

文章编号:1001-5078(2024)09-01449-06

· 光电技术与系统 ·

# 长波激光对红外探测器成像干扰效果研究

韩刚<sup>1</sup>, 石学虎<sup>1</sup>, 范瑜<sup>2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>

(1. 北京遥感设备研究所, 北京 100039; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为了研究长波激光对红外探测器成像性能的影响, 利用 10.6  $\mu\text{m}$  激光开展了对红外探测器的干扰实验。根据图像采集结果, 随着激光功率增加, 可将干扰类型分为光斑不变区、扩展区和损伤区, 各区对应的功率阈值分别为  $9.35 \times 10^{-6}$ 、 $2.99 \times 10^{-4}$  和  $9.35 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ 。各激光功率下的光斑特性差异主要归因于激光作用机理的不同, 损伤区之前干扰效果主要由电子效应产生, 而损伤区则以热积累作用为主。本研究结果丰富了长波激光对长波红外成像系统干扰效应的理解, 为长波激光干扰的应用提供了依据。

**关键词:** 激光; 干扰; 探测器; 红外成像

中图分类号: TN249; TN977 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.016

## Research on jamming effect of long-wave laser on infrared detector imaging

HAN Gang<sup>1</sup>, SHI Xue-hu<sup>1</sup>, FAN Yu<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100039, China;

2. Key Laboratory of Optical Countermeasure Test and Evaluation Technology, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** To study the influence of long-wave laser on the detection performance of infrared imaging detector, interference experiments on infrared detectors are carried out using a 10.6  $\mu\text{m}$  laser. According to the image acquisition results, with the increase of laser power, the type of interference can be categorized into spot-invariant zone, expansion zone and damage zone, and the corresponding power threshold of each area is  $9.35 \times 10^{-6}$ ,  $2.99 \times 10^{-4}$  and  $9.35 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ , respectively. The differences of spot characteristics under varied laser power are mainly attributed to the difference of laser action mechanism. The interference effect before the damage zone is mainly generated by electronic effect, while the damage zone is dominated by thermal accumulation. The results of this study enrich the understanding of the interference effect of long-wave laser on long-wave infrared imaging system, and provide a basis for the application of long-wave laser interference.

**Keywords:** laser; jamming; detector; infrared imaging

### 1 引言

红外成像探测器以其可昼夜使用、穿透烟雾能力强的特点已广泛用于空空、空地、地空等多种战术武器中。然而, 随着激光技术的发展, 用于激光测

距、激光制导、激光干扰等的装备越来越多, 红外导引头所处的光电环境愈加复杂。国际战争形式的不断变化, 使激光干扰逐渐成为影响成像质量的重要因素。受激光干扰后的探测器件难以实现目标成

基金项目: 光电对抗测试评估技术重点实验室项目 (No. GKCP2020002) 资助。

作者简介: 韩刚 (1993 -), 男, 博士, 主要从事激光干扰成像研究。E-mail: yeahhanpei@163.com

通讯作者: 石学虎 (1986 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电制导与探测、信号处理方面的研究。E-mail: shixuehu1@163.com

收稿日期: 2023-11-20; 修订日期: 2023-12-31

像,或使成像制导武器因目标判断不准确而射偏,进而影响敌军对目标的攻击。因此,各国都聚焦于激光干扰技术的研究。

从 20 世纪 70 年代开始,Kruer、Bartoli 等人进行了大量激光损伤光电探测器靶材的实验,得到了某几个波长处几种探测器材料热破坏时激光强度阈值与辐照时间的关系曲线。Ric H. M. A. Schleijsen 等人使用中波红外高频 CO<sub>2</sub> 激光器干扰 CMT 式成像导引头,分析了中波激光干扰导引头成像的致炫现象<sup>[1]</sup>。我国国防科技大学的蒋志平等使用不同波长的激光照射红外探测器,研究了强激光辐照光电探测器所产生的各种效应<sup>[2]</sup>。殷艳华等人的研究证明激光能够对红外制导进行有效干扰<sup>[3]</sup>。王领等人研究了连续激光辐照对探测器截获目标的影响,分析了激光干扰成像器件的最佳条件<sup>[4]</sup>。荆卫国等人分析了 10.6 μm 激光对红外探测器干扰时的温升效应<sup>[5]</sup>。综上所述,激光对红外成像探测器干扰阈值、损伤效应与机理等方面的研究一直是国内外光电对抗研究的关键问题之一。虽然目前已有多个波长激光干扰的研究<sup>[6]</sup>,但对激光干扰红外探测器成像性能变化的研究依然不足。此外,10.6 μm 长波激光正好处于国外长波红外导引头的敏感波段,易对其造成干扰和毁伤,故此方面的研究尤为重要。

