

文章编号:1002-2082(2011)04-0801-05

# 激光辐照引起的材料温度场和热应力场的瞬态分布

王刚<sup>1</sup>,徐强<sup>2</sup>,刘洋<sup>2</sup>,王虎<sup>3</sup>,梁晓东<sup>3</sup>,李艳<sup>3</sup>,陈志学<sup>3</sup>

(1. 海军驻西安二十所军事代表室,陕西 西安 710065;

2. 西安电子科技大学理学院物理系,陕西 西安 710071; 3. 应用光学研究所,陕西 西安 710065)

**摘要:**光电探测器吸收激光后的温升以及因温升造成的各种现象,致使探测器遭受到不同程度的损伤。利用热弹性理论对CO<sub>2</sub>激光器辐照K9玻璃材料进行研究,建立激光辐照材料温升及热应力分布二维平面模型,通过解析计算得到由激光辐照半导体材料引起的温度场和应力场的瞬态分布。研究表明,K9玻璃材料的激光辐照损伤阈值与辐照时间和光斑半径相关。在同一条件下,造成的热应力损伤阈值较熔融损伤的低,故K9玻璃材料的破坏形态为热应力破坏。

**关键词:**光电探测器;激光辐照效应;温度场;热应力场

中图分类号:TN249

文献标志码:A

## Transient distributions of temperature field and thermal stress field induced by laser irradiation

WANG Gang<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, WANG Hu<sup>3</sup>, LIANG Xiao-dong<sup>3</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, CHEN Zhi-xue<sup>3</sup>

1. Navy's Representative Office in 20th Institute, Xi'an 710065, China;

2. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Electro-optical detectors are widely used in many fields. However, temperature rise due to the absorption of laser and other phenomena may damage detectors. Using thermal elastic theory, the investigation on K9 material radiated by CO<sub>2</sub> laser is done. According to the two-dimensional planar model, the transient distributions of temperature field and thermal stress field which result from laser radiation on semiconductor material are obtained by analytical calculation. The results show that the K9 glass damage threshold of laser radiation is dependent on the radiation time and beam radius. Under the same conditions, the thermal stress damage threshold is lower than the melting damage threshold, so the damage reason of K9 glass material is thermal stress damage.

**Key words:** electro-optical detectors; laser radiation effects; temperature field; thermal stress field

## 引言

随着科学技术的发展,先进的军事武器必须能精确定位导航以及精确攻击敌方防御装置。光电探测器已被安装到军事武器上,用来获取周围的环境信号,但同时也容易受到激光武器的损伤。当材料受到激光的辐照以后,被吸收的激光能量

总有一部分会转化为热能,介质将向新的热平衡状态驰豫,最后表现为温升。特别是当辐照激光的能量比较大的时候,热效应的作用就更明显了。如果不考虑光学与力学的有关效应,强激光照射下光电探测器热学破坏效应占重要的位置。本文建立了相应激光辐照材料温度和热应力响应二维

收稿日期:2010-02-08; 修回日期:2011-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助(60371019)

作者简介:王刚(1977-),男,陕西渭南人,工程师,主要从事光电装备质量控制和可靠性研究工作。

物理模型,分析了半导体材料受到激光辐照时温度场的变化及热应力场分布的变化,为激光对抗和激光防护技术提供参考<sup>[1-5]</sup>。

## 1 理论模型

### 1.1 温度场分布

通常采用热传导和热应力学理论研究材料的温度和热应力响应。圆板型靶材的厚度  $h$  远小于直径,在连续激光作用下厚度方向的温度很快趋于均匀,所以系统采用二维平面模型。半径为  $a$  的圆形激光光斑均匀照射在半径为  $b$  的靶材中央,由于整个系统轴向对称,选用柱坐标系。温度场解析计算是求解区域  $0 \leq r \leq b$  的非稳态热传导问题<sup>[6]</sup>,采用柱坐标导热方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{g(r,t)}{K} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \\ g(r,t) = \frac{(1-R) \cdot I(r,t)}{h} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D = K/(\rho C)$  为热传导系数,  $K$ 、 $\rho$  和  $C$  分别为材料热扩散系数、材料的密度和比热容;  $g(r,t)$  为热流体密度;  $h$  为平板靶材的厚度;  $R$  为材料的反射率。此模型满足第一类边界条件,且与外界绝热,故有:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0 \quad (2)$$

设  $t=0$  为激光开始作用的时刻,  $T_0 = T(r,0)$  是给定的初始温度分布。温度为标量,可以约定

初始条件:

$$T_0 = T(r,0) = 0 \quad (3)$$

$I(r,t)$  为激光照射的光斑功率密度,本文讨论连续激光辐照,且光斑均匀分布,故有:

$$I(r) = \begin{cases} I_0, & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases} \quad (4)$$

