

文章编号 1004-924X(2021)06-1217-08

TEA CO₂ 长波红外激光对红外凝视成像系统 探测器组件的损伤效应

张 引, 邵俊峰*, 汤 伟

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗部, 吉林 长春 130033)

摘要:为了探究长波红外激光对红外凝视成像系统 HgCdTe 红外探测器组件的损伤机理,在 ANSYS 软件仿真研究的基础上,开展了 9.3 μm 激光对 HgCdTe 红外探测器损伤效应实验。通过利用 ANSYS 软件建立了激光辐照 HgCdTe 红外探测器的有限元理论仿真模型,获得了 9.3 μm 脉冲 CO₂ 激光照射下探测器模型的温升分布,以是否达到熔融温度为判定依据,得到探测器组件的仿真损伤阈值。通过开展外场实验获得 HgCdTe 红外探测器真实工作环境下的损伤阈值,整理并分析实验结果得到 HgCdTe 红外探测器组件的实验损伤阈值。研究表明,基于有限元理论仿真得到的 HgCdTe 红外探测器模型的损伤阈值为 0.54~1.1 J/cm²,与实验得到的损伤阈值 0.69~1.23 J/cm² 结果较为一致。仿真结果和实验结果均和 Bartoli 理论的计算结果符合得较好,验证了模型和实验结果的合理性。

关键词: 红外探测器;有限元;HgCdTe;TEA CO₂ 激光

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212906.1217

Damage effect of TEA CO₂ long wave infrared laser on detector assembly of infrared staring imaging system

ZHANG Yin, SHAO Jun-feng*, TANG Wei

(Photoelectric Countermeasure Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics And
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 13159754836@163.com

Abstract: To explore the mechanism of damage caused to a HgCdTe infrared detector by a long-wave infrared laser, the damage caused by a 9.3 μm laser to an HgCdTe infrared detector was experimentally analyzed. A finite element simulation model of the HgCdTe infrared detector irradiated by the laser was established in ANSYS. The temperature rise distribution of the detector model under CO₂ laser irradiation with a 9.3 μm pulse was obtained. The theoretical damage threshold of the detector was determined based on whether the melting temperature had been reached. Subsequently, the damage threshold of an HgCdTe infrared detector in an actual working environment was determined through field experiments. The results show that the damage threshold is 0.54-1.1 J/cm². The simulation results, which predict a damage threshold of 0.69-1.23 J/cm², and the experimental results are in agreement with the Bartoli theory and are thus considered to be valid.

Key words: infrared detector; finite element method; HgCdTe; TEA CO₂ laser

收稿日期:2020-07-11;修订日期:2020-08-26.

基金项目:“十三五”国防预研项目;激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM-18-05);长光所旭光人才项目(2019年度)

1 引言

HgCdTe 是一种直接带隙半导体,量子效率高、载流子迁移率高,可以实现弱光探测。同时它可以通过调节 Cd 的组份比例,完全覆盖 3 个重要的大气红外窗口波段。凭借着上述优点,碲镉汞成为第三代红外探测器的首先材料^[1-3]。然而, HgCdTe 红外探测器也面临很多问题,例如用于生长 HgCdTe 的外延衬底碲锌镉价格昂贵,使得整个 HgCdTe 探测器的价格居高不下;并且碲、镉和汞三者之间是通过较弱的离子键组合在一起,汞很不稳定,在 350 K 左右即会有 Hg 析出,破坏晶体结构造成材料缺陷,从而影响等效噪声功率等性能。此外,碲镉汞的熔点在 993 K 左右,超过该温度并吸收足够的熔化潜热,碲镉汞材料会熔化。尽管如此, HgCdTe 红外探测器仍然广泛应用于军事领域,尤其是在精确制导、红外侦察等方面具有不可替代的作用^[4-5]。这些应用推动了激光干扰和损伤 HgCdTe 红外探测器的发展。 HgCdTe 红外探测器属于弱光探测器件,强激光的干扰和损伤容易导致器件不能正常工作,因此关于 HgCdTe 材料或器件的干扰及损伤机理成为国内外的研究热点之一。

