.2 Laser disturbing phenomena under different incident angle

1.2 实验现象

逐渐增大激光入射角 α , 观察干扰现象。(1) 当 $\alpha=0^\circ$, 对应图 2(a), 激光光斑周围出现多层的圆环条纹;(2) 增大 α 为 0.6° , 对应图 2(b), 光斑中心移动到像元 (483, 546), 光斑周围的圆环条纹开始错开, 将环绕光斑的圆环条纹记为圆环条纹 A, 在激光光斑右边出现了一组较亮的圆环条纹, 圆环中心在像元(441, 695)附近, 记为圆环条纹 B, 同时在 B 右边紧贴着还有一组圆环条纹, 圆环中心在像元(388, 867), 记为圆环条纹 C;(3) 继续增大 α 为 1.6° , 对应图 2(c), 光斑中心向左移动到像元(483, 380), 周围仍然有条纹 A 的环绕, 条纹 B 的中心却向右移动到像元(441, 839), 条纹 C 的中心也向右移动到像元(397, 1181)。(4) 进一步增大 α 为 2.6° , 对应图 2(d), 光斑中心移动到像元(483, 214), 环绕主光斑的圆环条纹 A 仍然存在, 圆环条纹 B 的中心进一步向右移动到像元(441, 999), 圆环条纹 C 已经移出探测器;(5) 增大 α 为 3.6° , 对应图 2(e), 光斑中心移动到像元(483, 53), 条纹 B 的中心移动到像元(437, 997), 但是圆环条纹严重退化, 已经变得不规则;(6) 最后增大 α 为 3.8° , 对应图 2(f), 光斑中心已经移到了探测器的边缘像元(483, 22), 而条纹 B 的中心移动到探测器的另一侧边缘像元(438, 1227)附近。

对实验现象进行梳理, 在光电探测器上观察到了多组圆环条纹并存的现象。随着激光入射角的增大, 激光主光斑周围环绕的圆环条纹 A 始终存在, 并且随着激光光斑的移动而移动, 方向一致; 圆环条纹 B 随着激光光斑向左移动, 却向相反方向移动, 当激光光斑移动到探测器左侧边缘时, 圆环条纹 B 移动到右侧边缘, 但是随着入射角增大, 尤其在 2.6° 以后, 圆环条纹严重退化而不易识别; 圆环条纹 C 随着激光光斑向左移动, 也向相反方向移动, 但是移动速度更快, 只有在 0.6° 和 1.6° 时, 出现在探测器上, 角度进一步增大以后就移出探测器。

