

高重频 CO₂ 激光对 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的损伤

汤 伟^{1,2}, 邵俊峰^{1,2}, 赵 帅¹, 王挺峰¹, 郭 劲¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 开展了 HgCdTe 晶体的多脉冲热损伤问题的实验研究。采用形貌学方法对脉宽为 300 ns 重复频率可调的 CO₂ 激光器对 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的损伤阈值进行了实验测量, 并建立了高重频脉冲 CO₂ 激光辐照 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的三维热传导理论模型, 分析了激光重复频率和辐照时间对晶体损伤特性的影响。研究表明: 300 ns 的 CO₂ 激光辐照时间大于 10 s 时, Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的损伤阈值不随辐照时间的增加而改变, 其损伤阈值为 $1.4214 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$; 激光重频对晶体的损伤阈值的影响较小, 损伤阈值主要取决于辐照激光的平均功率密度。SEM 损伤结果显示: 晶体损伤为热熔损伤, 表面未发现由热应力造成的裂缝。理论模型获得的损伤数据和温升规律支持实验结果。该研究可为高重频 CO₂ 激光应用、激光防护等提供参考。

关键词: 损伤阈值; 高重频; HgCdTe 晶体

中图分类号: TN248 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)10-2663-06

Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser

Tang Wei^{1,2}, Shao Junfeng^{1,2}, Zhao Shuai¹, Wang Tingfeng¹, Guo Jin¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to obtain HgCdTe crystal thermal damage threshold irradiated by high repetition frequency laser, firstly, irradiation effect experiment was conducted on the Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal by high repetition frequency CO₂ laser with a pulse width of 300 ns. Then the theoretical model of Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal irradiated by high repetition frequency CO₂ laser was developed to calculate thermal damage process of Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal. Finally, the impact of irradiation time and repetition frequency on damage threshold was analyzed. The research results show that when the irradiation time is longer than 10 s, damage threshold of the crystal does not depend on the irradiation time, and the value is $1.4214 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$. Damage threshold mainly depends on average power density, and doesn't depend on repetition frequency. Damage results of SEM show the crystal damage is thermal damage, and the obvious crack is not found on the surface. The model prediction agrees well with the experiment data, and the conclusions have a

收稿日期: 2013-02-11; 修订日期: 2013-03-08

基金项目: 国家重点实验室自主基础研究课题(SKLLIM1004-01)

作者简介: 汤伟(1985-), 男, 博士生, 主要从事激光辐照效应方面的研究。Email: twei222@163.com

导师简介: 郭劲(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: Guojin_1964@126.com

reference value for laser application and laser protection on high repetition frequency CO₂ laser.

Key words: damage threshold; high repetition frequency; HgCdTe crystal

0 引言

HgCdTe 晶体是一种性能优异的红外光学材料, 被广泛应用于红外探测器的制备。由于 HgCdTe 探测器在红外波段具有高探测率、响应波段可调以及工作温度范围较宽等优点, 目前在国防军事、工业等领域得到了广泛的应用^[1-3]; 然而由于 HgCdTe 探测器属于弱光探测器件, 容易受到强激光的干扰和损伤, 因此, 对 HgCdTe 材料及器件进行热损伤特性的研究已成为近年来的研究热点之一。

国外 F.Bartoli 和 L.Esterowitz 等人^[4]针对单脉冲激光辐照下响应波段在 8~14 μm 范围内 HgCdTe 探测器的损伤阈值进行了研究, 而国内李向阳^[5]等人则利用 CW CO₂ 激光测得了连续激光辐照下 HgCdTe 晶体损伤时间与辐照功率的关系; 满宝元等人利用低重频脉冲激光测量了不同波段^[6-7]脉冲激光辐照下 HgCdTe 晶片的损伤阈值; 以上针对 HgCdTe 材料及器件辐照效应的研究大多集中在连续激光、单脉冲激光或者是低重频脉冲激光, 而关于高重频 CO₂ 激光作用下, HgCdTe 材料或器件损伤特性的研究则鲜有报道。此外, 由于 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 适合于制造响应波段在 8~14 μm 的红外探测器, 因此文中针对高重频 CO₂ 激光作用下 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体损伤特性的研究具有十分重要的意义。