为此,本文开展了长波激光对成像探测器的干扰特性研究,分析长波激光参数(功率、辐照时间、重频等)对探测器成像效果的影响,得出激光对红外探测器的干扰规律及阈值。本研究可为长波激光干扰装备的干扰性能评估和抗干扰技术发展提供参考。

## 2 实验部分

图 1 所示为实验系统示意图,所采用 CO<sub>2</sub> 激光器输出波长 10.6 μm,最大功率约 37 W,重频 10 Hz ~ 25 kHz 可调,实测不同重频下到达探测器表面激光功率如表 1 所示。探测器选用分辨率为 640 × 512,工作波段 8 ~ 14 μm 的非制冷焦平面红外热像仪。通过激光控制系统和数据图像采集系统分别实现对激光输出功率和干扰图像的采集。衰减片工作波段为 2 ~ 14 μm,到达探测器表面激光功率通过不同衰减倍率的衰减片组合实现。此次试验中激光光源到探测器距离约 6.3 m,激光功率计放置于探测

器正前方测量到靶功率,图像采集时将其取下。



图 1 干扰试验实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interference test experimental system

图 1 所示实验主要由 CO<sub>2</sub> 长波红外激光器、非制冷长波红外探测器、激光控制系统、数据图像采集系统及其他相关仪器设备(包括电源、功率计等)组成,其中光源到探测器距离约 6.3 m,激光功率计放置于探测器正前方测量到靶功率,图像采集时将其取下。

结合图 1,先通过激光控制系统对输出激光功率调节,并测量到达探测器表面功率值,然后在相同激光参数下进行激光干扰实验。具体步骤:①搭建干扰试验平台(如图 1 所示)→②通过激光控制系统和衰减片组合将到靶激光功率调节至最低,逐步增大到靶激光功率并依次记录对应的数值→③功率测试完后取下功率计→④采用②中同样的功率设置,并通过图像采集系统获取不同激光参数条件下的干扰图像/动态视频结果→⑤分析图像干扰效果与激光参数的联系,得到激光干扰阈值。

不同重频时对应的到靶功率见表 1,本文第 3 节中各图下方的功率大小是以表 1 中的功率值为基础,再乘衰减片组合对应的衰减倍数得到的。

表 1 不同重频对应的到靶功率

Tab. 1 Target laser power corresponding to different repetition frequencies

序号	重频/Hz	无衰减片时到靶功率/mW
1	25000	14.4
2	1000	34.1
3	800	33.9
4	400	35.1
5	200	36.7
6	50	26.5
7	30	26.7
8	10	26.5

## 3 结果分析

### 3.1 激光功率的影响

图 2 所示为重频 10 Hz 时对应的激光干扰图像

变化,当到靶激光功率小于  $1.50 \times 10^{-6} \text{ mW/cm}^2$ , 探测器面未出现干扰光斑,表明此时探测器的目标跟踪性能不受影响;功率为  $1.50 \times 10^{-6} \text{ mW/cm}^2 \sim 9.35 \times 10^{-6} \text{ mW/cm}^2$ , 探测器开始出现干扰光斑,光斑灰度高于周围区域,但尚未达到饱和状态,在此能量范围内,光斑直径几乎保持不变,即激光干扰效果相同,称为激光干扰不变区。

