第42卷 第2期
2015年2月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 42, No. 2
February, 2015

高重复频率CO_2激光重复频率大小对HgCdTe晶体温升及损伤特性影响分析

王挺峰[1] 汤 伟[1] 邵俊峰[1,2] 王 锐[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]中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为深入分析高重复频率CO_2激光对HgCdTe晶体的损伤机理,开展了高重复频率CO_2激光对HgCdTe晶体的温升实验,测得了不同激光重复频率(1、5、10 kHz)下HgCdTe晶体的温升过程,建立了高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的理论模型,分析了激光重复频率对晶体温升特性的影响;利用ANSYS有限元软件计算了热损伤时HgCdTe晶体的温升值和热应力大小,并结合损伤形貌分析了激光热应力对HgCdTe晶体损伤的影响。研究结果表明,高重复频率CO_2激光长时间辐照下,晶体表面温度随着辐照时间的增加而升高,辐照10 s时,$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体基本达到热平衡,热平衡温度为77 ℃;重复频率大于1 kHz时,激光重复频率的大小对HgCdTe晶体温升特性的影响较小,晶体表面温度主要由激光平均功率密度来决定;激光热应力对HgCdTe晶体的损伤特性影响较小,$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体熔化时的最大热应力为5×10^7 Pa,该值远小于晶体的极限应力。该研究将对高重复频率CO_2激光在激光防护等方面具有一定的参考价值。

关键词 材料; HgCdTe材料; 重复频率; 脉冲CO_2激光; 损伤形貌

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0206006

Analysis of Temperature and Damage Characteristics of HgCdTe Crystal on Repetition Frequency of CO_2 Laser

Wang Tingfeng[1] Tang Wei[1] Shao Junfeng[1,2] Wang Rui[1] Guo Jing[1]

[1]*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

[2]*Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*

Abstract In order to further research damage mechanism of HgCdTe crystal irradiated by high repetition frequency CO_2 laser. Temperature experiment of HgCdTe crystal irradiated by high repetition frequency CO_2 laser is conducted, and temperature rising progress of HgCdTe crystal irradiated by different repetition frequency CO_2 laser (1、5、10 kHz) are measured. Theoretical model of HgCdTe crystal irradiated by high repetition frequency CO_2 laser is developed, and the impact of laser repetition frequency on temperature characteristic is analyzed. The impact of thermal stress on damage characteristic is analyzed basing on scanning electron microscope (SEM) damage morphology and the value of temperature rising and thermal stress calculated by ANSYS. The research results show that temperature of the crystal irradiated by high repetition frequency CO_2 laser gradually rise with increasing of irradiation time, and thermal equilibrium should have been attained on the $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal when irradiation time is 10 s. When repetition frequency is

收稿日期: 2014-06-25; **收到修改稿日期**: 2014-10-06

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: 王挺峰(1977—),男,博士,研究员,主要从事激光辐照效应以及激光应用技术等方面的研究。

E-mail: wangtf@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

more than 1 kHz, the temperature mainly depends on laser average power density, and doesn't depend on repetition frequency. The maximum thermal stress is 5×10^7 Pa when $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal surface melts, the value of which is less than the ultimate stress. The conclusions have a reference value for laser protection on high repetition frequency CO_2 laser.

Key words materials; HgCdTe material; repetition frequency; pulsed CO_2 laser; damage morphology

OCIS code 160.1890; 140.3330; 140.3470

1 引　言

近年来，国内外关于CO_2激光对HgCdTe材料或器件的干扰和损伤已进行了大量的研究，然而这些研究大多集中在连续激光[1-3]或单脉冲激光[4-6]，关于高重复频率脉冲激光损伤HgCdTe的研究则报道较少。高重复频率CO_2激光由于具有重复频率高、峰值功率大等优点在军事和工业方面有着重要的应用，为此，课题组利用高重复频率CO_2激光器开展了HgCdTe材料损伤特性的相关研究，分析了重复频率和辐照时间对HgCdTe材料损伤阈值的影响[7-8]。为深入分析高重复频率CO_2激光对HgCdTe晶体的损伤机理，着重开展了重复频率大小对HgCdTe材料的温升特性以及热应力对晶体损伤的影响研究。首先利用高重复频率CO_2激光器对HgCdTe晶体进行了温升实验，测得了重复频率大小对HgCdTe晶体温升特性的影响；然后建立了高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的数值仿真模型，并通过对热损伤时HgCdTe晶体温升和热应力的计算，分析了激光热应力对HgCdTe晶体损伤的影响。