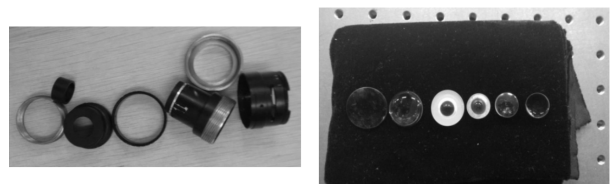
2 多组圆环条纹的产生机理分析

为了揭示光电探测器上多组圆环条纹的产生机理, 项目组提出采用对光学系统拆解、参数测量、建模重构和光线追迹的方法进行研究。

2.1 光学系统的参数测量

首先, 对光学系统型号为 AZURE-3514MM 的

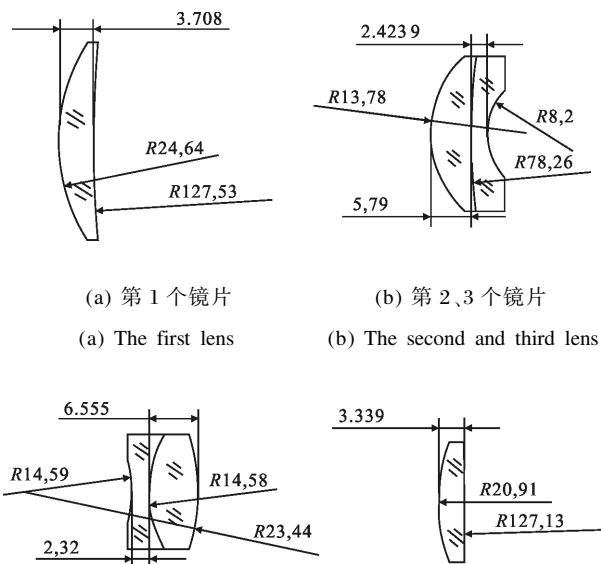
镜头进行机械拆解, 如图 3 所示, 图 3(a)是拆解的镜筒机械组件, 包括套筒、垫片、压环、转接环等, 这些都是用来固定光学镜片的; 图 3(b)是拆解的光学镜片组件, 该镜头包括 6 个镜片, 其中第 2、第 3 个镜片胶合在一起, 第 4、第 5 个镜片也胶合在一起, 均是胶合透镜。测量其各个镜片的几何结构参数, 具体包括: 镜片的前后镜面曲率半径、厚度、通光口径以及镜片之间的相互位置关系。由于各个镜片均是球面镜, 因此可采用 Talor Hobson 轮廓仪测量镜面的曲率半径、镜片的厚度和通光口径, 镜片间的相互位置关系可以通过测量镜筒内壁结构得到。图 4 给出了测量的 6 个镜片的几何参数, 单位 mm, 为保护 AZURE-3514MM 镜头的知识产权, 只给出各个镜片的曲率半径和厚度, 没有给出各个镜片之间的相互位置关系。



(a) 镜筒组件 (b) 镜片组件
(a) Drawtube components (b) Lens component

图 3 光学系统的拆解

Fig.3 Dismantled optical system



(a) 第 1 个镜片 (b) 第 2、3 个镜片
(a) The first lens (b) The second and third lens

(c) 第 4、5 个镜片 (d) 第 6 个镜片
(c) The fourth and fifth lens (d) The sixth lens

图 4 各个镜片的几何参数

Fig.4 Geometrical parameters of every lens

2.2 光学系统的模型构建

根据 AZURE-3514MM 镜头各镜片的测量结果,建立包含镜筒机械组件的光学系统模型,如图 5 所示,采用 TRACEPRO 光线追迹软件,建立重构 AZURE-3514MM 镜头(包含镜片、光圈、镜筒、垫片、压环、转接环)的完整光学系统模型。然后是设置 TRACEPRO 光学系统模型中镜片和镜筒的光学属性。多次测量波长 1 064 nm 的激光通过第 1 个镜片的平均透过率为 81.2%,可知单个镜面的透过率为 90%、反射率为 10%,设置各个镜片前、后镜面的透过率为 90%、反射率为 10%。由图 3 可知镜筒内壁都经过涂黑处理,并且实验中激光的入射角度都小于光学系统的半视场角,即入射到镜筒内壁上激光能量非常小,所以设置镜筒内壁为完美吸收体。根据参考文献[11]设置光电探测器表面的反射率为 35%、吸收率为 65%。

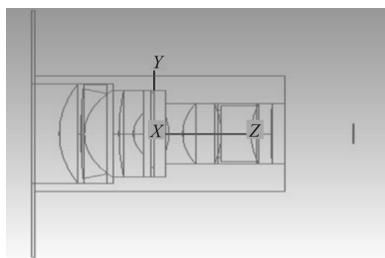


图 5 AZURE-3514MM 镜头的光学系统模型

Fig.5 Optical system's model of AZURE-3514MM lens

2.3 多组圆环条纹的产生机理

基于图 5 所示 AZURE-3514MM 镜头的 TRACEPRO 模型,设置波长 1 064 nm 的激光源,输出光束为高斯光束,光束发散角 0.5 mrad,追迹 10 万根随机光线在模型中的传输,分析探测器上的激光能量分布,揭示圆环条纹的产生机理。