文中依据 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的热物理特性, 测得了 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体在高重频 CO₂ 激光长时间辐照下的损伤阈值, 分析了激光重频对 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体损伤特性的影响; 同时建立了理论模型, 采用数值计算的方法对实验样品表面的温度分布进行了理论计算, 并将实验结果与理论计算结果进行了对比分析。

1 实验配置

高重频 CO₂ 激光作用下 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体热损伤实验原理如图 1 所示。高重频 CO₂ 激光经过分束镜后, 一部分经聚焦透镜后垂直照射到晶体的表面, 另一部分经分束镜折转后由红外探测器接收, 从而

对辐照到晶体表面的功率进行实时监测。

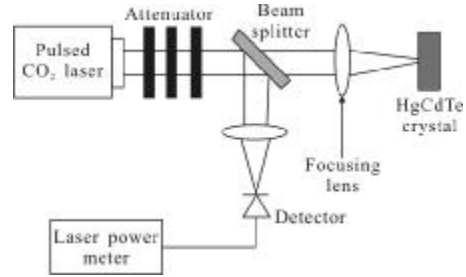
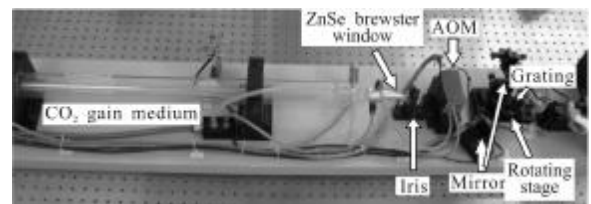


图 1 实验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement system

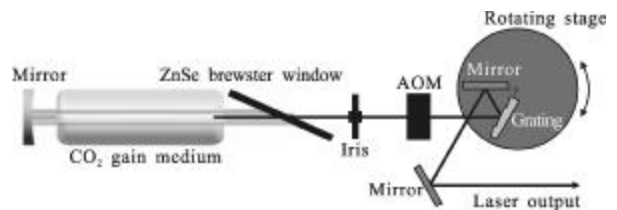
实验中通过调整衰减倍率来控制激光功率值, 从而测得高重频 CO₂ 激光辐照下 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的损伤阈值, 晶体热损伤程度由扫描电镜观测得到。实验时为了获得高平均功率密度, 在晶体前加入透镜对光斑进行聚焦。

实验中采用的光源为小型声光调 Q CO₂ 激光器, 该激光器重复频率可调, 调节范围 1 Hz~100 kHz, 室内条件下测得激光器输出功率最大值可达 1.5 W, 不稳定性小于 10%, 脉冲宽度约为 300 ns, 初始光斑直径约为 6 mm, 发散角为 1 mrad, 输出模式为准基模分布, 激光器实物图片如图 2 所示。



(a) 激光器实物图片

(a) Picture of laser



(b) 光学原理示意图

(b) Optical schematic

图 2 高重频 CO₂ 激光器

Fig.2 High repetition frequency CO₂ laser

红外探测器选用美国 Ophir 公司型号为 30 (150)A-SV-17 的激光功率计,波长范围 0.19~12 μm,功率范围 50 mW~150 W,光敏面大小为 17 mm。扫描电镜为 FEI 公司生产的型号为 Nova NanoSEM x30 的超高分辨率场发射扫描电子显微镜。

2 理论模型

2.1 模型建立

Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的实验样品为圆盘状,半径 R 为 8 mm,厚度 h 为 0.63 mm,固定在绝缘的基底材料上。考虑到实验中光源以及实验样品均为轴对称分布,因此建模时以实验样品的四分之一作为物理分析模型;建立柱坐标系,高重频 CO₂ 激光垂直入射到晶体表面,光斑中心与实验样品中心重合,物理模型如图 3 所示。

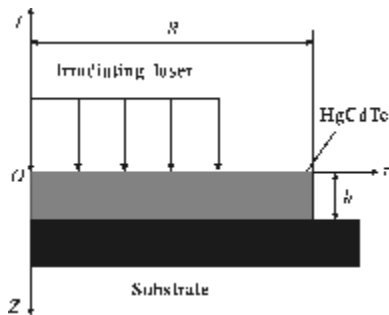


图 3 高重频 CO₂ 激光辐照 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体物理模型

Fig.3 Physical model of Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal irradiated by high repetition frequency CO₂ laser

