

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0102 - 03

CO₂ 激光对长波红外 HgCdTe 探测器干扰的分析

王思雯^{1,2}, 李岩¹, 郭立红¹, 郭汝海¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 激光干扰是对抗精确制导武器、保卫己方目标的重要方式。针对高功率 CO₂ 激光对某光导型长波红外 HgCdTe 探测器的干扰损伤进行了理论分析与实验研究。根据实验结果, 利用激光辐照探测器的温升理论模型, 计算了温升随辐照时间和功率的关系, 并和 CO₂ 激光器辐照光导型长波红外 HgCdTe 探测器的实验结果进行了对比。理论和实验结果表明, 此探测器的干扰阈值为 16.5 W/cm², 损伤阈值为 126 W/cm²。实验结论对研究激光干扰星载探测器技术具有一定的参考价值。

关键词: 激光干扰; 探测器; HgCdTe; 干扰阈值; 损伤阈值

中图分类号: TN249; TN215 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON THE DISTURBANCE OF CO₂ LASER TO LONG-WAVE INFRARED HgCdTe DETECTOR

WANG Si-Wen^{1,2}, LI Yan¹, GUO Li-Hong¹, Guo Ru-Hai¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Laser dazzling is important for the countermeasures of precision guided weapons and self defence. In this study, the disturbance and damages of high-power CO₂ laser to long-wave infrared (LWIR) HgCdTe detector were studied theoretically and experimentally. Based on the results of experiment, the relationship between the temperature-rise of detectors and the time of laser irradiation on the detector and the power of laser was calculated by using the theoretical model of temperature-rise. The theoretical results were compared with the experimental results of HgCdTe detector irradiated by CO₂ laser. The theoretical and experimental results demonstrate that the interference threshold of the detector is 16.5 W/cm² and the damage threshold is 126 W/cm². The conclusions have a reference value for laser jamming satellite-based detector.

Key words: laser disturbance; detector; HgCdTe; jamming threshold; damage threshold

引言

HgCdTe 光电探测器因具有高吸收系数、高量子效率、高探测率和宽响应波段等许多优点被广泛应用于军事、工业和气象等领域, 但是红外探测器又是弱光探测器件, 强激光辐照探测器极易造成干扰和破坏, 使其失去探测能力, 从而造成整个光电系统无法正常工作甚至破坏, 因而研究各种强度的激光辐照对 HgCdTe 探测器性能造成的影响是十分重要的。目前, 国内外已开展了不少有关激光损伤效应的实验和理论工作, 这些工作大都集中在低功率、近距离对探测器及材料的干扰损伤的研究, 而对于大功

率 CO₂ 激光在远场 10km 处辐照 HgCdTe 探测器使其达到干扰与损伤的研究, 在作者所查文献范围内仍未见报道^[1-5]。

本文利用激光辐照探测器的温升理论模型, 针对 CO₂ 激光器和探测器的参数, 对激光辐照探测器的理论和实验结果进行了讨论。

1 激光干扰探测器的理论分析

强激光对探测器的干扰或破坏效应主要有: 强激光使探测器产生饱和效应及记忆效应、强激光导致半导体材料电学参数的改变、热效应破坏探测器材料以及力学效应造成探测器结构的硬破坏等。本

收稿日期: 2009 - 03 - 28, 修回日期: 2009 - 12 - 10

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

作者简介: 王思雯 (1983-), 女, 吉林松原人, 博士生, 主要从事光电对抗、激光干扰等方面的研究。

Received date: 2009 - 03 - 28, revised date: 2009 - 12 - 10

文主要讨论热效应破坏. 激光对探测器的热损伤是由探测器吸收激光能量升温后熔化或汽化引起的, 主要表现为 Hg析出, 更高温度时表现为晶体上的焊接引出线的 In脱落和 HgCdTe熔化. 研究表明^[6]当温度大于 353K时, Hg析出; 温度高于 423K时, In会熔化; 温度达 993K以上时, HgCdTe熔化. 此外, 温度的变化能够引起 Hg_{1-x}Cd_xTe禁带宽度、长波限和峰值响应波长等参数甚至材料组分结构的改变, 根据 Schmit公式^[7]

$$\lambda_c = [1.28x - 0.20 + 0.264x^2 + 4.22 \times 10^{-4} T(1 - 2.08x)] J^{-1}, \quad (1)$$

λ_c 为探测器响应的长波限, T 为温度. 则激光辐照探测器后, 随着探测器温度的变化, 可造成响应波长发生变化, 探测器的性能下降.