2 实验配置

2.1 实验原理

高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的温升实验原理如图1所示。可调频的脉冲CO_2激光经过衰减片后被分束镜分成两束，其中大部分激光通过透镜后作用在HgCdTe晶体表面，而小部分激光经分束镜反射后被功率计接收，以便对入射激光功率进行实时监测。

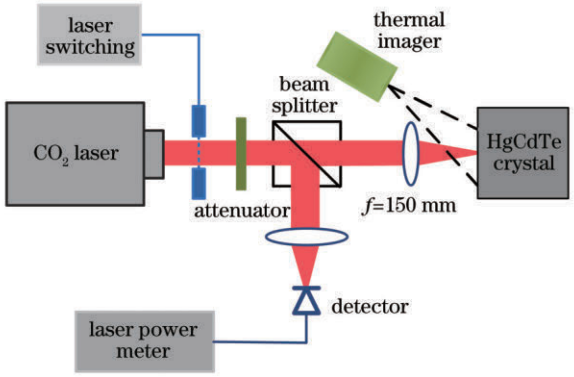

图1 温升实验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement systems

实验时，HgCdTe晶体表面放置一层极薄的涂料，来降低晶体表面的反射率，以便于利用热成像仪更为准确地测量晶体的温升过程。

2.2 实验主要仪器

实验中采用的辐照光源为实验室自主研制的小型声光调Q CO_2激光器[9]，声光调Q晶体(AO晶体)的控制信号由逻辑门电路(TTL)信号源产生，其占空比为10%~30%，该激光器可实现重复频率在1 Hz~100 kHz范围内的调节，室内条件下测得该激光器的主要参数如表1所示。

实验样品选用的是由上海技术物理所制备的组分x为0.174的$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$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。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 高重复频率CO_2激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of high repetition frequency CO_2 laser

Parameters	Values
Wavelength	10.6 μm
Pulse width	300 ns
Repetition frequency	1 Hz~100 kHz
Peak power	4000 W
Beam model	TEM_{00}
Beam waist	6 mm
Divergence angle	1 mrad

图2 $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶片实物图

Fig.2 Physical model of $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal chip

$Hg_{1-x}Cd_xTe$材料的热物理参数，如热传导率K、吸收系数α、比热系数c等，其大小与材料的组分x和温度T有关，一般可由经验公式给出，表2中给出了$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体的主要参数[4,7,10-12]。吸收系数α是HgCdTe晶体的重要光学参数，Chu给出了HgCdTe晶体在Urbach区吸收系数的经验公式：

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\delta(E - E_0)}{kT}\right], \tag{1}$$

式中：

$$\ln \alpha_0 = -18.5 + 45.68x ,$$

$$\frac{\delta}{kT} = \frac{\ln \alpha_g - \ln \alpha_0}{E_g - E_0} ,$$

$$E_0 = -0.355 + 1.77x .$$

表2 $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体的主要参数

Table 2 Physical properties of $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal

Physical properties	Values
Melting point T_m	720 ℃
Density ρ	7.6 g/cm^3
Thermal diffusion coefficient of solid $K(T)$	$1.125-4.568T+11.03T^2-8.427T^3$(mm^2/s),$T$(℃/1000)
Specific heat $c(T)$	$0.058T+149.76$ (J/kg K)(300-673 K)
Thermal conductivity coefficient $k(T)$	$\rho K(T)c(T)$
Latent heat of melting ΔH	130 J/g
Reflectivity	0.31
Absorption coefficient α	$\alpha_0 \exp[\delta(E-E_0)/k/T]$ cm^{-1}
Thermal expansion coefficient β	4.25×10^{-6} /K
Elastic module E	5.39×10^{10} N/m^2
Poisson's ratio ν	0.41

此外，实验中红外热像仪选用的是美国FLIR公司型号为I5的红外热像仪，图像分辨率为80 pixel×80 pixel，测温范围高达+250 ℃，测量精度为±2 ℃。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3　温升实验结果与分析