图 6(a)~(f)给出了随着激光入射角的增大,追迹得到探测器上的激光能量分布。图 6(a)为当 $\alpha=0^\circ$ 时,光电探测器上各激光能量组分呈较好的圆对称分布,这是由激光沿光学系统的光轴传输时光学系统自身的圆对称性引起的,对应图 2(a)激光光斑和周围圆环条纹的圆对称性分布。图 6(b)为当 $\alpha=0.6^\circ$ 时,由于激光入射方向与光轴的偏差,引起各镜面反射光的方向偏差,致使探测器上各激光能量组分开始分开,对应图 2(b)中圆环条纹开始错开。图 6(c)~(f)对应 α 分别为 1.6° 、 2.6° 、 3.6° 和 3.8° 的情形,随入

射角度的增大引起不同镜面反射光之间的夹角增大,导致探测器上各激光能量组分进一步分开,这就为研究每一种能量组分的由来和圆环条纹的产生提供了突破口。

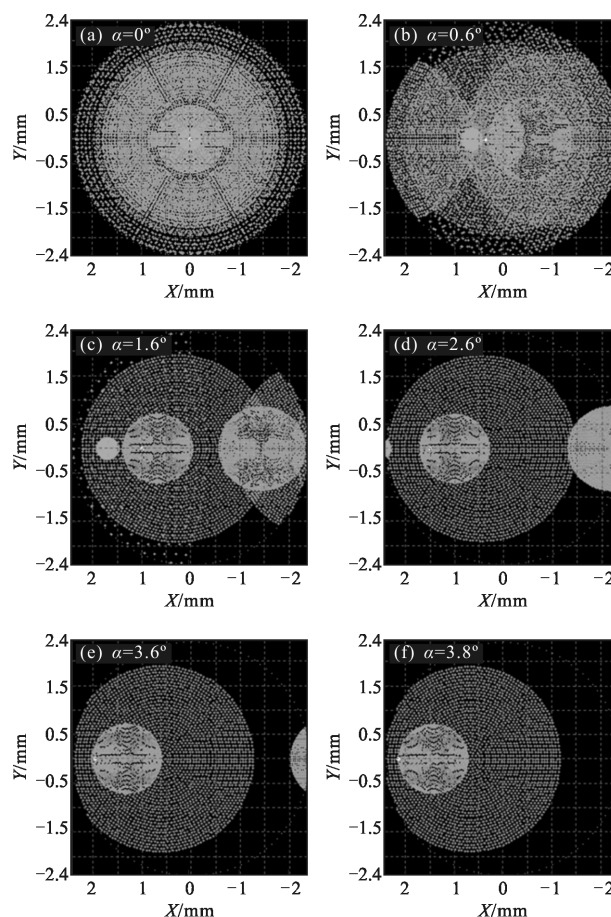


图 6 光电探测器上激光能量分布的仿真

Fig.6 Simulation of laser energy distribution on the optoelectric detector

分别读取图 2(c)中 A、B、C 3 组圆环条纹的灰度分布,发现各组亮条纹的灰度值相差不大,并没有明显随着级数的增大而减小,表明圆环条纹的产生是由于探测器上不同光成分叠加而引起的干涉效应,并不是衍射效应产生的衍射环,为了揭示各组圆环条纹的产生机理,需要弄清探测器上每一组能量成分的由来。图 7 将图 6(c)的仿真结果,从左到右依次标记为能量组分 a(对应图中的最大圆)、b(小圆)、c(白圆点)、d(圆)、e(圆)、f(椭圆)。组分 c 最亮,对应激光主光斑的中心,从图 6(a)~(f),组分 c 逐渐移动到探测器的边缘,是由于大多数激光能量全透射在探测器上形成的;其他能量组分的来源分析需要借助