强激光损伤探测器是一个十分复杂的过程,主要由激光参数和材料物理特性决定。其中,激光参数包含波长、脉宽、重频以及光束质量等;材料的物理特性主要涉及导热系数、密度、热容和吸收系数,尤其是导热系数和吸收系数,对温度非常敏感。激光辐照探测器主要表现为材料的加热、熔化、气化和烧蚀以及材料气化烧蚀引起的力学效应和微结构的改变等^[6-7]。因此,脉冲

CO₂激光对长波红外探测器件的损伤效应涉及材料自身吸收、反射、热扩散等物理特性,用激光加热理论模型可定量描述材料温升、熔化等物理过程^[7-8]。目前,国内外对 9.3 μm 损伤碲镉汞红外探测器的研究较少,本文使用有限元软件建模仿真和实验相结合的方式,探究激光损伤效应,为之后开展其他波段激光损伤碲镉汞探测器的研究提供了 9.3 μm 损伤碲镉汞红外探测器的参考。

2 理论分析

2.1 理论基础

HgCdTe 探测器为 4 层结构,各层之间的热膨胀系数不同,当探测器内部出现局部温度升高,探测器内部层与层之间会产生热应力,严重时会导致芯片断裂。近年来,伴随着 HgCdTe 探测器的发展,其内部应力已经得到了比较好的控制。已有研究表明,激光辐照 HgCdTe 探测器引发的热熔融损伤要优先于应力损伤的发生^[9]。

激光与材料相互作用,主要反应为材料对激光辐照的热吸收和热传导过程。激光辐照到 HgCdTe 探测器表面,碲锌镉层对激光吸收较少,与激光接触面温升并不高。透过碲锌镉层,由于 HgCdTe 材料的光电耦合时间只有 1~2 ps,以及吸收系数比较大,所以 HgCdTe 可以快速吸收光子能量使材料温度升高,并很快通过热传导将热量传递给 HgCdTe 和钢柱接触面。因此 HgCdTe 温度场分布可以通过热传导微分方程求得^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha z} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: T 为晶体在 t 时刻的温度, k 为材料的导热系数, ρ 为密度, c 为热容, α 为吸收系数, I_0 为辐照激光功率密度。制冷型面阵 HgCdTe 器件通常封装在杜瓦瓶内且通过液氮进行制冷,其工作温度保持在 77 K。

因此,初始条件满足:

$$T(r, z, 0) = 77 \text{ K}. \quad (2)$$

边界条件满足:

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} = (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$T(r, L, t) = 77 \text{ K}, \quad (5)$$

其中 L 为器件内 HgCdTe 材料的厚度。

实际情况下, HgCdTe 材料的物理参数会随入射波长、温度和 Cd 的比例而变化。Higgins 通过实验研究发现 HgCdTe 密度随 Cd 组分呈线性变化,而随温度变化却非常小,并给出了 HgCdTe 材料密度的计算公式^[11]。Chu 等人给出了 HgCdTe 材料的折射率随温度、入射波长和 Cd

组分的拟合公式,经计算,HgCdTe材料在长波段的反射率 R 基本稳定在3.1。除此之外,他们还研究了HgCdTe吸收系数随温度和Cd组分的变化规律,给出了吸收系数 α 的经验公式^[12]:

$$\alpha = \alpha_g \exp[\beta(h\omega - E_g)]^{1/2}. \quad (6)$$

本文数值仿真和实验采用的碲镉汞Cd的组分比例 $x=0.2$ 。

$$\alpha_g = -65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)x,$$

$$\beta = -1 + 0.083T + (21 - 0.13T)x,$$

$$E_g = E_0 +$$

$$(6.29 \times 10^{-2} + 7.68 \times 10^{-4}T) \left(\frac{1 - 2.14x}{1 + x} \right).$$

$$E_0 = 1.838x - 0.3424 + 0.148x^4.$$

其中: T 为温度, x 为Cd比例。

关于测量HgCdTe热容和导热系数的实验比较多,研究发现它们随温度的变化比较大,当HgCdTe发生熔融时,其热容和导热系数会发生突变。本文不考虑HgCdTe发生熔融状态,并采用Holland等人给出的HgCdTe导热系数经验公式进行仿真研究^[13]。

