

CO₂ 激光对氧化钒成像设备干扰实验研究

邹前进¹, 张恒伟¹, 刘明菊², 路亚旭¹, 刘小虎¹, 王东¹, 陈育斌¹
(1. 63891 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 63893 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:随着红外成像技术发展,非制冷氧化钒探测器在多个领域得到了应用,其在激光辐照下的热效应如何,也成为了当前研究方向之一。本文首先分析了氧化钒成像探测器结构和工作原理。其次开展了激光辐照饱和及点损伤条件下,10.6 μm 脉冲激光辐照氧化钒成像设备实验。在激光辐照饱和条件下,光斑中心像元出现饱和现象,激光辐照结束后,该像元响应较辐照前增加了约 20 个灰度;该像元周围像素出现了环状异常,非均匀性校正后探测器恢复正常;在激光辐照点损伤条件下,出现了圆环干扰效应,光斑中心像元出现了损伤,即使非均匀性校正也无法恢复;给出了相应激光功率密度。根据实验结果,对衍射效应进行了仿真,指出衍射、探测器热效应及热量“溢出”是导致探测器像元异常像素数大于辐照光斑的原因。本文对非制冷氧化钒探测器研制及干扰效应研究具有重要参考意义。

关键词:氧化钒成像设备;干扰;CO₂ 激光;实验

中图分类号:TN248.5;TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.018

Experimental study of CO₂ laser interference with VO_x imaging equipment

ZOU Qian-jin¹, ZHANG Heng-wei¹, LIU Ming-ju², LU Ya-xu¹, LIU Xiao-hu¹,
WANG Dong¹, CHEN Yu-bin¹

(1. No. 63891 Troops of PLA, Luoyang 471003, China; 2. No. 63893 Troops of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Uncooled infrared detectors have been applied in several fields with the development of infrared imaging technology, and how their thermal effect under laser irradiation has become one of the current research directions. In this paper, the structure and working principle of VO_x imaging detector are analyzed at firstly. Then, experiments of laser irradiation VO_x uncooled IR imaging equipment under saturation and point damage by 10.6 μm pulse laser is carried out. Under laser irradiation saturation conditions, saturation occurs in the center image element of the spot, and at the end of the laser irradiation, the response of this image element increases by about 20 grey levels compared to the pre-irradiation period. The pixels around jamming spot center are abnormal corresponding, and return to normal after non-uniformity correction; under laser irradiation point damage conditions, a circular interference effect occurred, and the pixels in the center of the jamming spot show damage, which could not be recovered even with non-uniformity correction. And the corresponding laser power densities are given. Based on the experimental results, the diffraction effect is simulated, and it is pointed out that the diffraction, the thermal effect of the detector and the heat "overflow" are the reasons leading to the detector pixel anomaly larger than the irradiated spot. This paper is an important reference for the development of uncooled VO_x detectors and the study of interference effects.

Keywords: VO_x uncooled IR imaging equipment; jamming; CO₂ laser; experiment

1 引言

当前对抗中对信息的获取需求较为强烈,是否能够获取相关的态势和信息已成为制胜的关键因素之一。红外成像设备作为获取信息的重要手段之一,在侦察和监视领域得到了较为广泛的应用^[1]。红外成像设备可通过实时侦察记录图像信息,实现对目标的侦察监视;还可用于成像制导,为目标锁定指引方向^[2]。随着非制冷红外成像技术的不断发展,非制冷氧化钒探测器性能接近了制冷型红外探测器的水平^[3]。由于其相对较低的制造成本和较高的性能,在当前许多领域得到了应用^[4]。而针对成像侦察和制导的威胁,目前发展出了伪装干扰、烟幕干扰、假目标干扰和激光干扰等红外对抗技术^[5-7],其中激光干扰因其具有较高的效费比,一直是国内外研究的重点领域。激光干扰主要通过激光辐照氧化钒探测器,使探测器在一定时间内失效或永久损伤。