导热方程可利用有限元法得到数值解,也可以利用傅里叶定律通过模型简化得到数值解。在柱坐标系下对该问题进行讨论,并利用积分变换公式求解析解。积分变换式和逆变换式分别为<sup>[6]</sup>

$$T(\beta_m, t) = \int_0^b r' R_0(\beta_m, t) T(r', t) dr' \quad (5)$$

$$T(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, t)}{N(\beta_m)} T(\beta_m, t) \quad (6)$$

在绝热边界条件情况下,上式中各项分别表示为特征函数:

$$R_0 = \begin{cases} J_0(\beta_m, r), & m \neq 0 \\ 1, & m = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{特征值 } \beta_m = \begin{cases} J_1(\beta_m, b), & m \neq 0 \\ 1, & m = 0 \end{cases}, \text{ 其中 } \beta_m \text{ 为}$$

第一类一阶贝塞尔函数的根,范数  $N(\beta_m)$  的倒数

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \begin{cases} 2/b^2 J_0^2(\beta_m b), & m \neq 0 \\ 2/b^2, & m = 0 \end{cases}.$$

对(1)式进行积分变换,在靶材为有限圆板,既  $r \in [0, b]$  时,得到温度场的解析表达式:

$$T(r, t) = \frac{\eta I_0}{K h b^2} \left\{ a^2 D t + 2a \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{J_0(\beta_m r) J_1(\beta_m a)}{\beta_m^3 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 D t)] \right] \right\} \quad (8)$$

### 1.2 热应力场分布

对于圆形薄板靶材,温度场轴对称分布,靶半径远大于厚度,其温度变化产生的热应力属于平

面应力问题。根据应力的平衡方程、应力应变的几何方程及应力应变的广义胡克方程,可解出随温度场变化的环向热应力场的表达式<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_\theta(r, t) = \alpha E \left[ \frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, t) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, t) r dr - T(r, t) \right] \quad (9)$$

式中  $\alpha$ 、 $E$  分别为靶材的线性热膨胀系数和杨氏模量。将(8)式代入(9)式得到:

$$\sigma_\theta(r, t) = \frac{2\alpha\eta E I_0}{k h b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{J_0(\beta_m r)}{\beta_m r} - J_0(\beta_m r) \right] \frac{J_1(\beta_m a)}{\beta_m^3 [J_1(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 D t)] \right\} \quad (10)$$

## 2 计算结果和讨论

对 CO<sub>2</sub> 激光器( $\lambda=10.6\mu\text{m}$ )辐照 K9 玻璃材料进行研究。设激光功率密度 = 1 500 W/cm<sup>2</sup>, K9 玻璃的参量如表 1 所示。

表 1 K9 玻璃的物理参数

Table 1 Physical parameters of K9 glass

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	2.25
热传导系数 $k/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.5
比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.009
线胀系数 $\alpha/(\text{MK}^{-1})$	8.6
弹性系数 $E/\text{GPa}$	78
熔点 $T_{\text{melt}}/\text{K}$	1 673

选取材料的几何尺寸:半径  $r=2\text{ cm}$ ,厚度  $h=0.2\text{ cm}$ ,均匀光斑半径取  $a=0.5\text{ cm}$ ,玻璃对 CO<sub>2</sub> 激光器的表面反射系数为 0.15。CO<sub>2</sub> 激光器(波长  $10.6\mu\text{m}$ )照射 K9 玻璃,照射时间 1.00 s。用 Matlab 仿真计算,如图 1~图 3 所示(上图为温度场分布,下图为应力场分布,深色曲面为实际热应力场分布)。

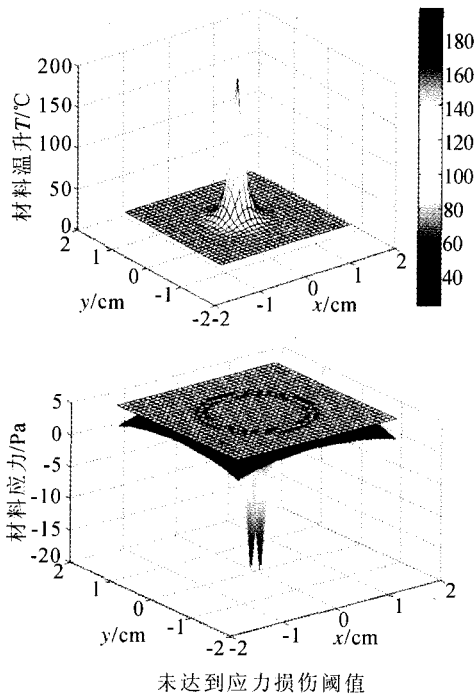


图 1 二氧化碳激光器辐照 k9 玻璃,照射时间 1.00 s,功率密度 190 W/cm<sup>2</sup>

Fig. 1 CO<sub>2</sub> laser radiates K9 material, radiating time: 1.00 s, power density: 190 W/cm<sup>2</sup>