高重频 CO₂ 激光辐照下,Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体内部温度场分布可用柱坐标下热传导微分方程来描述:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = K(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

式中:ρ、c(T)和 K(T)分别为材料的密度、比热容以及热传导率;Q 为激光深层吸收的体热源项。对于体吸收材料,体热源项 Q 可表示为:

$$Q = \frac{E}{\pi w^2 \tau} (1 - R_r) \alpha(T) \exp(-\alpha(T)z) \quad (2)$$

式中:R_r 为材料的反射率;α(T) 为材料的热吸收系数;w 为光斑半径;E 为脉冲激光单脉冲能量;τ 为激光器脉宽。

由于热加载过程中,晶体材料的热吸收量远大于热辐射能量损失,因此忽略热辐射对温度场的影响;然而由于实验中热加载过程较长,晶体表面与空

气间存在对流换热过程,因此边界条件可写成:

$$T(r, h) = T_0 \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T(r, 0)}{\partial n} = h_c (T_s - T_0) \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(R, z)}{\partial n} = h_c (T_s - T_0) \quad (5)$$

式中:T₀ 为环境温度;h_c 为对流换热系数。基于以上方程采用 ANSYS 有限元分析软件对 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的热加载过程进行数值求解,晶体的初始温度与环境温度相同,均为 24 °C,对流换热系数 h_c 取 60 W/(m²·°C)。

2.2 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的参数

对于 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶片,材料的比热容 c、热传导系数 K 主要取决于晶体的温度,其大小可由经验公式得到^[8],图 4 给出了参数 c、K 随温度的关系曲线。

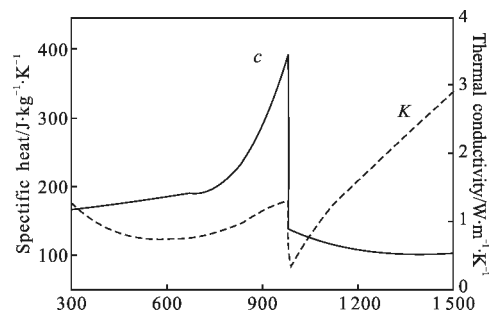


图 4 参数 c、K 随温度的变化曲线

Fig.4 Dependence of c and K on temperature

吸收系数 α(T)对于晶体的温升是一个重要的光学参数,然而目前关于 Hg_{1-x}Cd_xTe 晶体吸收系数在 300 K 以上的研究则缺少相关实验数据,CHU 等人^[9]仅给出了温度 T 在 4.2~300 K 之间 Urbach 带尾吸收系数 α(cm⁻¹)的经验公式:

$$\alpha = \alpha_0 \exp(\delta(E - E_0)/kT) \quad (6)$$

式中:光子能量 E 的单位为 eV;温度 T 的单位为 K。

由于从温度 260 K 开始,Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体对光子的吸收属于 Urbach 带尾吸收,因此,依据 CHU 的实验数据利用外延法获得温度在 260~1 000 K 之间晶体的吸收系数,拟合曲线如图 5 所示。

拟合方程:

$$\alpha = \alpha_0 \exp(\beta \delta(E - E_0)/kT + \sigma) + \varepsilon \quad (7)$$

式中:系数 β、ε 和 σ 为修正系数,对于 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体,β 取 1.135,σ 取 -2.429,ε 取 38.45。Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te

晶体其他主要参数^[4]如表 1 所示。

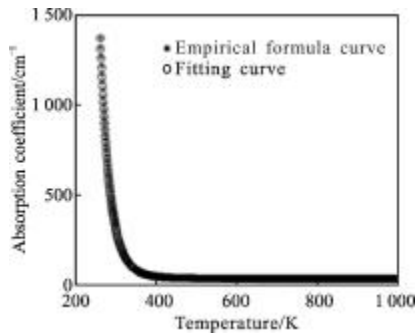


图 5 吸收系数 α 的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of absorption coefficient α

表 1 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体的主要参数

Tab.1 Main parameters of $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ crystal

Parameters	Value
Density(ρ)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 600
Reflectivity(R_r)	0.31
Melting point(T_m)/K	993
Latent heat of fusion(L)/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	130