2.2 Bartoli理论分析

美、法等国对HgCdTe材料及单元探测器的激光损伤机理开展了系统的研究。其中,Bartoli在美国海军的支持下,系统性开展了多波长激光对多种红外探测器材料的损伤机理研究,建立了一维热传导理论模型,通过理论与实验相结合方式获得了CO₂激光辐照下HgCdTe材料和器件的熔化破坏阈值,其研究为激光损伤探测器提供了基础数据和研究思路。Bartoli建立的CO₂激光对HgCdTe材料的热损伤模型^[14],方法简明、物理概念清晰且普适性较好,因此在国内外得到了广泛的应用。

Bartoli利用上述热传导微分方程推导出高斯光束作用于HgCdTe材料的热损伤阈值 E_0 的计算公式:

$$E_0 = E_{\Delta T} \left(1 + \frac{k\tau\alpha\pi^{1/2}}{a_0 \arctan \left[\left(4k\tau/a_0^2 \right)^{1/2} \right]} \right), \quad (7)$$

其中:

$$E_{\Delta T} = \frac{\Delta T_{th}\rho c}{(1-R)\alpha}, \quad (8)$$

式中:热扩散率 $k=0.09 \text{ cm}^2/\text{s}$,从环境温度温升至热熔融温度 $707 \text{ }^\circ\text{C}$ 中间的差值为 $\Delta T_{th}=950$

K,光敏面反射率 $R=0.31$,热容 $c=0.15 \text{ J}\cdot\text{g}\cdot\text{K}$,密度 $\rho=7.6 \text{ g/cm}^3$,脉冲宽度 $\tau=100 \text{ ns}$,吸收系数 $\alpha=8000 \text{ m}^{-1}$,光斑半径 $a_0=60 \text{ }\mu\text{m}$ 。

其中扩散长度 $D=(k\tau)^{1/2}=0.94 \text{ }\mu\text{m}$,吸收深度 $L=1/\alpha \text{ }\mu\text{m}$,高斯光斑到靶半径 $a_0=60 \text{ }\mu\text{m}$,因此扩散长度 $D \ll$ 吸收深度 L ,且扩散长 $D \ll$ 光斑半径 a_0 。因而式(7)括号的右边第二项可以忽略,简化为式(8)。由该模型获得的损伤阈值理论数据与下节中实验结果的吻合度较好。

3 仿真计算

HgCdTe的熔点为 993 K ,当HgCdTe层温度达到熔点时,探测器单元将永久损伤。因此,以HgCdTe热熔化作为相对严格的器件损伤效果界定。在理论分析基础上,利用ANSYS软件建立了CO₂激光对HgCdTe材料的三维温升有限元理论^[15-16]仿真模型,获得了 $9.3 \text{ }\mu\text{m}$ 激光照射下材料的温升三维分布,通过材料表面温升情况判定损伤阈值。

3.1 仿真条件设定

红外凝视成像系统探测器的组件材料参数如表1所示。由于HgCdTe材料的比热容、导热系数和吸收系数会随温度的升高而发生改变,故在此未列出,但模型中已引入。入射激光的波长为 $9.3 \text{ }\mu\text{m}$,脉冲宽度为 100 ns ,光波模式为TEM₀₀模,探测器表面的光斑半径为 $60 \text{ }\mu\text{m}$ 。

表1 HgCdTe的材料参数

Tab. 1 Material parameters of HgCdTe	
参 数	数 值
密 度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 600
熔 点/K	993
熔化潜热/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	130
折射率	3.54