实验中，由于入射光斑足够大，其入射激光的平均功率密度可由几何光学计算得到，计算公式如(1)式所示。

$$I_0=\frac{4P_0}{\pi\left[\frac{f-l}{f}\left(w_0+\theta d_0\right)\right]^2}. \tag{2}$$

实验中测得会聚透镜焦距f为150 mm，透镜到材料的距离l为60 mm，激光器到会聚透镜的距离d_0为1 m，入射激光平均功率为0.55 W，则基于光源的基本参数可得入射到材料表面的激光平均功率密度I_0约为3 W/cm^2。

实验时调节高重复频率CO_2激光器的重复频率，测得了激光平均功率密度I_0为3 W/cm^2，重复频率分别为1、5、10 kHz时，HgCdTe晶体表面最高温度值随辐照时间变化的宏观特性，其中前20 s有激光辐照，后15 s无激光辐照，实验结果如图3所示。

由图3可以看出，不同重复频率下HgCdTe晶体的温升和温降过程是基本一致的，激光重复频率的改变对HgCdTe晶体的温升基本无影响，晶体表面温度主要由激光平均功率密度来决定。此外，在高重复频率CO_2激光长时间辐照下，HgCdTe晶体表面热累积现象明显，表面温度随辐照时间的增加而逐渐升高，然而在热扩散和热对流的影响下，HgCdTe晶体在10 s时表面达到热平衡，热平衡温度为77 ℃，图4中给出了HgCdTe晶体达到热平衡时的实验图片。

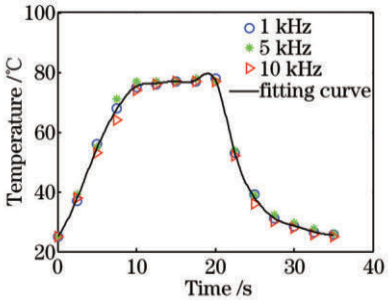

图3　不同重频下，HgCdTe晶体表面温升与时间的关系

Fig.3　Relationship between temperature rise of HgCdTe crystal and time under different repetition frequencies

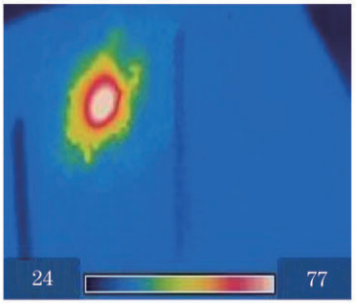

图4　晶体热平衡时的实验图片

Fig.4　Experimental picture of crystal at thermal equilibrium

通过该温升实验可以直观地看到激光重复频率对HgCdTe晶体温升的影响，温升实验结果支持前期得到的晶体损伤实验结论[7]，并从实验上进一步证明了重复频率大小与HgCdTe晶体温升基本无关的实验结论。

4　HgCdTe晶体温升的仿真计算

4.1　仿真模型建立

强激光辐照下材料表面不仅有热效应还有力学效应，基于ANSYS热-结构耦合方法可以建立高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的物理模型。考虑到实验中高重复频率CO_2激光和HgCdTe晶片均为轴对称分布，因此建模时以实验样品的四分之一对其温度场和应力场进行数值仿真计算，仿真模型如图5所示。

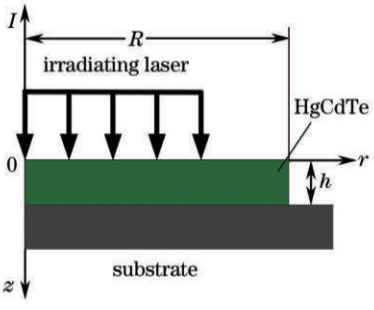

图5　高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体物理模型

Fig.5　Physical model of HgCdTe crystal irradiated by high repetition frequency CO_2 laser

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于HgCdTe材料的电热弛豫时间非常短，约为1~2 ps，因此对于脉冲宽度为纳秒级的脉冲激光而言，光子能量可以迅速从电子传递到晶格上[13-14]，此时HgCdTe晶体温度场分布可用柱坐标下热传导微分方程[15]来描述：

$$\rho c(T)\frac{\partial T}{\partial t}=K(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\alpha(T)I_0\exp[-\alpha(T)z],\tag{3}$$

式中 ρ 、$\alpha(T)$ 、$K(T)$和 $c(T)$分别为 $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ 材料的密度、吸收系数、热传导率以及比热，I_0为晶体表面吸收的入射激光功率密度。