当功率为  $1.50 \times 10^{-5} \text{ mW/cm}^2 \sim 2.99 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ , 主光斑中心亮度和直径均明显增加,光斑中心像元处于饱和状态,同时其周围还伴有弥散斑,光斑溢出现象随功率增加愈发明显。这是由于激光功率增加,探测器温度升高,使探测器光敏层出现大量热激发载流子并形成浓度扩散,周围像素载流子浓度升高,故干扰图像呈现为大于激光光斑面积的亮斑,称为激光干扰扩展区。较大的干扰光斑可降低对目标质心识别准确性,从而对目标跟踪产生偏差。

当功率为  $4.69 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ , 主光斑周围开始出现条纹,这与衍射有关<sup>[7]</sup>,且随功率增加条纹变得稠密。由于激光器输出高斯光束,实际光斑半径较大,由于光阑限制,激光在光路中易发生衍射,加之红外探测器灵敏度高,故微小的激光衍射能量可诱发明显的灰度响应,表现为规则条纹。

特别地,功率增至  $9.35 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$ , 探测器面出现了以光斑中心为交叉点的黑色十字线,这说

明探测器像素出现了一定程度的损坏,已不能准确地进行目标识别与跟踪。当激光作用停止后,探测器的黑色十字线逐渐消失,重新施加小能量激光干扰后不影响识别目标,说明在此条件下产生了软损伤,称为激光干扰损伤区。

其他重频值时也有上述类似现象,只是功率密度临界值不同。表2所示为不同重频下激光干扰的临界功率值。

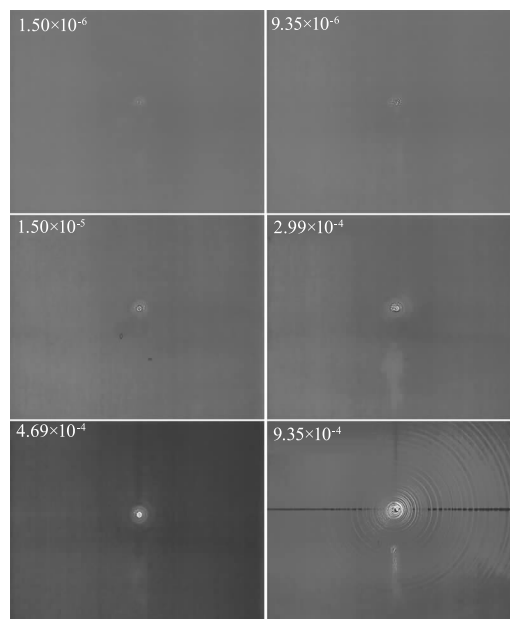


图2 重频 10 Hz 时干扰图像随激光功率密度的变化

Fig. 2 Variation of interference images with laser power densities at 10 Hz repetition frequency

表2 不同重频参数下激光干扰的临界功率密度值(单位:mW/cm<sup>2</sup>)

Tab. 2 Critical power density values of laser interference under different repetition frequencies( Unit:mW/cm<sup>2</sup>)

重频/Hz	未受影响	不变区最大值	扩展区最大值	衍射条纹	软损伤阈值
10	$1.50 \times 10^{-6}$	$9.35 \times 10^{-5}$	$2.99 \times 10^{-4}$	$4.69 \times 10^{-4}$	$9.35 \times 10^{-4}$
30	$1.51 \times 10^{-6}$	$9.42 \times 10^{-6}$	$3.01 \times 10^{-4}$	$4.73 \times 10^{-4}$	$9.42 \times 10^{-4}$
400	$1.98 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$3.95 \times 10^{-4}$	$6.21 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-3}$
25000	$8.11 \times 10^{-7}$	$5.08 \times 10^{-6}$	$1.63 \times 10^{-4}$	$2.54 \times 10^{-4}$	$5.08 \times 10^{-4}$

为了进一步分析激光功率对探测器的影响,提取出了光源探测器距离 2.3 m 条件下所得干扰数据中激光干扰扩展区的光斑中心所在水平线上各像元对应的灰度值,不同重频下的灰度分布曲线如图3所示(横坐标为光斑所占像素数,纵坐标为归一化后的像素灰度值)。