车进喜等开展了 CO₂ 激光对非制冷多晶硅红外热像仪的饱和阈值研究^[8];王东等开展了脉冲激光对多晶硅探测器干扰损伤实验^[9];周冰等开展了通过 10.6 μm 连续激光辐照多晶硅实验^[10]。但尚未见对于氧化钒探测器辐照远场辐照实验。考虑非制冷氧化钒探测器具有较高的热响应,因而它在激光的辐照下较为容易导致饱和致盲,甚至产生永久损伤,因此一旦损伤则停止实验。本文以氧化钒探测器为例,分析了氧化钒探测器结构和工作原理,并开展了激光辐照饱和及点损伤条件下 10.6 μm 脉冲激光辐照氧化钒成像设备远场实验。结合实验结果,对激光衍射效应进行了仿真,分析了氧化钒探测器饱和及热效应损伤的机理。激光辐照氧化钒成像设备实验研究不但可为激光干扰设备的研究提供相关数据和理论支撑,还可为氧化钒探测器研制开发相关抗干扰技术提供参考,具有较为重要的现实意义。

2 氧化钒成像设备

当前多数非制冷红外成像设备的核心元件为氧化钒红外探测器阵列,一般规格为 640 × 512、1024 × 768 和 1920 × 1080 等,像素尺寸一般为 17 μm,甚至到 12 μm^[3]。氧化钒探测器主要利用氧化钒光敏材料响应目标红外波段的辐射;氧化钒探测器阵列多置于光学系统焦平面,然后与信号读出电路相连,接收场景区域长波红外辐射后进行光电转换,最终实

现对场景成像功能^[1-3]。

氧化钒成像设备的探测器单元多为桥式结构,如图 1 所示^[3]。探测器单元桥面上的光敏材料响应场景长波红外辐射,升温后光敏材料的电阻值发生变化;桥腿部分使用相应偏置电路连接,可实时采集探测器成像单元的信号,此外还具有支撑和导热作用^[3,10]。探测器成像单元的衬底一般为红外波段的反射面,可与之距离波长四分之一的光敏材料面形成谐振腔,增加光敏材料面的吸收率;当前氧化钒材料响应波长多为 8 ~ 14 μm,因此两者的距离一般在 2.5 μm 左右^[3,10]。

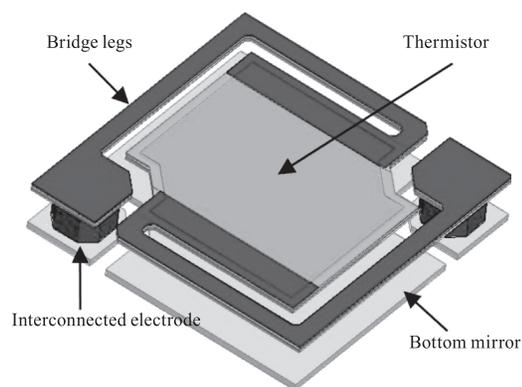


图1 氧化钒探测器像元结构示意图

Fig.1 The pixel structure of VO_x detector

目前氧化钒探测器单元多采用脉冲式直流偏置电压,进而采集探测器单元产生的电流信号;在下一个信号产生前,该信号被读出电路保持、复用和放大。阵列探测器单元工作时,由主时钟按固定的频率产生控制信号,阵列信号被逐行采集^[11]。对于固定帧频的成像设备,探测器单元每秒受到偏置次数与帧频一致,时间一般不大于 120 μs。

由上,探测器单元信号被读出时,信号一般由与像元连接的信号读出电路金属氧化物半导体(MOS)场效应晶体管输出。探测器单元存在等效偏置电阻,在相应大小的偏置电压的作用下,探测器单元上的偏置分压会随着探测器电阻而变化;MOS管线性放大该电压信号,从而转化为信号电流,最终被信号读出电路采集及使用。信号电流一般如下式所示^[10]:

$$I_{DS} = \begin{cases} \beta \left[(U_R - U_{TH})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right], & (0 \leq U_{DS} \leq U_R - U_{TH}, \text{Linear}) \\ \beta \frac{(U_R - U_{TH})^2}{2}, & (0 \leq U_R - U_{TH} \leq U_{DS}, \text{Saturated}) \\ 0, & (U_R - U_{TH} \leq 0, \text{Closing}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{DS} 为探测器 MOS 管的漏源电流; U_R 为探测器两端 MOS 管栅源的电压; U_{TH} 为开启电压; U_{DS} 为漏源电压; β 为跨导系数。

由上, 该信号电流是探测器单元原始信号; 因此 MOS 管的工作状态表征了该探测器单元的状态, 一般情况下随着温度的升高探测器的 U_R 不断减少。在阵列探测器单元响应场景长波红外辐射时, 信号读出电路逐行进行偏置, A/D 转换电路实现灰度量转换, 对于 8 位探测器灰度范围为 0 ~ 255, 探测器单元灰度一般与场景长波辐射亮度成线性关系^[4,10]。