HgCdTe探测器组件模型分为4层,首先在CdZnTe层上生长一层HgCdTe晶体作为光敏元,然后焊接钢柱阵列,最上边是硅基,激光从下往上辐照。其中CdZnTe层厚 $50 \text{ }\mu\text{m}$,HgCdTe光敏层厚 $10 \text{ }\mu\text{m}$,In柱高 $10 \text{ }\mu\text{m}$,直径为 $20 \text{ }\mu\text{m}$,Si基厚 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 。考虑到仿真效果与真实探测器的一致性,为了有效利用计算机资源,HgCdTe探测器

模型采用 11×11 个像素元^[18]。制冷环境温度设置为 77 K。具体模型参见图 1。

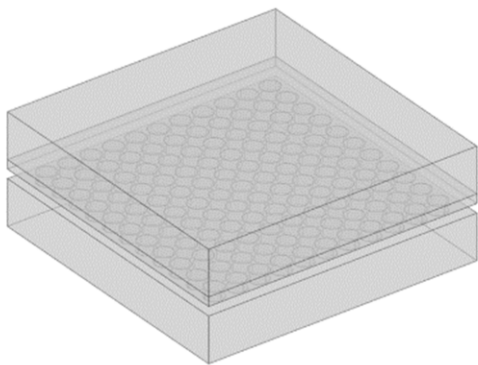


图 1 HgCdTe 探测器三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of HgCdTe detector

采用三节点三角形对模型进行网格剖分,三角形单元对复杂几何轮廓有较强的适应能力,很容易通过增加三角形网格数量来精确地逼近复杂的几何边界。光斑处参数如下:最大单元尺寸为 $0.5 \mu\text{m}$,最小单元尺寸为 $0.002 \mu\text{m}$,最大单元生长率为 1.1。网格剖分效果如图 2 和图 3 所示。

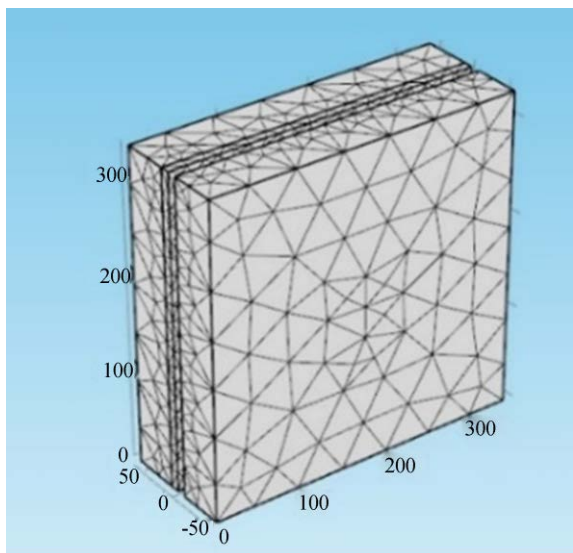


图 2 网格剖分图

Fig. 2 Mesh subdivision

3.2 9.3 μm 激光损伤仿真结果

以 HgCdTe 材料表面和中心温度达到熔点时激光的功率密度和能量密度作为损伤阈值的判定范围进行仿真实验。

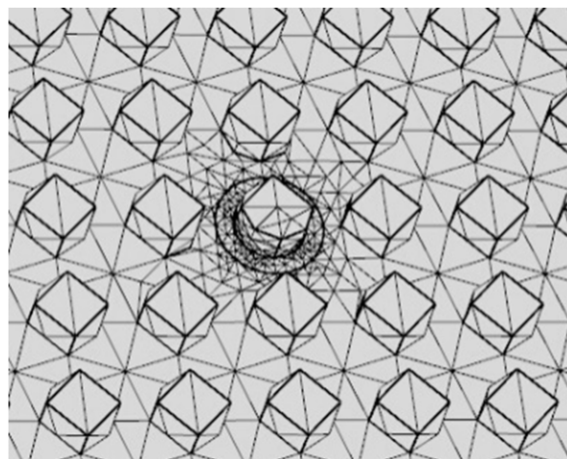


图 3 光斑处传热梯度采取网格加密处理

Fig. 3 Heat transfer gradient at spot treated with mesh encryption

激光辐照 $1 \mu\text{s}$ 时, HgCdTe 表面处的温度变化曲线如图 4 所示, 内部温度的分布情况如图 5 和图 6 所示。经计算, 脉冲宽度为 100 ns , 激光功率密度达到 $0.54 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 光斑中心距离钢柱 $1 \mu\text{m}$ 处的 HgCdTe 材料温度达到熔点。此时激光能量密度为 0.54 J/cm^2 。

