

高重频 CO₂ 激光损伤 HgCdTe 晶体的数值分析

汤 伟^{1,2}, 吉桐伯¹, 郭 劲^{1*}, 邵俊峰^{1,2}, 王挺峰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:针对 CO₂激光作用下 HgCdTe 晶体的损伤问题进行了数值分析。首先,建立了高重频 CO₂激光损伤 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的三维热传导物理模型;然后,利用有限元方法计算了单脉冲和高重频 CO₂激光作用下, Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的损伤阈值;最后,分析了激光重频以及辐照时间对晶体损伤阈值的影响。研究表明:单脉冲激光辐照下,晶体的损伤阈值为 64.5 J/cm²;高重频 ($f > 1$ kHz) 激光辐照下,激光重频的改变对晶体损伤阈值的影响较小,损伤阈值应由平均功率密度表征,且与辐照时间密切相关;辐照时间的增加,可以有效地减小晶体的损伤阈值,当激光辐照功率密度 < 1.95 kW/cm² 时,不会发生晶体损伤。研究结果对高重频 CO₂激光在激光加工以及激光防护的应用方面具有指导意义。

关键词:激光损伤;损伤阈值;重复频率;HgCdTe 晶体

中图分类号: TN241; TN213 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130605.0736

Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser

TANG Wei^{1,2}, JI Tong-bo¹, GUO Jin^{1*}, SHAO Jun-feng^{1,2}, WANG Ting-feng¹

(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 Sciences, Beijing 100049, China)

** Corresponding author, E-mail: guojin@ciomp.ac.cn*

Abstract: To obtain thermal damage characteristics of the HgCdTe crystal irradiated by a CO₂ laser, the theoretical model of Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te crystal damaged by the high repetition frequency CO₂ laser was developed, and then the damage thresholds of Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te crystal irradiated by a single pulse laser and a high repetition frequency laser were calculated based on the finite element method. Finally, the effect of irradiation time and laser repetition frequency on the damage thresholds was analyzed. The results show that the damage threshold of the crystal radiated by a single pulse laser is 64.5 J/cm². In the high repetition frequency ($f > 1$ kHz) CO₂ laser irradiation, the damage threshold of the crystal mainly depends on the laser average power density and irradiation time, and is independent of the laser repetition frequency. With the increase of irradiation time, the damage threshold can effectively be reduced. When the laser average power density is less than 1.95 kW/cm², the crystal damage will not occur. The conclusions have a reference value for laser processing

收稿日期:2013-08-11;修订日期:2013-09-27

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究资助项目(No. SKLLIM1004-01)

and protection.

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

1 引言

激光辐照效应是目前国内外激光技术领域研究热点之一^[1-6]。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^[7],但 HgCdTe 材料的电学和光学性质,使其自身存在电学活性杂质和本征缺陷^[8],在强激光辐照下,HgCdTe 探测器易受干扰和损伤^[9-10],因此,近年来关于 HgCdTe 晶体以及器件的辐照效应研究备受关注。

目前,国内外学者已经针对 HgCdTe 晶体损伤特性进行了大量的研究,然而这些研究大多集中在连续激光^[11-12]和单脉冲激光^[13-15],关于高重频 CO₂激光作用下 HgCdTe 材料或器件损伤特性的研究还鲜有报道。此外,由于组分 x 为 0.216 的 HgCdTe 晶体适于制造响应波段在 8 ~ 14 μm 的红外探测器,因此本文针对高重频 CO₂激光作用下 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体热损伤特性进行研究,该项研究对于长波红外探测器具有一定的实际意义。

2 理论模型

考虑到在多脉冲激光辐照下,晶体的损伤主要以热熔损伤为主^[16]。建模时以晶体的四分之一作为物理分析模型,晶体放置在绝缘的基底材料上,高重频 CO₂激光垂直入射到晶体表面,光斑中心与晶体中心重合。

高重频 CO₂激光辐照下,Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的温度场分布可用激光深层吸收热传导微分方程^[16]来描述:

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

其中梯度算子 ∇ 可表示为:

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]^T, \quad (2)$$

式中: ρ 为材料的密度, R 为反射率, t 为时间,热

物理参数比热 $c(T)$ 、热传导系数 $k(T)$ 、热吸收系数 $\alpha(T)$ 均与温度大小有关。

考虑到在高重频激光加载过程中,激光作用时间较长,晶体表面与空气间存在对流换热过程,因此初始条件和边界条件可写成:

$$\begin{cases} T(r, h) = T_0 \\ -k \frac{\partial T(r, 0)}{\partial n} = h_c (T_s - T_0) \\ -k \frac{\partial T(R, z)}{\partial n} = h_c (T_s - T_0) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: T_0 为环境温度, h_c 为对流换热系数。目前,对于方程(1)的求解普遍采用有限元方法,即将连续区域进行离散化,离散化后晶体内部微元体温度分布可近似表示为:

$$T(x, y, z, t) = \{N(x, y, z)\}^T \{T_e(t)\}, \quad (4)$$

式中: $\{N\}$ 为描述温度在单元内变化的插值函数向量, $\{T_e\}$ 为单元节点温度向量;对于 8 个节点的正六面体单元,插值函数的形式为:

$$N(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8xyz. \quad (5)$$

由于方程(4)为温度分布的近似解,将方程(4)代入热传导方程(1)会产生一定的残差,残差 R 可以表示为:

$$R = \nabla^T \nabla (k \{N\}^T \{T_e\}) + (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha z} - \rho c \frac{\partial}{\partial t} (\{N\}^T \{T_e\}). \quad (6)$$

根据加权余量的 Galerkin 法,用插值函数 $\{N\}$ 作为权函数,使残差 R 在 Galerkin 加权积分的意义上等于零,即:

$$\int_{V_e} \{N\} R dV = 0, \quad (7)$$

式中: V_e 为单元体积,将方程(5)代入方程(6)后,可得热源作用下热传导微分方程的矩阵表达式:

$$[C_T] \dot{\{T\}} + [K_T] \{T\} = \{Q\}, \quad (8)$$

式中: $\{T\}$ 为节点温度向量, $\dot{\{T\}}$ 为温度对时间的导数, $[C_T]$ 为热容矩阵,与单元内存储的热量有关, $[K_T]$ 为热传导矩阵,与单元内热流量的传导

有关,包含导热系数和对流系数, $\{Q\}$ 为单元节点的体热流量载荷矩阵。矩阵 $[C_T]$ 、 $[K_T]$ 以及 $\{Q\}$ 可用下式表示:

$$[C_T] = \int_{V_e} \rho c \{N\}^T \{N\} dV$$

$$[K_T] = \int_{V_e} k (\nabla^T \{N\}^T \nabla \{N\}) dV + \int_{S_e} h \{N\}^T \{N\} dS.$$

(9)

$$\{Q\} = \int_{V_e} \{N\} (1 - R) \alpha(T) I_0 e^{-\alpha(T)z} dV$$

3 仿真参数

3.1 光源参数

激光光源为小型声光调 Q CO_2 激光器,激光器重复频率在 1 Hz ~ 100 kHz 可调,室内条件下测得激光器输出平均功率可达 1.5 W,不稳定性小于 10%,初始光斑半径为 3 mm,激光发散角为 1 mrad,脉冲宽度约为 300 ns,输出模式为准基模分布,激光器脉冲波形以及光强分布如图 1 所示。

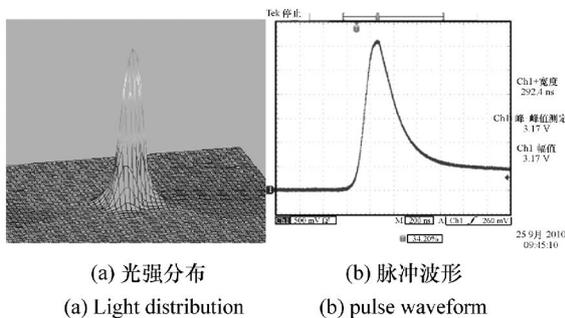


图 1 光源参数

Fig. 1 Laser source parameters

3.2 晶体材料参数

实验样品选用由上海技术物理所制备的组分 x 为 0.216 的 $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ 晶片,晶体呈圆柱状,半径 R 为 8 mm,厚度 h 为 0.63 mm,实物如图 2 所示。