TRACEPRO 软件, 查看光线传输的轨迹, 图 8 是不同能量组分来源的追迹结果。由图 8(a)可知, 能量组分 a 是光线入射到第 4 个镜片前表面后, 反射到第 2、3 镜片之间的胶合面上, 再反射到探测器上形成的; 由图 8(b)可知, 能量组分 b 是光线入射到第 6 个镜片后镜面后, 反射到第 5 个镜片的后镜面上, 再反射到探测器上形成的; 由图 8(d)可知, 能量组分 d 是由于激光入射到探测器上以后, 反射到第 6 个镜片后镜面, 再反射到探测器上形成的; 由图 8(e)可知, 能量组分 e 是由于激光入射到第 6 个镜片后镜面以后, 反射到第 6 个镜片前镜面, 再反射到探测器上形成; 由图 8(f)可知, 能量组分 f 是光线入射到第 4 个镜片前表面后, 反射到第 3 镜片的后镜面上, 再反射到探测器上形成的。

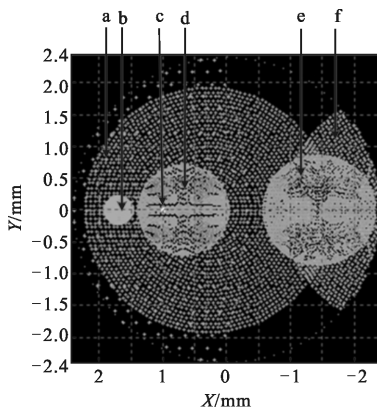
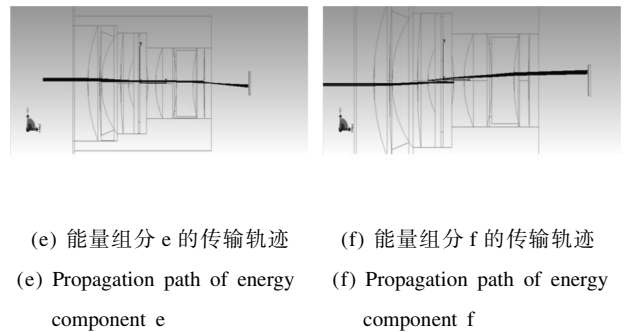
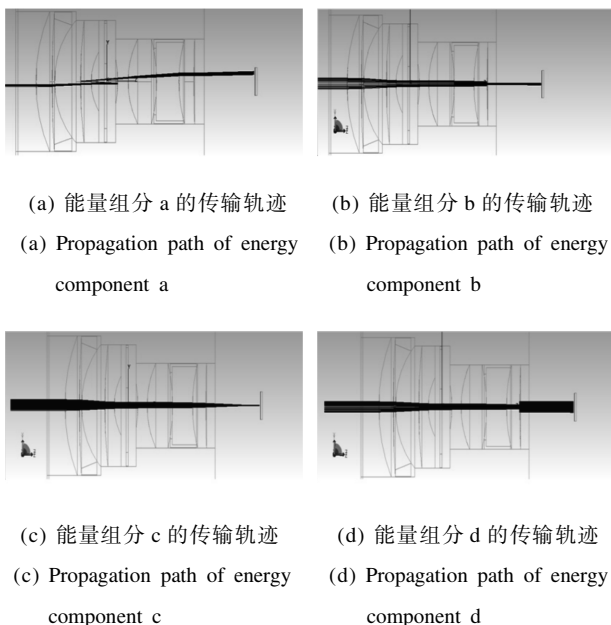


图 7 探测器上激光能量的组分分析

Fig.7 Component analysis of laser energy on the optoelectronic detector



(e) 能量组分 e 的传输轨迹 (f) 能量组分 f 的传输轨迹
(e) Propagation path of energy component e (f) Propagation path of energy component f

图 8 不同能量组分的追迹结果

Fig.8 Tracing result of different laser energy components

能量组分 a 和能量组分 d 在入射角不断增大的过程中, 始终围绕在主光斑 c 周围, 它们相干叠加的干涉效应是产生圆环条纹 A 的根本原因。能量组分 e 在入射角增大的过程中, 与主光斑移动方向相反, 在入射角小于为 2.6° 时与能量组分 a 交集很大, 但在入射角为 2.6° 以后与能量组分 a 开始分离, 叠加减少直到没有交集, 这也是圆环条纹 B 条纹逐渐模糊不易识别、直到没有圆环特征的根本原因, 所以断定圆环条纹 B 是由于能量组分 a 和能量组分 e 相干叠加的干涉效应产生的。在入射角为 1.6° 时圆环条纹 C 产生, 此时探测器右侧只有能量组分 f 和能量组分 e 且相互叠加, 可以确定条纹 C 是能量组分 f 和能量组分 e 相干叠加的干涉效应产生的。