探测器温升是一个比较复杂的三维模型, 考虑到经过远距离传输后, 激光光斑的尺寸远大于激光脉冲作用时间内热量的传播深度, 则可按一维热传导问题处理, 并把探测器视为表面被均匀加热的半无限大物体. 此时的热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

探测器表面的激光功率密度在时间上恒定不变, 且分布均匀时的边界条件为

$$z = 0, \quad -\partial T / \partial z = I_s, \quad (3)$$

$$z = \infty, \quad t = 0, \quad T = 0 \quad (4)$$

则在材料表面处的温升为

$$T(0, t) = \frac{2 I_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a_i t}{c \rho}}, \quad (5)$$

式中, α 为探测器表面对激光的吸收比, I_s 为作用于探测器表面的激光功率密度, a_i 为探测器材料的热扩散率, 且 $a_i = \lambda / c$, ρ 为材料密度, c 为比热容, λ 为材料热导率.

2 激光干扰探测器的实验研究与分析

2.1 实验装置与实验过程

实验光路示意图如图 1. 信号源为连续 CO₂激光器. 该光束经分束器分束, 一路送激光功率计进行

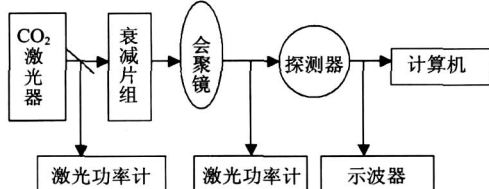


图 1 实验光路示意图

Fig 1 Schematic diagram of experimental system

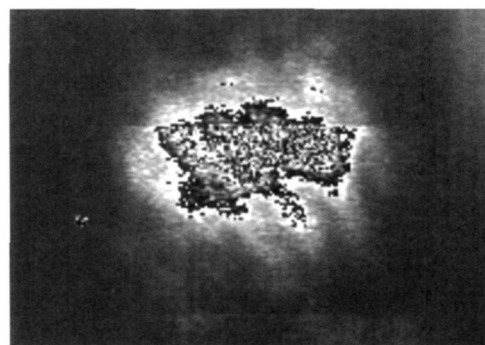


图 2 激光干扰红外探测器的图像

Fig 2 The infrared image jammed by laser

检测, 另一路经光学衰减器、光学会聚透镜、探测器, 最后得到的是干扰后的器件输出波形, 用计算机采集干扰图像. 通过增减光学衰减器组的衰减片数, 可以改变到达探测器上的干扰激光强度.

实验中将系统从正常工作、受弱干扰、受强干扰、器件失效的全部过程记录下来. 将红外探测器输出信号波形发生畸变时对应的干扰激光功率密度 (W/cm^2) 称为干扰阈值; 将探测器输出信号变为零时的干扰激光功率密度称为破坏阈值.

实验中用某型号的红外成像观瞄设备, 其探测器为光导型碲镉汞红外焦平面器件 (制冷), 波段: $8 \sim 12\mu m$, 探测器像元: 640×480 , 像元尺寸 $28\mu m$, 口径: $200mm$, 焦距: $40mm$, 激光光源选择 $2.5kW$ 连续 CO₂激光器, 激光器距离探测器 $10km$.

2.2 实验结果与分析

实验过程中通过减少衰减片数以增加到探测器上的干扰激光强度, 测得当照射到光学系统前的激光功率密度为 $0.0212W/cm^2$ 时, 达到干扰, 计算机采集到的图像如图 2. 此时 $10.6\mu m$ 激光干扰信号被红外探测系统所接收, 并进入其放大电路的通频带. 当干扰激光功率达到器件饱和水平时, 虽然已经超出了红外系统的自动增益控制限度, 使之无法正常检测信号, 但还未达到使其永久损坏的程度. 所以干扰信号一旦消失后, 系统马上又恢复正常工作. 虽然此时探测器并未真正被打坏, 但这种激光干扰对于任何一个制导或跟踪系统来说, 都将构成致命打击.

继续减少衰减片组数, 当照射到探测器前的激光功率密度为 $0.145W/cm^2$ 时, 探测器迅速减小至无信号输出. 撤去所有衰减片, 经大气衰减后, 激光功率密度为 $0.161W/cm^2$, 停止辐照片刻后重新加上调制器信号, 探测器仍然无信号输出, 初步判断此时探测器达到损伤.