3 实验结果与分析

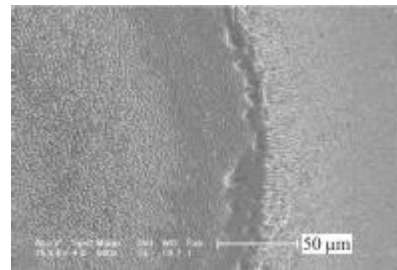
3.1 晶体损伤形貌分析

实验中采用形貌判别法来判断 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体是否出项损伤,形貌判别法的一种判别方式^[10]为若有明显的缺陷出现且晶体的损伤缺陷尺寸大小与入射光斑大小相当时,即认为晶体材料已受到损伤。实验时, $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体距透镜距离为 14.5 mm,透镜的焦距为 15 mm,入射激光达到透镜表面时光斑大小为 8 mm,则聚焦到 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体表面的入射光斑大小约为 0.266 7 mm。 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体的损伤缺陷尺寸大小可由扫描电镜测得,实验中对 6 次损伤结果测量取均值的方法,可得晶体表面损伤缺陷尺寸大小为 0.279 2 mm,与入射光斑大小基本相同,因此,可认为 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体材料已受到损伤,图 6 中给出了晶体损伤后的 SEM 图。

可以发现在激光辐照区内熔化现象明显,表面出现大量的沟壑状的凸起与凹坑,沟壑的形成主要是激光辐照过程中晶体表面 Hg 析出均匀造成的,析出多的形成了凸起,析出少的形成了凹坑。与参考文献^[11]单脉冲损伤结果不同的是晶体表面无贯穿

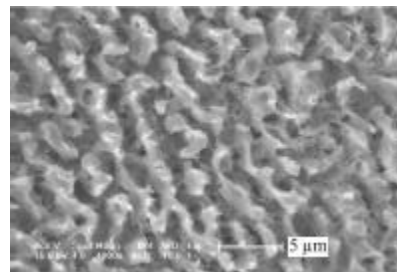
整个损伤区的裂缝产生,分析认为这主要是由于在单脉冲下晶体温度在短时间内迅速上升,从而产生了很大的热应力,当热应力大于晶体抗拉强度和抗压强度时,晶体表面裂缝就会产生;而对于高重频激光,晶体的温升主要来自于热累积,温度升高的较为缓慢,产生的热应力较小,不足以使晶体表面发生断裂,从而宏观上晶体表面未发现有裂缝的产生。可见, $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体的损伤主要为热熔损伤。

此外,在辐照区边缘内,有明显凸起的形成,这是由于脉冲激光对熔化后的晶体产生了推力,在推力作用下使其向辐照区边缘聚集,这样经过多个脉冲长时间累积,从而在辐照区边缘形成了明显的凸起。



(a) 晶体损伤的 SEM 图

(a) SEM micrograph of crystal damage



(b) 激光辐照区的 SEM 图

(b) SEM micrograph of irradiation zone

图 6 $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ 晶体热损伤 SEM 图

Fig.6 SEM micrograph of thermal damage on $\text{Hg}_{0.826}\text{Cd}_{0.174}\text{Te}$ crystal

3.2 损伤阈值

晶体损伤阈值与辐照时间的关系如图 7 所示,实验中测量了重频为 100 Hz 时不同辐照时间下晶体的损伤阈值。

由实验结果得知,辐照功率为 7.5 W 时,晶体表面发生损伤,此时对应的平均功率密度为 $1.421 4 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。此外,还可以发现当辐照时间大于 10 s 时,无论辐照时间如何增加,晶体的损伤阈值几乎未发生改变,这与参考文献^[5]中连续激光损伤 HgCdTe

晶体得到的结论基本一致。为了进一步分析这一问题，对激光辐照 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的热物理过程进行了理论求解，图 8 给出了辐照功率密度为 $1.4214 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 、重频为 100 Hz 时，50 s 内晶体温升随辐照时间变化的数值计算结果。

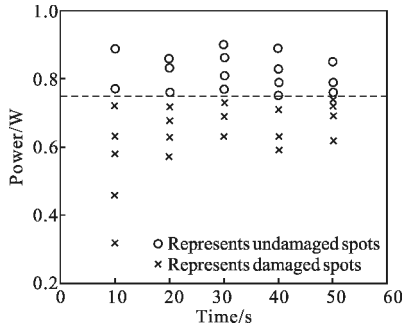


图 7 重频为 100 Hz 时晶体损伤阈值与辐照时间的关系

Fig.7 Relationship between crystal damage threshold and irradiation time with 100 Hz laser