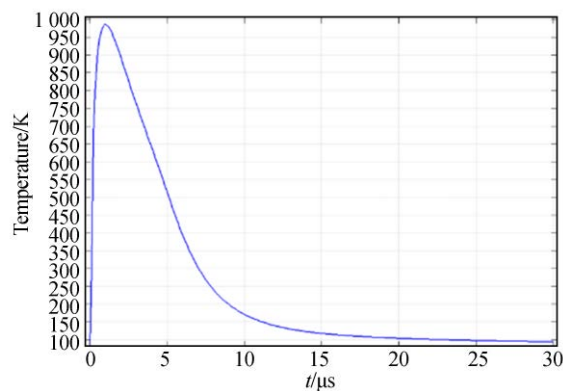


图 4 功率密度为 $0.54 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时光斑中心 HgCdTe 的温度变化

Fig. 4 HgCdTe temperature change at spot center with power density of $0.54 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

激光辐照 $4 \mu\text{s}$ 时, 激光功率密度提高到 $1.1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 对应的激光能量密度为 1.1 J/cm^2 时, HgCdTe 中心处达到熔点。图 7 显示了 $9.3 \mu\text{m}$ 激光辐照下 HgCdTe 材料中心处温度随时间的变化, 在 $4 \mu\text{s}$ 处温度达到极值。

图 8 和图 9 分别显示了 $9.3 \mu\text{m}$ 激光辐照在 4

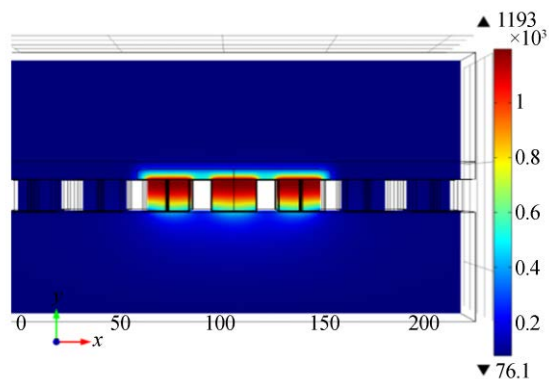


图5 1 μs时探测器纵向剖分温度分布

Fig. 5 Longitudinal temperature distribution of detector at 1 μs

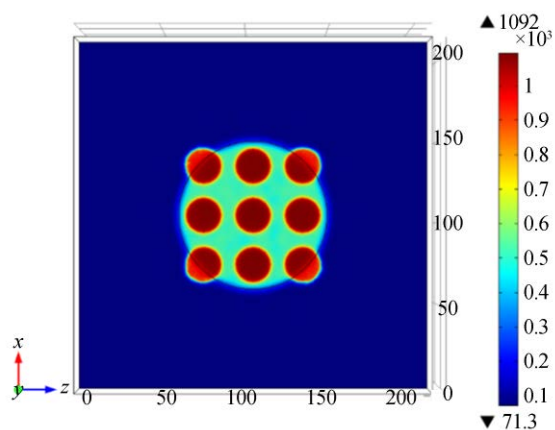
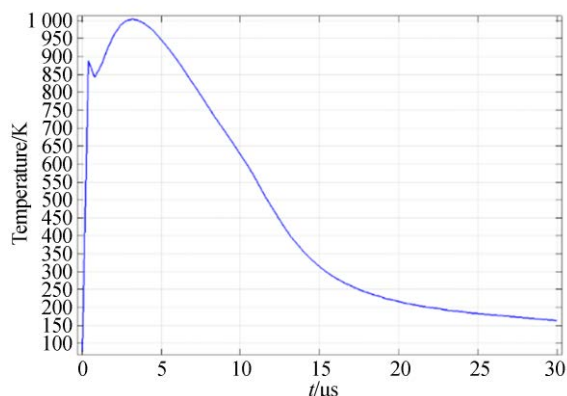