图3中各曲线水平段对应干扰光斑饱和区域大小,可以看出,随功率增加,光斑半径增大,与图2结

果类似;随着远离光斑中心,饱和区域两侧灰度分布曲线呈波动式下降,“波动”变化反映了干扰图像中出现的衍射条纹(类似于图2)。此外,虽然200 Hz重频激光功率密度更高,但其光斑饱和区域反而小于激光重频 10 Hz 的,说明干扰效果受重频影响更大,低重频激光干扰效果更明显。这是因为重频较低时,单脉冲功率密度越高,对探测器干扰效果越强。

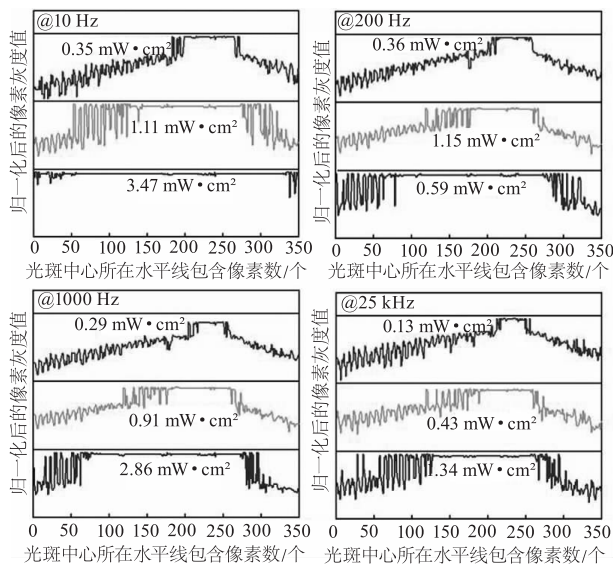


图3 光斑中心所在水平线像元灰度分布

Fig. 3 Pixel gray level distributions of horizontal line where the light spot center locating

图2和图3中较大饱和光斑、衍射条纹以及功率增加所导致的探测器软损伤,都降低了探测器跟踪目标的准确性。随着功率继续增大,甚至还可造成探测器的永久致盲。图4(其中光源探测器距离2.3 m, @134 mW/cm<sup>2</sup>)所示为激光干扰硬损伤效果,可以看到整个探测面均受到激光的影响,表现为亮白色,呈像素饱和状态,此时已经完全不能对目标进行跟踪检测。此外,光斑中心位置出现的黑色十字线,是由于强激光作用使探测器的布线电路损伤而导致部分像元中的电荷无法转移造成的,且在激光辐照停止后仍未能恢复正常,即激光干扰导致的硬损伤使探测器永久失效。

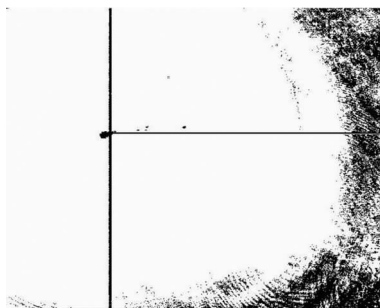


图4 重频 25 kHz 时的干扰效果图

Fig. 4 Interference effect diagram at 25 kHz

### 3.2 激光辐照时间的影响

图5(@ $9.35 \times 10^{-4}$  mW/cm<sup>2</sup>)所示为重频 10 Hz,激光作用总时长 2 s 内的干扰图像变化情况。由实时图像采集结果可知,随激光辐照时间增加,红

外探测器所成图像出现抖动,且光斑直径呈现“小→大→小→大……”周期性变化:即中心光斑直径由小变大,到达一定程度后光斑直径再由大变小,如此循环往复。在此过程中探测器面还伴有明显的衍射条纹和中心黑色十字线,这是由于热积累作用导致的损伤。不同于低重频时的周期性变化,重频较高时,随激光作用时间增加,激光干扰光斑仅呈由小逐渐增大的变化,而其他效应较弱。出现上述差异的原因在于,低重频时,辐照到探测器的相邻脉冲激光间隔大,激光作用不连续,导致干扰光斑变化不稳定,干扰图像出现抖动,且此时单脉冲能量较高,更易损伤探测器。而高重频时,相邻脉冲作用叠加明显,表现为干扰光斑的连续变化,但此时单脉冲能量低,故对探测器的损伤效果弱。