实验中HgCdTe晶体固定在绝缘材料中，因此建模时假定基底材料与HgCdTe晶体后表面间的接触热阻无限大；另外，由于实验中激光热加载过程时间较长，在模型中需要考虑晶体表面与空气间的对流换热，因此其边界条件可表示为

$$\begin{cases}-k\dfrac{\partial T(R,z)}{\partial n}=h_c(T_s-T_0)\\-k\dfrac{\partial T(r,0)}{\partial n}=h_c(T_s-T_0)\end{cases},\tag{4}$$

式中 T_0为环境温度，h_c为对流换热系数。计算时假定环境温度与初始温度始终相同，且 T_0取 25 ℃，h_c取 10 W/m^2·℃。

由于实验中激光峰值功率密度较小，晶体表面主要受激光热应力的作用，其大小可由热弹理论中的物理方程、几何方程和平衡方程来描述。

物理方程：

$$\begin{cases}\sigma_x=\lambda(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)+2G\varepsilon_x-(3\lambda+2G)\beta\Delta T\\\sigma_y=\lambda(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)+2G\varepsilon_y-(3\lambda+2G)\beta\Delta T\\\sigma_z=\lambda(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)+2G\varepsilon_z-(3\lambda+2G)\beta\Delta T\\\tau_{xy}=G\gamma_{xy},\tau_{yz}=G\gamma_{yz},\tau_{zx}=G\gamma_{zx}\end{cases},\tag{5}$$

式中 σ_x 、σ_y 、σ_z 为各自方向上的正应力，ε_x 、ε_y 、ε_z 为对应的正应变，τ_{xy} 、τ_{yz} 、τ_{zx} 为切应力，γ_{xy} 、γ_{yz} 、γ_{zx} 为切形变，$\lambda=E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$，$G=E/2(1+\nu)$，$\beta$ 为材料热膨胀系数，ν 为泊松比，E 为弹性模量。

几何方程：

$$\begin{cases}\varepsilon_x=\partial u_x/\partial x,\varepsilon_y=\partial u_y/\partial y,\varepsilon_z=\partial u_z/\partial z\\\gamma_{xy}=\partial u_x/\partial y+\partial u_y/\partial x\\\gamma_{yz}=\partial u_y/\partial z+\partial u_z/\partial y\\\gamma_{zx}=\partial u_x/\partial z+\partial u_z/\partial x\end{cases}.\tag{6}$$

平衡方程：

$$\begin{cases}\partial\sigma_x/\partial x+\partial\tau_{xy}/\partial y+\partial\tau_{zx}/\partial z=0\\\partial\sigma_y/\partial y+\partial\tau_{xy}/\partial x+\partial\tau_{zy}/\partial z=0\\\partial\sigma_z/\partial z+\partial\tau_{xz}/\partial x+\partial\tau_{yz}/\partial y=0\end{cases}.\tag{7}$$

除上述方程外，还需边界条件，否则方程将存在无数个解。考虑到实验样品与基底材料直接接触，则计算时边界条件取辐照中心轴线的径向位移量以及背面的轴向位移量为零。

4.2 仿真结果与分析

基于HgCdTe晶体的热物理参数、光源参数以及仿真模型，计算了激光平均功率密度为3 W/cm^{2}时，不同重复频率(1、5、10 kHz)下HgCdTe晶体的温升过程，计算结果如图6所示。

由图6(a)可以看出，HgCdTe晶体的温升过程与图4中的实验结果基本一致，均在10 s时达到热平衡；对比晶体的温升曲线可知，仿真结果比实验测量结果高出近5 ℃，分析认为该误差属于系统误差，主要来源于两个方面：