强激光辐照下, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体的光学参数主要与材料的组分 x 和温度 T 有关。对于 $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ 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^[16],图 3 给出了参数 c 、 K 随温度变化的关系

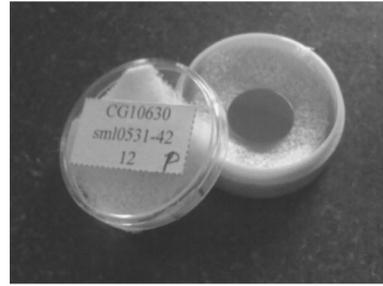


图 2 $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ 晶片实物图

Fig. 2 Physical photo of $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ crystal sample

曲线。

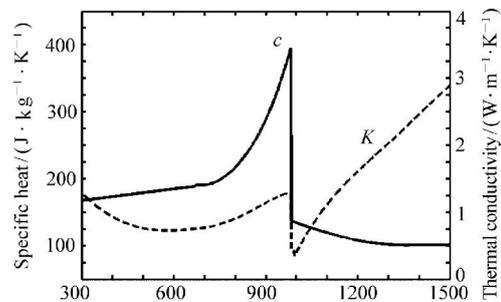


图 3 参数 c 、 K 随温度的变化曲线

Fig. 3 Dependence of c and K on temperature

对于 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体的温升,材料的吸收系数 $\alpha(T)$ 是一个重要的光学参数,然而关于 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体吸收系数的实验数据大多集中在 4.2 ~ 300 K 之间,而关于 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体吸收系数在 300 K 以上的研究则缺少相关实验数据。

常温下,尽管 CO_2 激光的光子能量 ($E = 0.117$ eV) 远小于 $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ 晶体的禁带宽度 ($E_g = 0.1901$ eV),但 HgCdTe 晶体对光子仍然存在吸收,此时属于 Urbach 带尾吸收。对于 Urbach 带尾吸收,CHU 等人^[17] 给出了温度 T 在 4.2 ~ 300 K 时 Urbach 带尾吸收系数 $\alpha(\text{cm}^{-1})$ 的经验公式:

$$\alpha = \alpha_0 \exp[\delta(E - E_0)/kT], \quad (10)$$

式中:光子能量 E 的单位为 eV,温度 T 的单位为 K。

对于 $\text{Hg}_{0.784}\text{Cd}_{0.216}\text{Te}$ 晶体,温度从 65 K 起,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 66 ~

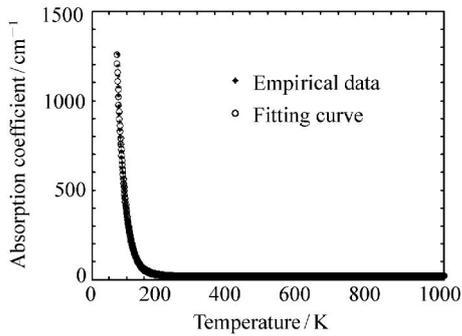


图4 吸收系数 α 的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of absorption coefficient α

1 000 K 之间 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的吸收系数,拟合曲线如图 4 所示。

拟合方程:

$$\alpha = \alpha_0 \exp[\beta\delta(E - E_0)/kT + \sigma] + \varepsilon, \quad (11)$$

式中:系数 β 、 ε 和 σ 为修正系数,对于 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体, β 取 1.002, σ 取 0.401 1, ε 取 19.71。Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体其他主要参数^[13]如表 1 所示。

表 1 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的主要参数

Tab. 1 Main parameters of Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te crystal

Parameters	Values
Density(ρ)	7 600 kg/m ³
Reflectivity(R_r)	0.31
Melting point(T_m)	720 °C
Latent heat of fusion(L_f)	130 J/g

4 结果与分析

4.1 单脉冲激光作用下 HgCdTe 晶体热损伤分析

基于激光辐照 HgCdTe 晶体的物理模型以及热传导微分方程式(8),采用 ANSYS 有限元分析软件对 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的热加载过程进行数值求解,计算时考虑了晶体参数(K 、 c 、 α)随温度的变化,并认为晶体的初始温度和环境温度 T_0 相同,均为 25 °C,对流换热系数 h_c 为 60 W/