图6 1 μs时探测器横向剖分HgCdTe层的温度分布

Fig. 6 Lateral temperature distribution of HgCdTe layer at 1 μs

图7 波长为9.3 μm,功率密度为 1.1×10^7 W/cm²时光斑中心HgCdTe的温度变化Fig. 7 HgCdTe temperature change at spot center with wavelength of 9.3 μm and power density of 1.1×10^7 W/cm²

μs时探测器内部的温度分布,同样可以看到温度最高区域处于HgCdTe下层。

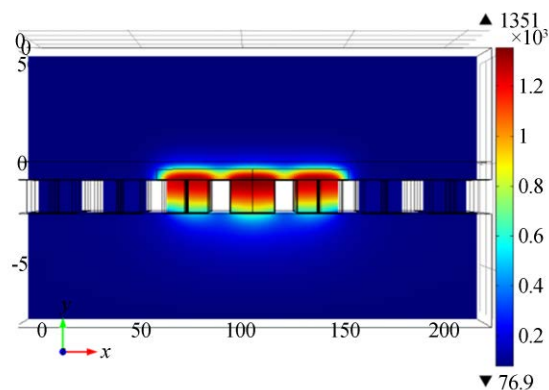


图8 4 μs时探测器纵向剖分温度分布

Fig. 8 Longitudinal temperature distribution of detector at 4 μs

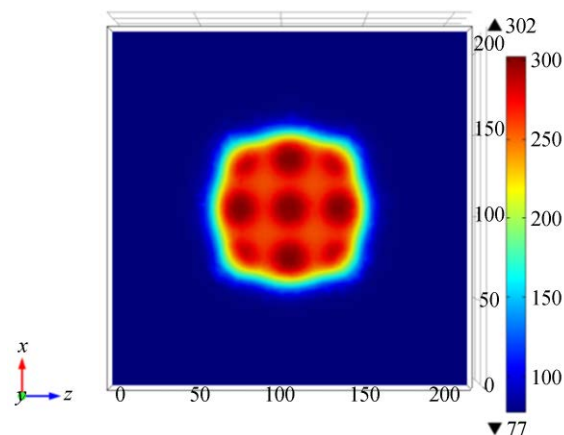


图9 4 μs时探测器横向剖分HgCdTe层的温度分布

Fig. 9 Lateral temperature distribution of HgCdTe layer at 4 μs

分别以材料表面、材料中心达到熔点作为损伤阈值判据,计算得到仿真状态下HgCdTe的损伤功率密度为 $0.54 \times 10^7 \sim 1.1 \times 10^7$ W/cm²,损伤能量密度为 $0.54 \sim 1.1$ J/cm²。

4 外场实验及结果分析

在理论分析与仿真计算基础上,为实际测量CO₂激光对红外凝视成像系统探测器组件的损伤阈值,开展了外场实验。

4.1 实验条件及设备

CO₂激光发射与受试设备两者点对点的距离

为 11.237 km,高程差为 18 m。红外凝视成像系统探测器组件受试设备采用制冷型面阵长波红外成像系统,包括两个可以替换的光学镜头,具体参数见表 2。

表 2 光学镜头参数

Tab. 2 Parameters of optical lens

口径/mm	透过率	F 数
Φ50	0.80@9.3 μm	F/2
Φ100	0.81@9.3 μm	F/2

受试设备制冷型长波红外器件材料为 HgCdTe,分辨率为 320×256,像元尺寸为 30 μm,光谱响应波段为 7.7~9.5 μm,噪声等效功率为 27 mK,经长春光机所光学中心检测为 28 mK。