1) 实验测量时由于热成像仪距晶体表面有一定距离，使得晶体表面不能充满热像仪的整个视场，从而引入背景环境温度误差，导致测得的温度值偏小；

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

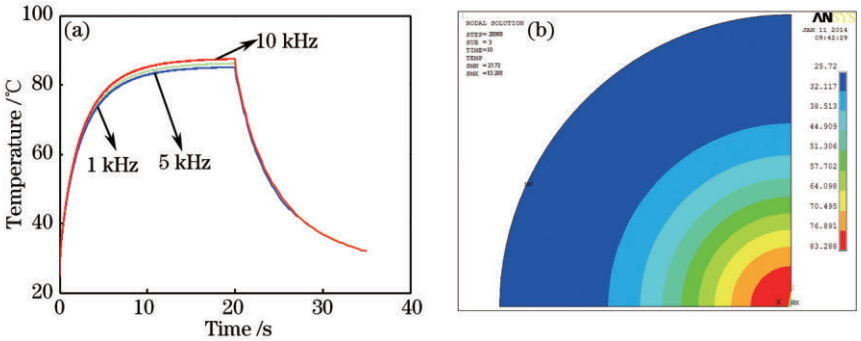

图6 HgCdTe晶体温升仿真结果。(a) 不同重复频率下晶体的温升曲线; (b) 热平衡时温度场有限元云图

Fig.6 Simulation results of temperature rising on HgCdTe crystal. (a) Temperature rising curve with different repetition frequencies; (b) finite element results of thermal equilibrium

2) 热成像仪稳定性的影响。由于热成像仪的测量精度为±2 ℃,同样会对晶体表面温度值测量的准确性造成影响。

为了深入分析激光重复频率对晶体温升的影响,计算了不同重复频率(1、5、10 kHz)下 HgCdTe 晶体在 5 ms 内的温升细节,计算结果如图7所示。

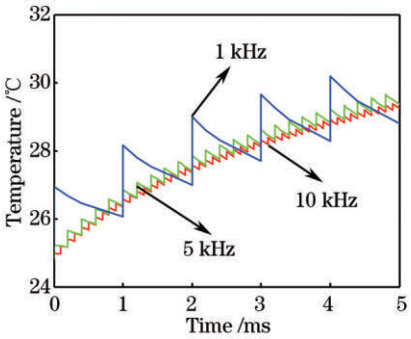

图7 5 ms内 HgCdTe 晶体的温升曲线

Fig.7 Temperature rising curve of HgCdTe crystal with the irradiation time of 5 ms

由图可以看出,材料表面温度呈锯齿状逐渐升高,表面存在"升温"和"降温"两个过程。在脉冲宽度 t_p 内,由于存在热吸收,晶体表面温度会迅速上升,在宏观上表现为"升温"过程;而在脉冲作用结束后至下一个脉冲到来前 $\Delta T-t_p$ 的时间内,在热扩散和热对流的影响下,晶体表面温度会逐渐减小,从而在宏观上表现为"降温"过程。在一个脉冲内,当温升值大于温降值时,晶体表面温度会逐渐升高,此时在实验中表现为热累计现象;当温升值等于温降值时,晶体表面温度会保持不变,即出现温升实验中热平衡现象。

不同重复频率 CO_2 激光辐照下,尽管激光重复频率越小,单脉冲下晶体的温升值越高,但是由于在整个热加载的过程中,晶体吸收的激光能量是相同的,且热扩散和热对流散失掉的能量又基本相同,从而导致在宏观上不同重复频率下晶体的温升过程和温升值是基本一致的,进而较好地解释了"激光重复频率与晶体温升无关"的实验结论。通过对温升细节的分析可以更加深入地理解激光重复频率对 HgCdTe 晶体温升特性的影响,掌握高重复频率 CO_2 激光辐照 HgCdTe 晶体的一般性规律。

5 激光热应力对 HgCdTe 晶体的损伤分析

强激光对光学材料的损伤不仅包括热熔效应还包括力学效应,文献[7]中仅对 HgCdTe 晶体的热熔效应进行了分析,缺少相应的力学效应部分。为此,基于 HgCdTe 晶体的损伤形貌以及热应力的计算结果,分析了激光热应力对 HgCdTe 晶体损伤特性的影响。

5.1 损伤形貌

前期损伤实验中发现在高重复频率 CO_2 激光长时间辐照下,HgCdTe 晶体发生热损伤时,在晶体表面会出现一个白色亮点[7],此时利用扫描电镜(SEM)观察其形貌变化,可以看到白色亮点的中心区域已经发生了