(m² · °C)。

计算时通过调整光束半径来提高辐照激光的能量密度,研究发现当激光辐照的能量密度大于 64.5 J/cm²时,Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体表面温度值达到熔点,有限元仿真结果如图 5 所示。

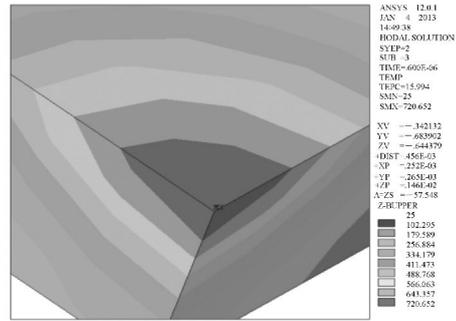


图 5 晶体热损伤时的有限元仿真结果

Fig. 5 Finite element simulation results of thermal damage

对于基模高斯光束,F. Bartoli 等人建立了半无限大物理模型,给出了单脉冲激光作用下晶体损伤阈值的理论计算公式^[18]:

$$E_0 = \frac{\Delta T \rho c}{(1 - R)\alpha} \left[1 + \frac{k\tau\alpha\pi^{1/2}}{w \tan^{-1}(4k\tau/w^2)^{1/2}} \right], \quad (12)$$

式中: E_0 为晶体发生损伤时的激光能量密度, ΔT 为损伤时晶体表面的温升值, τ 为激光器的脉冲宽度, w 为辐照到晶体表面的光斑半径。

对于本文的热物理模型,由于激光器脉宽 $\tau \ll 1/\alpha^2 k$,则式(12)可简化为:

$$E_0 = \frac{\Delta T \rho c}{(1 - R)\alpha}. \quad (13)$$

计算时晶体的热物理参数 ρ 、 α 和 c 在温度范围内取均值,则依据式(13)可得单脉冲激光辐照下 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体的损伤阈值约为 70 J/cm²,理论计算结果与仿真结果基本一致。

4.2 高重频激光作用下 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体损伤分析

4.2.1 重频对晶体温升的影响

图 6 分别给出了激光平均功率密度为 300 W/cm²,辐照时间为 5 ms,重频为 1、2、5 和 10 kHz 时晶体的温升曲线。

可以看出,在脉冲作用期间,晶体的温度迅速

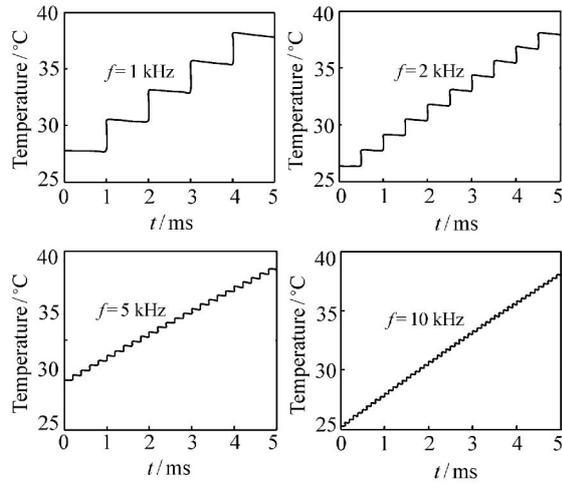


图6 不同重频下的晶体升温曲线

Fig. 6 Temperature rise curves with different repetition frequencies

升高,然而由于高重频激光脉冲间隔时间较短,在此期间晶体通过热扩散和热对流散失掉的热量较少,导致在脉冲间隔期间晶体的温降过程不显著,从而使得晶体的温度发生热累积,呈阶梯状升高。

此外,对比1和10 kHz的升温曲线还可以发现,在激光平均功率密度相同的情况下,尽管单脉冲下1 kHz激光作用下晶体的温升值为10 kHz的10倍,但是由于在5 ms内,10 kHz激光输出的脉冲个数为1 kHz的10倍,且晶体的温升呈阶梯状升高,脉冲间隔期间晶体的散热较少,从而使得不同重频激光作用下5 ms内晶体的温度值基本相同,分别为38.22、38.03 °C。可见,在高重频CO₂激光作用下,Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te晶体的温升主要与激光平均功率密度有关,而与激光重频的大小无关。