激光远场能量测试设备采用 Newport 公司生产的 818E 型能量计,其量程下限可达为 1 μJ,光谱响应范围为 0.19~25 μm,测量精度为 3%。为提高远场能量测量精度,在能量计接收孔径前加装了口径为 Φ100 mm 的长波红外镜头,9.3 μm 激光的透过率为 0.77。

气象测量中使用了两种大气参数测量设备,一是 WXT520 维萨拉气象传感器,每隔 5 s 记录一次大气温度和相对湿度,二是 Belfort Model 6000 能见度传感器,用于获得实时的大气能见度。

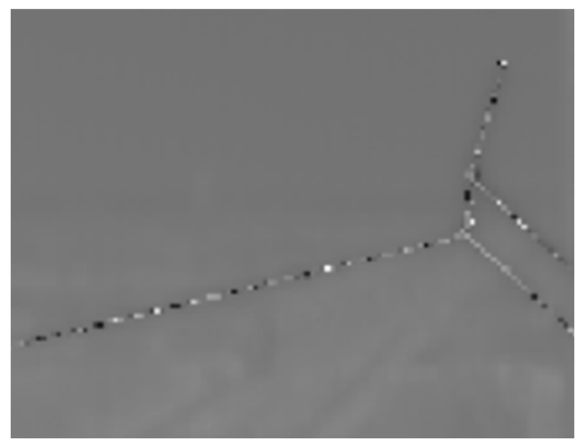


图 10 9.3 μm 激光损伤实验外场观测图

Fig. 10 Field observation image in 9.3 μm laser damage experiment

4.2 损伤实验结果

为准确获得激光对长波红外相机的损伤阈值,通过加装衰减片及孔径光阑对激光入瞳能量进行控制,最终观察到长波红外相机 6 次不同程度的损伤情况。

表 3 六次损伤探测器对应的激光工作条件

Tab. 3 Laser working conditions of six damage detectors

序号	重频/ Hz	发射 时间	镜头口径/ mm	帧频/ (frame·s ⁻¹)	积分时 间/μs
1	100	5	Φ50	100	300
2	100	2	Φ50	50	300
3	100	5	Φ50	50	300
4	300	3	Φ50	50	300
5	500	3	Φ50	50	300
6	100	2	Φ100	50	300

光源为 9.3 μm 的长波红外激光,可以调整的变量有激光输出重频以及激光发射时间。靶材端通过调整镜头的口径,开展不同焦距下的损伤实验。探测器端通过调整帧频探究激光对长波红外凝视成像系统探测器组件的损伤情况。

4.3 损伤阈值分析

损伤阈值计算主要受激光远场能量测量精度以及到靶光斑尺寸取值的影响。其中,远场激光能量测量误差约为 3%,实际到靶光斑尺寸难以精确测量,计算时根据实测镜头光学传递函数估算;采用 Φ50 mm 镜头时,光斑半径约为 1.5~2.0 倍衍射限,误差为 12.5%;采用 Φ100 mm 镜头时,到靶光斑半径约为 1.2~1.3 倍衍射限,误差为 7%。因此,综合误差分别为 20%,31%。

实验结果表明,在 9.3 μm 激光重频为 100, 300, 500 Hz,激光到靶的能量密度为 0.54~2.48 J/cm²的条件下出现了多像元损伤现象。根据实验数据处理原则,大部分损伤情况发生在入瞳能量为 170 μJ 以上,剔除离散性较大的数据,可认为 170 μJ 为损伤发生的入瞳能量,对应到靶激光能量为 176.67 μJ,按激光在靶面上形成的光斑尺寸为 58.5~90 μm 计算,对应的激光能量密度为 0.69~1.23 J/cm²,可作为 9.3 μm 激光的损伤阈值。

5 结 论

本文提出了通过有限元理论求解激光损伤HgCdTe探测器方法,对比经典的一维无限大模型和有限元模型仿真得到的损伤阈值结果,实验得到的9.3 μm激光损伤阈值0.69~1.23 J/cm²