表 1 会聚到探测器靶面的激光功率密度

Table 1 The laser power density on the detector's surface

E (W/cm ²)	I_s (W/cm ²)
0.0212	16.5
0.145	125

表 2 实验中探测器温升计算结果

Table 2 Experimental results of detector's temperature rise

I_s (W/cm ²)	t (s)	T_s (K)
16.5	2	143
126	2	396

探测器的光学系统具有一定的光学增益,用式

(6)表示

$$I_s = E \cdot \tau \cdot (D/d)^2, \quad (6)$$

E 为照射到光学系统前的激光功率密度, τ 为光学系统总透过率, D 为探测器光学系统接收孔径, d 为探测器光敏面直径. 取 $\tau = 0.5$, 将已知条件和实验数据代入式(6), 求出会聚到探测器靶面的激光功率密度 I_s (如表 1) 以确定干扰、损伤阈值.

由以上分析及计算可知, 此探测器干扰阈值为 16.5 W/cm^2 , 损伤阈值为 126 W/cm^2 .

由式(5)可知材料在激光辐照时的温度可以根据下面的方程进行估算:

$$T_s = T_0 + \frac{2 I_s}{k} \sqrt{a_1 t}, \quad (7)$$

式中, T_s 为激光辐射靶材的表面温度, T_0 为初始温度, t 为激光辐照时间. 表 1 给出了激光功率密度为 16.5 W/cm^2 、 125 W/cm^2 时 HgCdTe 芯片的温度计算结果, 计算时取 $T_0 = 105 \text{ K}$, $\tau = 0.69$, $q = 0.18 \text{ cm}^2/\text{s}$, $k = 0.2 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$. 根据以上实验结果, 计算出的探测器表面温升如表 2 所示.

由表 2 可知当激光功率密度达到 126 W/cm^2 时, 探测器表面温度为 396 K , 大于 353 K , Hg 原子析出, 观察探测器表面有局部烧熔的现象, 因此可断定探测器已损坏, 与实验结果及实验现象吻合, 进一步验证了理论模型的正确性.

3 结论

用 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光在距离 10 km 处辐照某红

外探测系统, 对激光辐照长波红外 HgCdTe 探测器进行了实验研究与理论分析, 通过研究表明:

(1) 大功率激光对 HgCdTe 光电导探测器在远场的损伤, 主要表现为热效应损伤;

(2) 激光经过衰减片后, 靶面处功率密度达到 16.5 W/cm^2 时, 激光对探测器产生明显的干扰; 继续减少衰减片, 靶面处功率密度达到 126 W/cm^2 时, 经 2 s 辐照时间后, 观测到探测器产生了烧蚀现象, 分析可知温升引起 Hg 析出, 此时计算温度已达到 Hg 析出温度. 这一实验现象和理论计算预期结果相吻合.

REFERENCES

- [1] WANG Si-Wen, GUO Li-Hong. Experiment study on the laser dazzling of CCD photoelectric detector [J]. *Laser Journal* (王思雯, 郭立红. 半导体激光器干扰 CCD 光电探测器的实验研究. *激光杂志*), 2009, **30** (1): 28—30.
- [2] ZHANG Ying-Yuan, ZHENG Rong-Shan, LIU Jin-Song. Analysis of pulsed laser disturbance and damage on satellite-borne detector [J]. *Journal of Electronics & Information Technology* (张英远, 郑荣山, 刘劲松. 脉冲激光对星载探测器的干扰和损伤分析. *电子与信息学报*), 2006, **28** (9): 1758—1760.
- [3] Bartoli F, Esterowitz L, Allen R, et al. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, **47**: 2875—2881.
- [4] GAN Fu-Xi. New nonlinear optical phenomena in transparent dielectrics interacted with high intense laser beam [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (干福熹. 强激光与透明电介质相互作用中新的非线性光学现象. *红外与毫米波学报*), 2002, **21** (Suppl): 64—68.
- [5] LI Jun-Yang, SHU Rong, HUANG Geng-Hua, et al. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (6): 475—478.
- [6] JIANG Zhi-Peng, LIANG Tian-Jiao, LU Qi-Sheng, et al. Heat effect calculation of PC type HgCdTe detectors when irradiated by laser [J]. *Applied Laser* (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. *应用激光*), 1995, **15** (4): 155—156.
- [7] DUAN Xiao-Feng, NIU Yan-Xiong, ZHANG Chu, et al. Numerical analysis of the temperature field in HgCdTe detector by laser irradiation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (段晓峰, 牛燕雄, 张雏, 等. 激光辐照 HgCdTe 探测器的温度场数值分析. *光电子 · 激光*), 2003, **14** (2): 191—193.