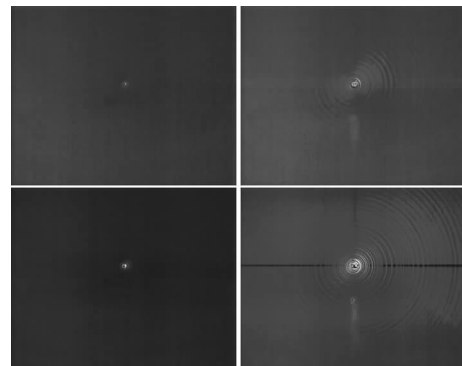


图5 重频 10 Hz 时干扰图像随时间的变化

Fig. 5 Variation of interference images over time at frequency of 10 Hz

### 3.3 激光重频的影响

为了最小化激光功率差异产生的影响,分别选取两组到靶激光功率密度近似相等的干扰图像(如图6所示)进行对比分析。

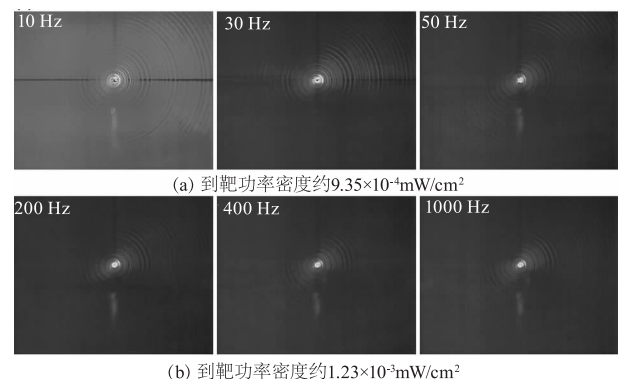


图6 不同重频时干扰图像变化

Fig. 6 Interference image changes at different repetition frequencies

由不同重频时干扰图像变化可知:当频率小于 50 Hz 时,随着重频增加,干扰光斑直径变小;频率

大于 50 Hz 时,干扰光斑大小随重频增加几乎保持不变(仅略微变小)。此外,低重频(< 50 Hz)的光斑半径明显大于高重频(> 50 Hz)的,这主要是受试验时探测器频率参数(50 Hz)的影响。图 6 中各重频参数时均伴有以光斑中心为交叉点的黑色十字线。当重频小于 50 Hz 时,重频越低,黑色十字线(即激光干扰)越明显,干扰效果越明显,这与 3.1 节结论一致。重频大于 50 Hz 时,干扰效果相似。

### 3.4 激光干扰机理分析

根据上述实验过程中所出现的三类明显激光干扰现象,分析其产生机理如下:

(a) 干扰亮斑。激光干扰图像中所出现的饱和和干扰亮斑,主要是由光电效应引起的,激光辐照所产生的电子-空穴对在扩散过程中被 pn 结分开,当 n 区电子浓度达到饱和时即表现为像素饱和现象。

(b) 弥散斑。激光辐照时所出现的弥散斑主要是由于激光作用使探测器温度升高,导致光敏层出现大量热激发载流子,载流子扩散使周围像素载流子浓度升高,进而 n 区电子浓度增加,影响了像素输出电压,故表现为大于光斑面积的亮斑。

(c) 像素损坏。随激光作用时间增加,除少量激光能量被转化为有用的光信号输出外,大部分激光能量被材料吸收后转变为热能,热积累导致探测器升温。温升会使探测器出现热饱和、材料结构变化甚至汽化烧蚀等现象,可造成探测器结构的硬破坏。

### 3.5 激光干扰效果评估

激光干扰效果即激光作用后的目标探测识别能力倍受关注。基于前述实验结果,可以看到激光干扰不变区对应的光斑通常较小,处于此功率密度范围的激光几乎不会对探测器性能和目标识别产生干扰;激光干扰损伤区由于探测器受损已完全不能对目标进行识别,干扰效果最佳;激光干扰扩展区内光斑大小逐渐增加,干扰效果可从目标与光斑的重合程度角度评估,含以下三种情况。