与有限元仿真数值计算结果0.54~1.1 J/cm²较为符合,验证了该方法及研究模型的合理性,为之后开展其他波长,脉宽和重频效应研究提供了良好的仿真研究平台。该实验结果对研究长波红外激光损伤HgCdTe红外探测器有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] LEI W, ANTOSZEWSKI J, FARAONE L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 041303.
- [2] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. 10 μm 像元间距 1 024×1 024 中波红外探测器研制进展[J]. *激光与红外*, 2019, 49(8): 915-920.
- ZHOU L Q, NING T, ZHANG M, *et al.* Developments of 10 μm pixel pitch 1 024×1 024 MW infrared detectors [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(8): 915-920. (in Chinese)
- [3] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. *红外技术*, 2013, 35(1): 1-8.
- SHI Y L. Choice and development of the third-generation infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] 张检民, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 碲镉汞光导探测器在中红外激光测量中的热问题[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 22-30.
- ZHANG J M, FENG G B, YANG P L, *et al.* Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 22-30. (in Chinese)
- [5] 黄良, 李明轩, 吕恒毅, 等. 红外探测器星上大范围高分辨率测温系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(11): 2315.
- HUANG L, LI M X, LÜ H Y, *et al.* Large-range and high-resolution temperature measurement system for satellite-borne infrared detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11): 2315. (in Chinese)
- [6] 汤伟. 高重频 CO₂ 激光损伤 HgCdTe 晶体的机理研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- TANG W. *Damage Mechanism of HgCdTe Crystal Irradiated by High Repetition Frequency CO₂ Laser* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [7] 孙承伟, 陆启生, 范正修. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- SUN CH W, LU Q SH, FAN ZH X. *Laser Irradiation Effect* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [8] TANG W, GUO J, SHAO J F, *et al.* Analysis of damage threshold on HgCdTe crystal irradiated by multi-pulsed CO₂ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58: 172-176.
- [9] 夏润秋, 刘洋, 张悦, 等. 激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 751-756.
- XIA R Q, LIU Y, ZHANG Y, *et al.* Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 751-756. (in Chinese)
- [10] MEYER J R, BARTOLI F J, KRUER M R. Optical heating in semiconductors [J]. *Physical Review B*, 1980, 21(4): 1559-1568.
- [11] HIGGINS W M, PULTZ G N, ROY R G, *et al.* Standard relationships in the properties of Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1989, 7(2): 271-275.
- [12] LIU K, CHU J H, TANG D Y. Composition and temperature dependence of the refractive index in Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(8): 4176-4179.
- [13] CAPPER P, GARLAND J. *Mercury Cadmium Telluride* [M]. UK: Wiley, 2010.
- [14] 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(7): 2875-2881.
- [15] 刘全喜. 强激光对材料热损伤的有限元法研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- LIU Q X. *Finite Element Method Research of the*

- Thermal Damage of Material Induced by Intense Laser* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. (in Chinese)
- [16] 文康, 李和章, 马壮, 等. 光斑尺寸对连续激光辐照铝合金温度响应影响研究[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1023-1031.
- WEN K, LI H ZH, MA ZH, *et al.* Effects of spot size on the temperature response of an aluminum alloy irradiated by a continuous laser[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1023-1031. (in Chinese)
- [17] 王俊. 碲镉汞红外探测器光电响应特性的机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- WANG J. *Study on the Mechanism of Photoelectric Response Characteristics for HgCdTe Infrared Detectors* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [18] 栗兴良, 牛春晖, 马牧燕. 10.6 μm 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.
- SHU X L, NIU CH H, MA M Y, *et al.* Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6 μm wavelength [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(1): 6-9, 20. (in Chinese)

作者简介:



张 引(1997—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,2019年于太原理工大学获得学士学位,主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: 15735154639@163.com

通讯作者:



邵俊峰(1984—),男,安徽宿州人,博士,副研究员,2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光辐照效应与机理方面的研究。E-mail: 13159754836@163.com