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

熔化现象，其SEM形貌结果如图8所示。

由图8(a)、(b)可以看出，HgCdTe晶体表面形貌已经发生了明显的变化，辐照区内有白色物质生成，与文献[5]中单脉冲损伤形貌不同的是HgCdTe晶体表面无贯穿于整个辐照区的裂缝产生，晶体表面熔化现象明显；通过对比图8(b)和(c)可以发现高重复频率CO_2作用后HgCdTe晶体表面出现大量的凸起与凹坑，分析认为这主要是由于激光热效应导致晶体表面Hg析出、挥发所致。HgCdTe晶体中Hg-Te键不稳定，在高温条件下易发生断裂，导致Hg单质析出、挥发；单质Hg挥发后，在晶体表面会富集大量的Te，且在表面张力和吸附力的作用下聚集在一起，进而形成大量的凸起和凹坑。另外，富集的Te元素有足够的时间与空气中的O_2在高温下接触，进而形成一层白色的氧化物，因此，分析认为辐照区内有白色物质应该为一层Te的氧化物。

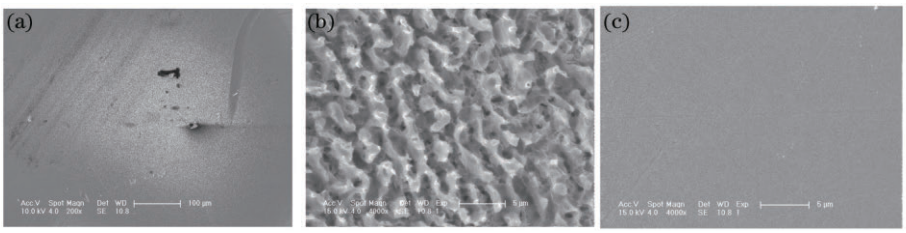

图8 HgCdTe晶体损伤时的表面SEM图。 (a) SEM损伤全貌; (b) 辐照中心处SEM形貌; (c) 未损伤区域SEM形貌

Fig.8 SEM micrograph of thermal damage on HgCdTe crystal. (a) SEM micrograph; (b) SEM micrograph of irradiation zone; (c) SEM micrograph of no irradiation zone

5.2 热应力影响分析

图9中给出了高重复频率CO_2激光辐照下HgCdTe晶体刚发生损伤时，晶体表面温度和热应力的变化曲线。由图9(a)可以看出，在高重复频率CO_2激光辐照下，HgCdTe晶体表面温度逐渐升高，辐照时间为10 s时，刚好达到材料熔点T_m，此时晶体表面就会发生熔化现象；另外，由图9(b)中热应力计算结果可以发现激光热应力随着HgCdTe晶体表面温度的升高而逐渐增大，晶体熔化时激光热应力达到最大，此时热应力大小为5×10^7 Pa 。由Cai等[4]研究结果可知HgCdTe晶体发生单脉冲损伤时应力大小约为7.2×10^8 Pa，可见，高重复频率CO_2激光作用下，晶体表面激光热应力较小，不足以使晶体发生应力损伤，损伤形式应以热熔损伤为主，这与损伤形貌实验结果基本一致。分析认为这主要是由于高重复频率CO_2激光辐照下HgCdTe晶体温升主要来自于热累计，需要长时间(10 s)辐照才能达到材料的熔点，这样在热扩散和热对流的影响下，晶体表面的温度梯度较小，从而导致HgCdTe晶体熔化时激光热应力值远小于材料的极限应力。

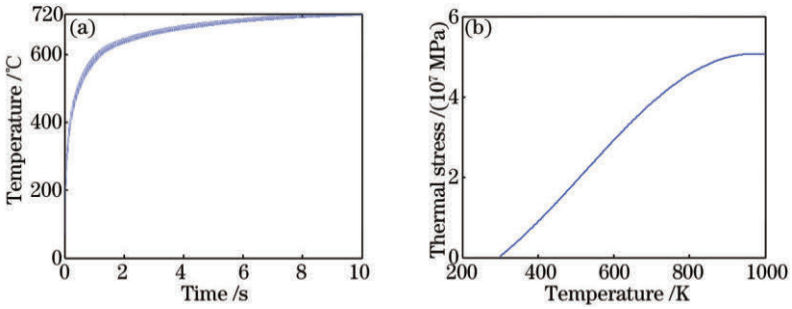

图9 热损伤时HgCdTe晶体表面最高温度与热应力的大小。(a) 温升曲线; (b) 热应力曲线

Fig.9 Maximum temperature and thermal stress of the damaged crystal. (a) Temperature rising curve; (b) thermal stress curve