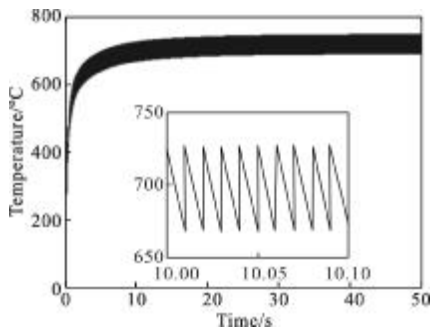


图 8 晶体温升随辐照时间变化的关系

Fig.8 Relationship between crystal temperature and irradiation time

由图 8 理论计算结果可以看出，随着激光辐照时间的增加，热累积现象逐渐显著，晶体表面温度在短时间内迅速升高，然而由于晶体在热累积过程中，同时伴随着热扩散以及热对流现象，且随着晶体温度值的升高，热扩散和热对流现象愈加显著，从而使得晶体表面温度随着辐照时间的增加逐渐达到热平衡。在 10s 后晶体基本达到热平衡，此时，表面温度几乎不随辐照时间而改变。因此，可以看出实验中晶体在 10s 后损伤阈值未发生改变的主要原因是由于晶体温度到达热平衡所致。此外，激光辐照 10 s 时，晶体表面最高温度值已达到 $727.13 \text{ }^\circ\text{C}$ ，大于晶体的熔点 T_m ，说明此时晶体表面发生了损伤。对比图 7 所示的热损伤实验结果可知，理论与实验结果基本一致。

3.3 激光重频对晶体损伤阈值的影响

对于高重频 CO₂ 激光而言，重复频率不同，激光

的脉冲间隔时间以及峰值功率不同，则多脉冲激光辐照下晶体的温升过程也不相同。为了分析激光重频对晶体损伤阈值的影响，实验中测量了辐照时间为 10 s 时，不同重频激光作用下，晶体的损伤阈值，实验结果如图 9 所示。

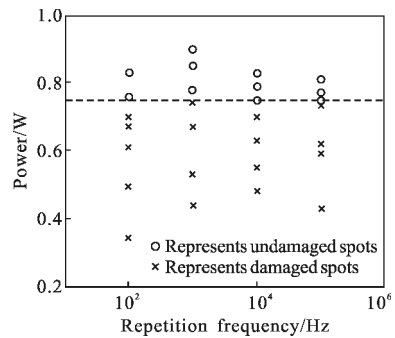


图 9 辐照时间为 10 s 时损伤阈值与激光重频的关系

Fig.9 Relationship between crystal damage threshold and repetition frequency with the irradiation time of 10 s

由实验结果可以发现，不同重频 CO₂ 激光作用下，晶体的损伤阈值变化不大，在激光平均功率 7.5 W 时，晶体发生了损伤，可见，激光重频的改变对晶体损伤阈值的影响较小，损伤主要与激光平均功率密度有关。为了更好地解释这一实验结果，计算了不同重频激光辐照下，晶体在 50 ms 内的温升曲线，结果如图 10 所示。

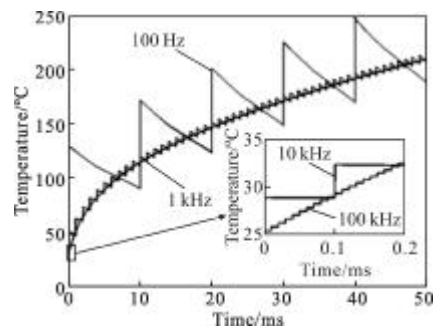


图 10 不同激光重频下，晶体温升的过程

Fig.10 Crystal temperature rising process with the different repetition frequencies

由图 10 可知，晶体表面温度呈锯齿状逐渐升高，表面存在升温 and 降温两个过程。在平均功率密度均为 $1.4214 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 的情况下，尽管激光重频越高，单脉冲下晶体温升较低，但是由于在相同的时间内，高重频激光作用的脉冲个数多，使得晶体的净吸收能量相同，而在脉冲间隔内晶体通过热扩散和热