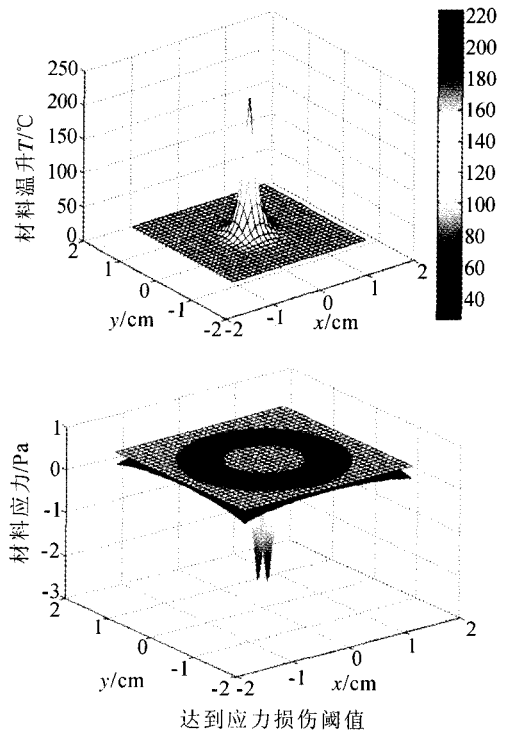


图 2 二氧化碳激光器辐照 k9 玻璃,照射时间 1.00 s,功率密度 200 W/cm<sup>2</sup>

Fig. 2 CO<sub>2</sub> laser radiates K9 material, radiating time: 1.00 s, power density: 200 W/cm<sup>2</sup>

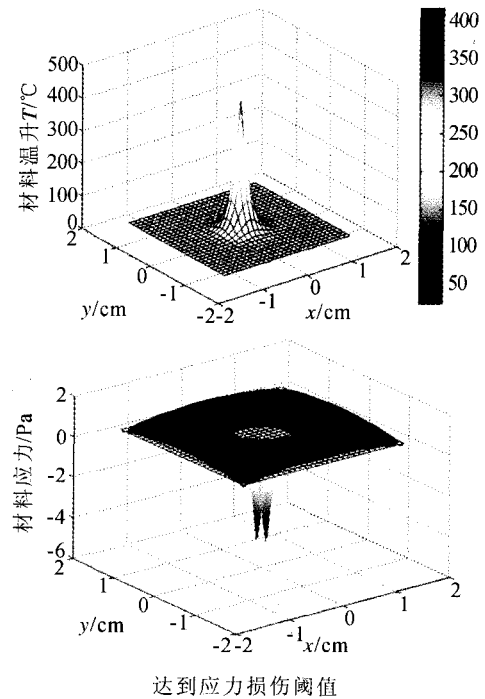


图 3 二氧化碳激光器辐照 k9 玻璃,照射时间 1.00 s,功率密度 250 W/cm<sup>2</sup>

Fig. 3 CO<sub>2</sub> laser radiates K9 material, radiating time: 1.00 s, power density: 250 W/cm<sup>2</sup>

由图1~图3(温度场分布图)我们可以看出,随着照射功率的不断增长,温度呈逐渐上升趋势,温升与功率成正比例关系,而与半径成反比,越靠近中心温度越高,而距离中心较远处温度几乎为零。对于热应力场分布图,由于光斑中心热膨胀,导致光斑区域(高温区)压应力为负值,在靠近光斑外侧(高温与低温交界区)出现拉应力,由于材料的抗压强度远大于抗拉强度,所以热应力导致的断裂破坏出现在光斑外侧。如图1所示,我们在此照射时间为1.00 s,功率密度190 W/cm<sup>2</sup>时,中心最高温度计算仿真值  $T_{\max}$  194℃,未达到熔融温度,热应力随半径的分布最大热应力已经非常接近应力临界值。在图2中,此照射时间为1.00 s,激光辐照功率密度为190 W/cm<sup>2</sup>时,中心最高温度计算仿真值  $T_{\max}$  = 224 C,未达到熔融温度,热应力随半径的分布最大热应力已经超过应力临界值。在图3中,照射时间为1.00 s,功率密度250 W/cm<sup>2</sup>,中心最高温度计算仿真  $T_{\max}$  = 416℃,但仍未达到熔融温度,最大热应力已经远远超过应力临界值。仿真计算结果与文献[10-12]吻合较好,在函数关系和数量级上取得一致。所以对CO<sub>2</sub>激光器照射K9玻璃而言,首先发生的是热应力破坏。