6 结　论

搭建了高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的温升实验，利用红外热像仪测得了不同重复频率下HgCdTe晶体的温升过程，同时建立了高重复频率CO_2激光辐照HgCdTe晶体的温升模型和应力模型，计算了HgCdTe晶体发生热损伤时表面温升值和热应力的大小。研究结果表明：高重复频率 CO_2激光辐照下HgCdTe晶体表面热累计和热平衡现象明显，表面温度随着辐照时间的增加而升高；对于$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体，辐照10 s时晶体表面达到热平衡，热平衡温度为77 ℃；当重复频率大于1 kHz时，激光重复频率的改变对HgCdTe晶体温升特性的影响较小，温升值主要由激光平均功率密度来决定。高重复频率CO_2激光作用下，

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

激光热应力对HgCdTe晶体的损伤特性影响较小，$Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$晶体表面热应力不足以使材料发生应力损伤，其损伤形式应以热熔损伤为主。尽管实际HgCdTe器件由于背面与热沉密切接触，使得实际器件的激光热效应要低于实验测中HgCdTe晶体的激光热效应，但是得到的一些结论在激光防护方面仍然是适用的。

参考文献

1 Lei Peng, Li Hua, Bian Jintian, *et al*.. Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by TEA-CO_2 laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0214002.
雷　鹏, 李　化, 卞进田, 等. TEA-CO_2激光辐照HgCdTe图像传感器的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214002.

2 J H Zhao, X Y Li, H Liu, *et al*.. Damage threshold of HgCdTe induced by continuous-wave CO_2 laser[J]. Appl Phys Lett, 1999, 77(8): 1081-1083.

3 Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, *et al*.. Experiments of high-power CO_2 laser disturbance to far-field HgCdTe detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 798-804.
王思雯, 郭立红, 赵　帅, 等. 高功率CO_2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.

4 H Cai, Z Cheng, H Zhu, *et al*.. Fracture mechanisms of $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ induced by pulsed TEA CO_2 laser[J]. Applied Surface Science, 2005, 252(5): 1685-1692.

5 F Bartoli, L Esterowitz, M Kruer, *et al*.. Thermal modelling of laser damage in 8~14 μm HgCdTe photoconductive and PbSnTe photovoltaic detectors[J]. J Appl Phys, 1975, 46(10): 4519-4529.

6 F Bartoli, L Esterowitz, M Kruer, *et al*.. Irreversible laser damage in IR detector materials [J]. Appl Opt, 1977, 16(11): 2934-2937.

7 Tang Wei, Shao Junfeng, Zhao Shuai, *et al*.. $Hg_{0.826}Cd_{0.174}Te$ crystal damaged by high repetition frequency CO_2 laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2663-2668.
汤　伟, 邵俊峰, 赵　帅, 等. 高重频CO_2激光对HgCdTe晶体的损伤[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2663-2668.

8 Tang Wei, Ji Tongbo, Guo Jing, *et al*.. Numerical anglysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency laser[J]. Chinese J Optics, 2013, 6(5): 736-742.
汤　伟, 吉桐伯, 郭　劲, 等. 高重频CO_2激光损伤HgCdTe晶体的数值分析[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 736-742.

9 J J Xie, R H Guo, D J Li, *et al*.. Theoretical calculation and experimental study of acousto-optically Q-switched CO_2 laser[J]. Opt Express, 2010, 18(12): 12371-12380.

10 M M Jevtic, M J Scepanovic. Melting and solidification in laser-irradiated HgCdTe[J]. Appl Phys A, 1991, 53(4): 332-338.

11 J H Chu, Z Y Mi, D Y Tang. Band to band optical absorption in narrow gap $Hg_{1-x}Cd_xTe$ semiconductors[J]. J Appl Phys, 1992, 71(8): 3955-3961.

12 C F Wan, J D Luttmer, R S List, *et al*.. Piezoelectric effects in HgCdTe devices[J]. Journal of Electronic Materials, 1995, 24(9): 1293-1297.

13 W Tang, J Guo, J F Shao, *et al*.. Analysis of damage threshold on HgCdTe crystal irradiated by multi-pulsed CO_2 laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 172-176.

14 A Garg, A Kapoor, K Tripathi, *et al*.. Laser induced damage studies in mercury cadmium telluride[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(7): 1319-1327.

15 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806002.
张英聪, 沈　华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806002.

栏目编辑：张浩佳

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net