4.2.2 损伤阈值

由于高重频CO₂激光的最佳工作频率为1 kHz^[15],因此以重频为1 kHz的CO₂激光为例,对晶体损伤特性进行分析。

由图7(a)晶体的升温结果可以看出,不同激光功率密度下,晶体发生损伤的时间不同,平均功率密度越高,晶体发生损伤的时间越短;对比2.6与2 kW/cm²的损伤时间可知,前者仅为后者的1/7。

为了进一步分析晶体损伤特性,图7(b)给出

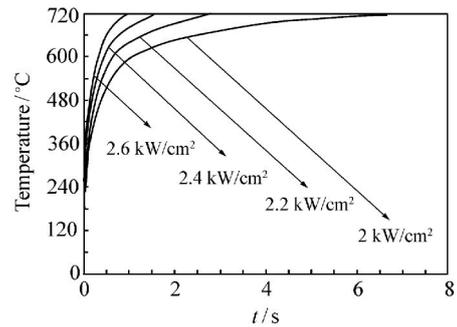
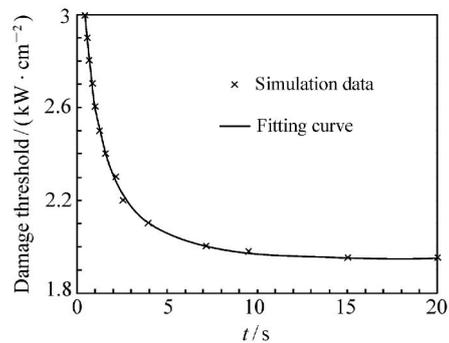
(a) 不同辐照功率密度下,晶体的升温过程
(a) Temperature rise curves with different irradiating power densities(b) 晶体损伤阈值与辐照时间的关系
(b) Relation between damage threshold and irradiation time

图7 晶体损伤阈值的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of crystal damage threshold

了晶体损伤阈值随辐照时间的变化特性,可以发现辐照时间4 s内,晶体的损伤阈值随着辐照时间的增加而迅速减小;然而4 s以后辐照时间对晶体损伤阈值的影响较小,当辐照时间大于10 s时,晶体的损伤阈值不随时间的增加而改变,此时晶体的损伤阈值为1.95 kW/cm²。

5 结论

建立了三维热物理模型,针对高重频CO₂激光作用下Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te晶体的损伤问题进行了数值仿真。计算结果表明:与单脉冲损伤相比,高重频下晶体的损伤阈值明显减小,晶体损伤阈值的大小与辐照时间有关,10 s以后晶体的损伤阈值为定值,其大小为1.95 kW/cm²。此外,在高重频CO₂激光辐照下,激光重频对晶体升温的影响较小,晶体的损伤阈值应由激光平均功率密度来