#### 3.5.1 目标与光斑无重合

此时虽然探测器面中同时出现目标和光斑图像,但不影响成像系统对目标的锁定与稳定跟踪,认为干扰无效。

#### 3.5.2 目标与光斑部分重合

若只发生部分重合,探测器对目标识别时,会产生

偏差,导致不能正常跟踪目标。此时将依据已有图像算法所得的“目标”中心攻击,判定为干扰有效。进一步地,以实际攻击点与真目标实际位置的相对距离(即离轴量大小)评估干扰效果。

#### 3.5.3 目标与光斑完全重合

类似于探测器面完全饱和的情况,丧失目标跟踪能力,认为干扰有效。

## 4 结论

通过长波激光器对长波红外成像探测器的干扰试验研究,可得以下结论:

(1) 随激光功率密度增加,对探测器的干扰效果可划分为不变区、扩展区、损伤区;

(2) 激光功率密度较小时,在红外探测器上形成较小的激光干扰光斑,光斑亮度(像素饱和程度)和大小均随激光功率而增加。未超过探测器损伤阈值时,停止激光辐照后,探测器成像可恢复至正常工作状态,目标跟踪性能不受影响;

(3) 激光功率密度超过探测器损伤阈值时,探测器出现像素饱和甚至损伤现象,辐照过程中的饱和、损伤现象使得对目标质心识别准确性降低,丧失对目标跟踪检测的能力;

(4) 重频较低时,随激光作用时间增加,干扰光斑呈现直径由小变大,再变小的周期性变化,且此过程中光斑直径整体逐渐变大;重频较高时,随激光作用时间增加,干扰光斑直径由小逐渐增加。无论重频取何值(功率密度  $> 1.23 \times 10^{-3} \text{ mW/cm}^2$ ),探测器面出现的黑色十字线是热积累导致的损伤作用。

基于实验结果,提出了干扰效果评估策略。本研究重点关注激光参数对干扰效果的影响,但鉴于不同探测器存在较大差异,探测器干扰效果还与其材质、像元尺寸和制冷方式等多种因素相关,后续工作将考虑探测器相关参数对干扰效果和阈值的影响,进一步加深对干扰效应的认知,并为激光对红外探测器干扰技术研究提供丰富实验支撑。

## 参考文献:

- [1] Schleijsen R M A, Dimmeler A, Eberle B, et al. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]//Optics/Photonics in Security and Defence, 2007: 673800-1-10.
- [2] Jiang Zhiping, Liang Tianjiao, Lu Qisheng, et al. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detectors when irradiated by laser [J]. Applied Laser, 1995, 15 (4): 155 -

156. (in Chinese)  
蒋志平, 梁天骄, 陆启生, 等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器热效应的计算[J]. 应用激光, 1995, 15(4): 155 - 156.
- [3] Yin Yanhua, Wang Xuwei. Simulation research on the jamming performance of laser to IR imagery guidance[J]. Infrared Technology, 2008, 30(1): 18 - 20. (in Chinese)  
殷艳华, 王学伟. 强激光干扰红外成像制导弹效能仿真研究[J]. 红外技术, 2008, 30(1): 18 - 20.
- [4] Wang Ling, Zhang Bin, Lei Wei. The simulation experiment of laser jamming on CCD imaging seeker[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(1): 41 - 44. (in Chinese)  
王领, 张斌, 雷威. 激光对 CCD 导引头的干扰仿真实验[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 41 - 44.
- [5] Jing Weiguo, Tian Chao, Wang Hongpei, et al. Study on interference characteristics of 10.6  $\mu\text{m}$  laser on infrared imaging system[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(4): 497 - 502. (in Chinese)  
荆卫国, 田超, 王红培, 等. 10.6  $\mu\text{m}$  激光对红外成像系统干扰特性研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 497 - 502.
- [6] Li Xingliang, Niu Chunhui, Ma Muyan, et al. Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Infrared Technology, 2016, 38(1): 6 - 9, 20. (in Chinese)  
栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 等. 10.6  $\mu\text{m}$  激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究[J]. 红外技术, 2016, 38(1): 6 - 9, 20.
- [7] Zou Qianjin, Chen Qianrong, Huang Zhenyu, et al. Mechanism analysis of regular concentric rings on laserdisturbing CCD detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2017 - 2021. (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 - 2021.