3 结 论

文中通过开展不同入射角下激光对光电成像系统的干扰实验, 观察到光电探测器上多组圆环条纹并存的现象; 通过对实验所用光学系统进行拆解、测量、建模和光线追迹, 得到激光经光学系统传输后在探测器上的能量分布, 分析每一种能量组分的来源和移动情况, 揭示其机理为: 多组圆环条纹是由于光电探测器上不同能量组分的干涉效应而产生的, 并且给出产生多组圆环条纹中每一组圆环条纹所对应的两种能量组分。文中的研究结果可为评估激光对光电成像系统的干扰效果提供技术支撑, 对于丰富激光在光学系统中的传输理论有重要的意义。

参考文献:

[1] Wang Yanbin, Wang Guoliang, Chen Qianrong, et al. Study of laser disturbing effect under different F number of optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(Z2): s211001-1-7.

- (in Chinese)
- 王彦斌, 王国良, 陈前荣, 等. 光学系统不同 F 数下的激光干扰效果研究[J]. 光学学报, 2015, 35(Z2): s211001-1-7.
- [2] Liu Chang'an, Chen Jinbao, Ma Jinlong, et al. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1727-1730. (in Chinese)
- 刘长安, 陈金宝, 马金龙, 等. 红外激光对可见光 CCD 成像系统的干扰[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1727-1730.
- [3] Xu Yin, Sun Xiaoquan, Shao Li. Impact of laser jamming on target detection performance in CCD imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 989-993. (in Chinese)
- 徐银, 孙晓泉, 邵立. 激光干扰对 CCD 成像系统目标检测性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 989-993.
- [4] Han Kai, Xu Xiaojun. Study on saturation area of detector based on envelop of Airy function [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 94-97. (in Chinese)
- 韩凯, 许晓军. 基于艾里函数包络的探测器饱和面积[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 94-97.
- [5] Liu Yanwu. Experiment research on laser disturbing CCD detectors [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(1): 55-56. (in Chinese)
- 刘延武. 激光干扰 CCD 系统的实验研究 [J]. 激光杂志, 2011, 32(1): 55-56.
- [6] Guo Shaofeng, Cheng Xiangai, Fu Xiquan, et al. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786. (in Chinese)
- 郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1783-1786.
- [7] Wang Yanbin, Qi Fengjie, Li Hua, et al. Diffraction effect of entrance pupil by irradiating visible light array CCD with pulsed laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 011009. (in Chinese)
- 王彦斌, 齐凤杰, 李华, 等. 脉冲激光辐照可见光面阵 CCD 的入瞳衍射效应 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011009.
- [8] Che Jinxi, Xu Xiaojun, Zhang Hengwei, et al. Mechanism of laser flare in the infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1537-1541. (in Chinese)
- 车进喜, 许晓军, 张恒伟, 等. 红外成像系统中激光耀斑成因机理[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1537-1541.
- [9] Zou Qianjin, Chen Qianrong, Huang Zhenyu, et al. Mechanism analysis of regular concentric rings on laser disturbing CCD detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2017-2020. (in Chinese)
- 邹前进, 陈前荣, 黄振宇, 等. 激光干扰 CCD 规律圆形条纹作用机理分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2017-2020.
- [10] Sun Ke, Jiang Houman, Cheng Xiang'ai. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 493-499. (in Chinese)
- 孙可, 江厚满, 程湘爱. 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 493-499.
- [11] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser Radiation Effects on Semiconductor Material and Device[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 353. (in Chinese)
- 孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 半导体材料和器件的激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 353.