3 激光干扰实验

本文采用 CO₂ 脉冲激光器在远场条件下对氧化钒成像设备干扰实验。实验 CO₂ 脉冲激光器波长为 10.6 μm , 输出功率不小于 1 W, 束散角不大于 1 mrad。实验的氧化钒红外成像设备像素规模为 640 × 512, 波段为 8 ~ 14 μm , 像元尺寸为 17 μm × 17 μm , 光学系统焦距为 25 mm。实验原理布局如图 2 所示。

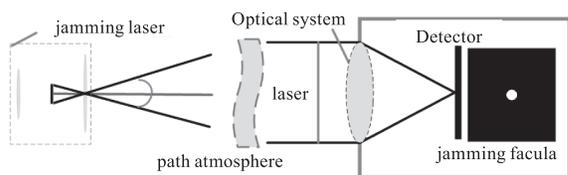


图 2 干扰实验布局原理图

Fig. 2 The jamming experiment layout schematic diagram

按上述布局实施脉冲激光辐照氧化钒成像设备实验, 每次激光辐照持续时间约为 10 s。在激光辐照饱和及点损伤条件下, 得到了以下干扰现象:

当辐照激光功率密度达到约 $7 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ 时, 探测器光斑中心灰度值达到饱和 (灰度值为 255) 如图 3 和图 4 所示。停止激光辐照后该情况立即消失, 即出现了点饱和的现象。另外光斑中心周围像素灰度响应出现了异常, 环绕光斑中心成环状, 对探测器正常成像性能产生了影响, 如图 3 所示。此外, 通过统计辐射前、辐射时和辐射后光斑中心点

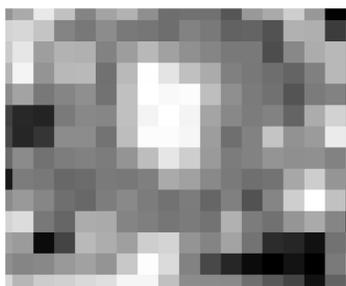


图 3 饱和干扰下光斑中心灰度分布

Fig. 3 The gray distribution of saturated jamming spot center

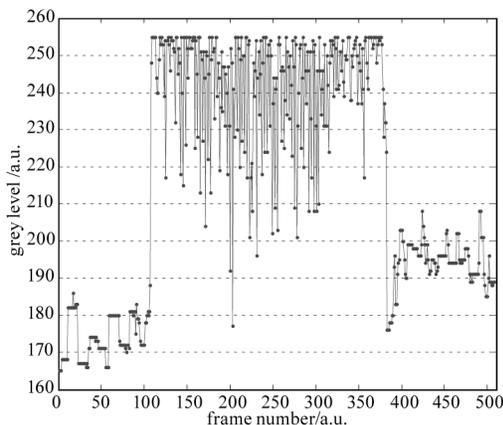


图 4 饱和干扰下光斑中心灰度变化曲线

Fig. 4 The curve of gray level change of saturated jamming spot center 灰度变化可以发现, 在激光辐照停止后, 光斑中心灰度响应值增加了约 20 个灰度, 如图 4 所示。但探测器进行非均匀性校正后, 设备可恢复正常, 如图 5(a) 所示。

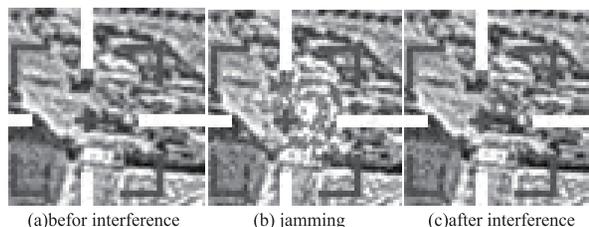


图 5 点损干扰前后光斑中心灰度分布变化

Fig. 5 The gray distribution of point damage jamming spot center

当辐照激光功率密度达到约 $1.5 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$ 时, 探测器干扰光斑增大, 光斑中心灰度饱和, 出现了圆环状干扰, 对目标形成了明显遮挡, 如图 5(b) 所示。同时, 即使激光辐照停止光斑中心像素灰度一直为 255 左右, 如图 6 所示。另外, 即使重新进行非均匀性校正, 探测器光斑中心像元的响应也无法恢复, 同时探测器光斑中心外响应降低区域成环状, 如图 5(c) 所示。