对流散失的热量又基本相同,从而导致在相同的时间(50 ms)内不同重频脉冲激光作用下晶体的温升曲线的包络基本一致。对比 10 kHz 和 100 kHz 晶体温升曲线可知,尽管 10 kHz 激光单脉冲引起的温升为 100 kHz 的 10 倍,但是由于在 0.1 ms 内,重频为 100 kHz 的激光脉冲个数为 10 kHz 激光的 10 倍,使得晶体在相同时间内温升值相同。进而说明了在高重频激光辐照下,晶体的温升主要取决于平均功率密度,而与激光重频的大小关系不大,证明了实验结果的正确性。

4 结 论

基于形貌性方法研究了高重频 CO₂ 激光作用下 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体的损伤特性,实验中在不同辐照时间和重频的条件下,测得了晶体的损伤阈值,并通过建立的三维热物理模型对实验结果进行了理论验证,理论与实验结果表明:在 300 ns 的 CO₂ 激光辐照下, Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体表面会随着辐照时间的增加而发生热累积,导致晶体温度逐渐升高,然而由于存在热扩散以及热对流等现象,10 s 后晶体表面会出现热平衡,此时,晶体的损伤阈值不随辐照时间的增加而改变,损伤阈值为 $1.4214 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$;多脉冲激光作用下,晶体的损伤阈值主要取决于激光辐照的平均功率密度,而与激光重频的大小无关。

此外,在晶体达到热平衡前,辐照时间对损伤阈值有较大的影响,对此将另作研究。文中的研究将对 Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te 晶体制备的探测器在红外波段的应用提供一定的参考。

参 考 文 献:

[1] Gong Haimei, Shao Xiumei, Li Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 15-26. (in Chinese)
龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技

术及应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 31(12): 15-26.

[2] Xie Xiaohui, Liao Qingjun, Yang Yongbin, et al. Electro-optical characteristics of HgCdTe very long wavelength infrared photovoltaic detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 42(5): 39-43. (in Chinese)
解晓辉, 廖清君, 杨勇斌, 等. HgCdTe 甚长波红外光伏器件的光电性能[J]. *红外与激光工程*, 2012, 42(5): 39-43.

[3] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook[J]. *Rep Prog Phys*, 2005, 68: 2267-2336.

[4] Bartoli F, Esterowitz F, Krueger M, et al. Thermal modelling of laser damage in 8-14 μm HgCdTe photoconductive and PbSnTe photovoltaic detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(10): 4519-4529.

[5] Zhao J H, Li X Y, Liu H, et al. Damage threshold of HgCdTe induced by continuous-wave CO₂ laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 77(8): 1081-1083.

[6] Qi Shuming, Chen Chuansong, Zhou Xinling, et al. Study of damage mechanism on HgCdTe semiconductor material by excimer laser irradiation [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2009, 15(1): 76-83. (in Chinese)
戚树明, 陈传松, 周新玲, 等. 准分子激光辐照 HgCdTe 半导体材料的损伤机理研究[J]. *量子光学学报*, 2009, 15(1): 76-83.

[7] Chen CH S, Liu A H, Sun G, et al. Analysis of laser damage threshold and morphological changes at the surface of a HgCdTe crystal[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2006, 8: 88-92.

[8] Jevtic M M, Scepanovic M J. Melting and solidification in Laser-irradiated HgCdTe[J]. *Appl Phys A*, 1991, 53: 332-338.

[9] Chu J H, Mi Zh Y, Tang D Y. Band to band optical absorption in narrow gap Hg_{1-x}Cd_xTe semiconductors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(8): 3955-3961.

[10] Liu Qiang, Lin Libin, Zu Xiaotao, et al. Studies on the methods to determine the damage irradiated by high-laser [J]. *Laser Journal*, 2002, 23(4): 3-5. (in chinese)
刘强, 林理彬, 祖小涛, 等. 强激光辐照损伤判别方法[J]. *激光杂志*, 2002, 23(4): 3-5.

[11] Cai H, Cheng Z H, Zhu H H, et al. Fracture mechanisms of Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te induced by pulsed TEA-CO₂ laser [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 252: 1685-1692.