表征。

尽管文中定量结果受仿真参数的影响,会在一定误差,但是本文所得定性结论是正确的。

相关研究将对 Hg_{0.784}Cd_{0.216}Te 晶体在长波红外波段的应用提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 张来明,徐东东,元凤杰,等. CO₂激光辐照氧化钒热像仪的实验[J]. 光学精密工程,2011,19(2):348-353.
ZHANG L M, XU D D, QI F J, *et al.*. Experimental research on VO₂ thermal imager irradiated by CO₂ laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):348-353. (in Chinese)
- [2] 陶萌萌,杨鹏翎,刘卫平,等. 高能激光辐照下光纤布拉格光栅响应特性[J]. 中国光学,2012,5(5):544-549.
TAO M M, YANG P L, LIU W P, *et al.*. Response characteristics of fiber Bragg gratings irradiated by high energy lasers [J]. *Chinese Optics*, 2011, 19(2):348-353. (in Chinese)
- [3] KUMBHAKAR P. 半导体量子点材料在 Nd:YAG 激光辐照下的非线性光学效应[J]. 光学精密工程,2011,19(2):228-236.
KUMBHAKAR P. Observation of nonlinear optical effects in some semiconductor quantum dot materials using Nd:YAG laser radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):228-236. (in Chinese)
- [4] 杨贵龙,邵春雷,李殿军,等. 室温条件下脉冲 CO 激光辐射特性[J]. 发光学报,2010,31(5):682-685.
YANG G L, SHAO CH L, LI D J, *et al.*. Properties of pulsed CO laser radiation at room temperature[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2010, 31(5):682-685. (in Chinese)
- [5] 邵明振,邵春雷,卢启鹏,等. 高功率 TEA CO₂ 激光器主机结构优化设计[J]. 发光学报,2013,34(3):388-393.
SHAO M Zh, SHAO CH L, LU Q P, *et al.*. Design on mainframe of high power TEA CO₂ laser and optimization[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(3):388-393. (in Chinese)
- [6] 史晶晶,秦莉,宁永强,等. 大功率垂直腔面发射激光器的相干性测量与分析[J]. 发光学报,2011,32(8):834-838.
SHI J J, QIN L, NING Y Q, *et al.*. Coherent measurement and analysis of vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2011, 32(8):834-838. (in Chinese)
- [7] ROGALSKI A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, 68:2267-2336.
- [8] 蔡虎,程祖海,朱海红,等. 在 TEA - CO₂强激光脉冲作用下 Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te 晶片表面的组分变化[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(3):165-169.
CAI H, CHENG Z H, ZHU H H, *et al.*. Surface component change of Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te induced by high power pulsed TEA-CO₂ laser[J]. *J. Infrared. Millim. Waves*, 2006, 25(3):165-169. (in Chinese)
- [9] BERDING M A, VAN S M, SHER A. Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te native defects densities and dopant properties [J]. *J. Electron. Mater.*, 1993, 22:1005-1010.
- [10] 王思雯,郭立红,赵帅,等. 高功率 CO₂激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程,2010,18(4):798-804.
WANG S W, GUO L H, ZHAO SH, *et al.*. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):798-804. (in Chinese)
- [11] ZHAO J H, LI X Y, LIU H, *et al.*. Damage threshold of HgCdTe induced by continuous-wave CO₂ laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 77(8):1081-1083.
- [12] 李修乾,程湘爱,王睿,等. 波段外 CW CO₂激光辐照 HgCdTe 探测器热效应研究[J]. 中国激光, 2003, 30(12):1070-1074.
LI X Q, CHENG X A, WANG R, *et al.*. Investigation of thermal effect of HgCdTe detector with irradiation by off-band CW CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(12):1070-1074. (in Chinese)
- [13] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUEER M, *et al.*. Thermal modelling of laser damage in 8 ~ 14 μm HgCdTe photoconductive and PbSnTe photovoltaic detectors [J]. *J. Appl. Physics*, 1975, 46(10):4519-4529.

- [14] 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.
- [15] 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.
- QI S M, CHEN CH S, ZHOU X L, *et al.*. Study of damage mechanism on HgCdTe semiconductor material by excimer laser irradiation[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2009, 15(1): 76183. (in Chinese)
- [16] JEVTIC M M, SCEPANOVIC M J. Melting and solidification in laser-irradiated HgCdTe[J]. *Appl. Phys. A*, 1991, 53(4): 332-338.
- [17] CHU J H, MI ZH Y, TANG ZH Y. Band to band optical absorption in narrow gap $Hg_{1-x}Cd_xTe$ semiconductors[J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, 71(8): 3955-3961.
- [18] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUEER M, *et al.*. Irreversible laser damage in ir detector materials[J]. *Appl. Optics*, 1977, 16(11): 2934-2937.

作者简介:



汤伟(1985—),男,黑龙江绥棱人,博士研究生,2009年于天津科技大学获得学士学位,主要从事激光辐照效应、热控方面的研究。E-mail: twei222@163.com



邵俊峰(1984—),男,安徽宿州人,博士研究生,助理研究员,2006年、2009年于复旦大学分别获得理学学士、硕士学位,主要从事激光辐照效应、光电对抗技术相关的研究工作。E-mail: shaojunfeng1984@163.com



吉桐伯(1974—),男,山东昌邑人,副研究员,2004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,主要从事伺服控制、光电对抗技术方面的研究。E-mail: jitungbo@139.com



王挺峰(1977—),男,山东文登人,副研究员,硕士生导师,1999年、2002年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2005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,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: wangtf@sina.com



郭劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗、激光与物质相互作用及激光应用等技术方面的研究。E-mail: guojin@ciomp.ac.cn