### 3 结 论

研究表明,K9玻璃材料的损伤阈值与辐照时间和光斑半径反向相关。在同一条件下,造成热应力损伤阈值较熔融损伤的低,所以K9玻璃材料的破坏形态为热应力破坏。通过对非线性参量的分析,得到在不考虑非线性效应时相对误差较大,因此在进行激光辐照效应计算和损伤阈值分析时,半导体材料的非线性效应应加以考虑。

#### 参考文献:

[1] DIENER K, GERNANDT L, MOEGLIN J P. Study of the Nd:YAG laser irradiation at 1.3 μm on the thermal mechanical optical parameters of germanium [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43: 1179-1192.

[2] 姜楠,牛燕雄,张书练. 波段外脉冲激光对锗材料冲击效应的数值研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 481-484.

JIANG Nan, NIU Yan-xiong, ZHANG Shu-lian.

Numerical simulation of thermal shock effect on Germanium induced by out of band pulsed laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 481-484. (in Chinese with an English abstract)

[3] 崔云霞,牛燕雄,王彩丽,连续激光辐照锗材料损伤的数值模拟研究[J],应用光学,2011,32(2): 267-271.

CUI Yun-xia, NIU Yan-xiong, WANG Cai-li. Numerical analysis of CW laser damage in Germanium [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 267-271. (in Chinese with an English abstract)

[4] 姜俊,苏俊宏,徐均琪,等. He Ne 散射光检测光学薄膜激光损伤阈值[J]. 应用光学,2008,29(1): 131-135.

LOU Jun, SU Jun-hong, XU Jun-qi, et al. He-Ne laser light scattering detection optical damage threshold of thin film [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 131-135. (in Chinese with an English abstract)

[5] 王海晏. 光电技术原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

WANG Hai-yan. Principle and Application of Optical Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese).

[6] 段晓峰,牛燕雄,张维. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. 光学学报,2004,24(8): 1057-1061.

DUAN Xiao-feng, NIU Yan-xiong, ZHANG Chu. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser induced damage threshold in semiconductor [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1057-1061. (in Chinese with an English abstract)

[7] 高勋. 强激光对光电探测器的损伤研究[M]. 长春: 长春理工大学出版社,2004.

GAO Xun. Laser damage of the photoelectric detector [M]. Changchun: Changchun University of Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)

[8] 苏晓生. 掌握 MATLAB6.0 及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社,2002.

SU Xiao-sheng. Master MATLAB6.0 and apply in engineer [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

[9] 朱衡君,肖燕彩,邱成. MATLAB 语言及实践教程 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.

ZHU Heng-jun, XIAO Yan-cai, QIU Cheng. MATLAB language and practice tutorials [M] Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

- [10] 卞婧,贾成功,许宏. CO<sub>2</sub> 激光对光学材料的损伤效应实验与分析[J]. 光电技术应用,2008, 23(3): 18-20.  
BIAN Jing; JIA Cheng-gong; XU Hong. Experiment and analysis on damaging effect of CO<sub>2</sub> laser to optics material [J]. Electro-Optic Technology Application,2008, 23(3):18-20. ( in Chinese with an English abstract)
- [11] 夏晋军,龚辉,程雷. 光学材料连续波激光热-力破坏效应[J]. 光学学报,1997,17(1):20-24.  
XIA Pu-jun, GONG Hui, CHENG Lei. CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials[J]. Acta Optica Sinica, 1997,17(1):20-24. ( in Chinese with an English abstract)
- [12] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUEER M. Irreversible laser damage in ir detector materials[J]. Applied Optics,1977,16(11):2934-2937.
- (上接第 760 页)
- ion beam[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 152-156. (in Chinese with an English abstract)
- [42] TRICARD M, DUMAS P, FORBES G, et al. Recent advances in sub-aperture approaches to finishing and metrology[J]. SPIE, 2006, 6149: 614903-1-614903-19.
- [43] 周林,戴一帆,解旭辉,等. 计算机控制抛光工艺中基于等面积增长螺旋线的加工路径[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 1-4.  
ZHOU Lin, DAI Yi-fan, XIE Xu-hui, et al. A novel path used in computer-controlled polishing process based on uniform-area-increment Spiral[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 1-4. (in Chinese with an English abstract)