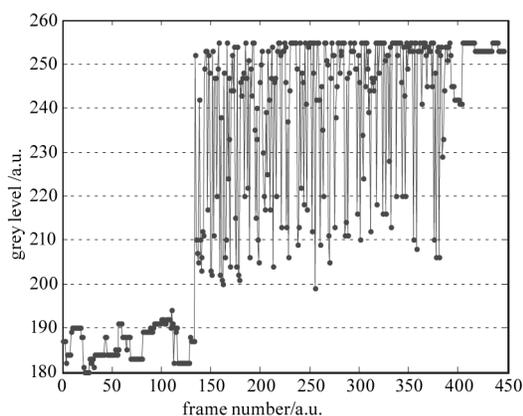


图 6 点损干扰下光斑中心变化曲线

Fig. 6 The curve of gray level change of point damage jamming spot center

4 实验结果分析

一般距干扰离较远时,激光可以近似为点光源。成像设备的入射光阑通常为圆形,在成像设备处的辐照光斑一般大于接收孔径,干扰光斑形状可假定为圆形。假设光学系统焦距为 f ,辐照激光经光学系统会聚到探测器上。探测器上干扰光斑大小为^[12]:

$$d = f \times \sqrt{\theta_y^2 + \theta_i^2 + \theta_d^2} \quad (2)$$

其中, θ_y 为衍射角; θ_d 为光源抖动角; θ_i 为大气扩展抖动角; f 为镜头焦距。

正对成像设备入射时,干扰光斑中心接近探测器中心,干扰光斑成像于视场中心。外场远距离干扰成像设备时,激光可以简化为点光源,可用点扩散函数来求解激光能量分布^[1,12]。对于圆孔式光学系统,衍射光斑由光阑大小、工作波段和光学系统焦距等因素决定。其能量分布一般可由夫琅禾费圆孔衍射近似求得^[1,12]。根据光的衍射理论,得到探测器上一阶 Bessel 函数表示的光强度分布为:

$$I(v) = I_0 \left[\frac{2 J_1(v)}{v} \right]^2 \quad (3)$$

式中:

$$I_0 = \left(\frac{\pi d^2 E_0}{\lambda f} \right)^2 \quad (4)$$

$$v = \frac{2\pi dr}{\lambda f} \quad (5)$$

式中, d 为光学系统半径; r 为考察点到艾里斑中心的距离; λ 是激光的波长; f 为光学系统焦距; E_0 为光斑中心处的电场强度。

因此得到 E_0 也就得到了光强 I_0 。成像设备饱和时,探测器远离光斑中心的像元满足 $v \gg 1$ 。因此随着辐射光功率升高,光斑强度增加。氧化钒成像设备衍射效应仿真结果如图 7 所示。

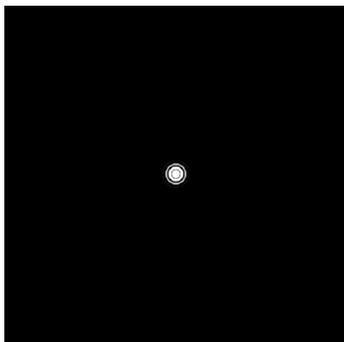


图 7 圆孔光阑衍射仿真结果

Fig. 7 The gray distribution of saturated jamming spot center

根据氧化钒成像设备工作原理、实验结果和衍

射效应仿真结果,在饱和干扰时:(1)当激光辐照时,辐照激光能量较大,光斑中心的像元饱和,灰度值达到了 255。(2)由于辐照激光能量较大和辐照时间较长,被辐照探测器光斑中心单元沉积了较多的热量,探测器单元无法即使散去沉积的热量;导致该像元及周围衬底温度升高,因此激光辐照停止后光斑中心像元仍然响应异常;但探测器再次非均匀性校正后,探测器可正常工作。(3)同时由于探测器单元之间存在热量传导作用,导致被辐照单元周围的其他像素响应异常像元工作异常。

在点损伤干扰下:(1)激光辐照前,成像设备正常成像。(2)激光辐射后,由于干扰激光能量较大,出现了衍射干扰现象,其能量分布近似夫琅禾费圆孔衍射,如图 5(b)所示和图 7 所示。(3)由于辐照激光能量较大,光斑中心像元温度大于了氧化钒材料的相变点;由于探测器单元相变,激光辐照中心像元区域发生了不可逆变化,即使非均匀性校正后也不可恢复;同时光斑中心外响应出现了环状降低。

5 结论

本文进行了 10.6 μm 脉冲激光辐照氧化钒成像设备外场实验,得到了探测器像元点饱和及点损伤时的功率密度。分析了点饱和及点损伤过程中的探测器热效应机理,仿真了激光干扰衍射效应。由实验结果可知,激光辐照氧化钒成像设备时,在饱和及初步点损时即可影响探测器成像性能,在光斑中心及周围像素出现响应异常,影响探测器最终成像能力。同时受氧化钒成像设备探测器能力现状,氧探测器在激光辐射下较为容易发生点损伤。本文对非制冷氧化钒探测器研制及干扰效应研究具有重要参考意义;还可为激光干扰设备的研究提供相关数据和理论支撑。

参考文献:

- [1] Jiang Kan. Simulation modeling technology of laser jamming effect on space-based early warning system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020:8 - 15. (in Chinese)
蒋侃. 天基预警系统激光干扰效果仿真建模技术[D]. 武汉:华中科技大学,2020:8 - 15.
- [2] Liu Zhen, Wu Xinyuan, Chen Shichao, et al. Analysis on development of typical infrared precision guided weapons [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guid-

- ance,2022,42(1),19-27. (in Chinese)
- 刘箴,吴馨远,陈士超,等. 典型红外精确制导武器发展分析[J]. 弹箭与制导学报,2022,42(1),19-27.
- [3] Ye Zhenhua, Li Huihao, Wang Jindong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. J. Infrared Millim. Waves,2022,42(1),15-38. (in Chinese)
- 叶振华,李辉豪,王进东,等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报,2022,42(1),15-38.
- [4] Li Jing, Song Guang, Dong Shan, et al. Research progress and trend of uncooled infrared focal plane detectors [J]. Infrared,2020,41(10),1-24. (in Chinese)
- 李静,宋广,董珊,等. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势[J]. 红外,2020,41(10),1-24.
- [5] Li Nan. Impact of smoke jamming on the probability of seeker hit by infrared imaging [J]. Laser & Infrared, 2021,51(3):358-362. (in Chinese)
- 李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. 激光与红外,2021,51(3):358-362.
- [6] Liu Jianyong, Shen Junping, Hu Jianghua, et al. Camouflage way of countering infrared imaging guided anti-tank missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2):184-187. (in Chinese)
- 刘建永,沈均平,胡江华,等. 对抗红外成像制导反坦克导弹的一种伪装方法[J]. 红外与激光工程,2005,34(2):184-187.
- [7] Li Yi. Modeling and simulation of infrared seeker imaging system with aero-dynamic and laser jamming effects [D]. Xi'an: Xidian University, 2017:73-76. (in Chinese)
- 李奕. 气动效应及激光干扰红外导引头成像建模仿真研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2017:73-76.
- [8] Che Jinxi, Zhang Hengwei, Wang Dong, et al. Experiment study on the saturation thresholds of uncooled IR imaging irradiated by 10.6 μm CO₂ laser [J]. Laser & Infrared, 2010,40(8):855-858. (in Chinese)
- 车进喜,张恒伟,王东,等. 10.6 μm CO₂激光对非制冷红外热像仪饱和阈值的实验研究[J]. 激光与红外,2010,40(8):855-858.
- [9] Wang Dong, Wang Fei, Bai Bing, et al. experiment study on the jamming and damage thresholds of polycrystalline silicon detector irradiated by 10.6 μm pulsed CO₂ laser [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9):1085-1087. (in Chinese)
- 王东,王非,白冰,等. 10.6 μm 脉冲激光对多晶硅探测器干扰损伤实验[J]. 激光与红外,2015,45(9):1085-1087.
- [10] Zhou Bing, He Xuan, Liu Hexiong, et al. Research on laser irradiation uncooled microbolometer based on finite element analysis [J]. Laser Technology, 2020, 44(4):411-417. (in Chinese)
- 周冰,贺宣,刘贺雄,等. 激光辐照非制冷微测辐射热计的理论研究[J]. 激光技术,2020,44(4):411-417.
- [11] Liao Bangfan. Research on imaging algorithm of uncooled infrared polarization detector [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020:96-110. (in Chinese)
- 廖邦繁. 非制冷红外偏振探测器成像算法的研究[D]. 成都:电子科技大学,2020:96-110.
- [12] Li Shenpeng. Mechanism and experimental study of laser saturation jamming on infrared thermal imager [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021:80-95. (in Chinese)
- 李申鹏. 激光对红外热像仪饱和干扰调控机理及实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021:80-95.