

激光辐照对红外探测器的损伤

吴思捷¹, 赵晓蓓¹, 杨东升², 闫杰²

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 根据红外探测器的结构特点和传热学理论, 研究激光干扰机的激光器对探测器的损伤效果。以 InSb 探测器为例, 设定入射激光从顶层辐照, 结合各层之间热传导效应建立分层热模型。考虑激光在空间上的分布为高斯分布, 给定初值和边界条件, 利用 Matlab 偏微分工具箱进行建模仿真。重点研究了辐照距离、辐照时间和激光器功率等因素对探测器损伤效果的影响, 给出了相应的仿真结果。当连续激光功率为 50 W、距离为 200 m、辐照时间为 3 s 时, 对探测器的损伤效果主要是软损伤, 受激光功率密度所限, 未能造成永久性破坏。

关键词: 激光; 红外探测器; 损伤; 热模型; 温升

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1184-05

Laser damage in IR detector

Wu Sijie¹, Zhao Xiaobei¹, Yang Dongsheng², Yan Jie²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the structure of IR detector and the theory of thermal conduction, thermal damage of IR detector irradiated by optical maser of laser jammer was investigated. InSb photovoltaic detector was selected as a research detector. The Thermal Model was developed based on the structure of InSb detector. In this model, the detector was divided into three layers which included InSb chip, glue and copper substrate. The thermal conductivity functions of each layer were different due to various material's conduction coefficient values. The distribution in space of incident laser beam was Gaussian profile, supposing the incident laser irradiated on the top layer, and set the initial value parameters and boundary conditions. The initial temperature of the detector was 77 K and the boundary conditions were Neumann type. The multi-layer thermal models for laser damage were solved by PDE-tool. The plot of temperature rise was acquired by specifying a group of typical laser parameters through simulation. Key factors consisting of the power of optical maser, the irradiated time and the distance between the infrared detectors and optical maser were deeply researched. Through Orthogonal experimental design, a series of contrastive figures were obtained. The thermal damage effects were analyzed on basis of these data. The simulation results confirm that the detector absorbs the energy of the laser and the temperature rise

收稿日期: 2012-09-13; 修订日期: 2012-10-17

基金项目: 航空基金(20100153002); 航天支撑基金(1014002)

作者简介: 吴思捷(1988-), 男, 硕士生, 主要从事载运工具控制与对抗仿真方面的研究。Email: wusj21@yahoo.com.cn

导师简介: 赵晓蓓(1960-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事载运工具先进控制系统技术方面的研究。

Email: zhaoxiaobei@nwpu.edu.cn

centralized on InSb materials and the glue. Since the glue's conduction coefficient value is low, the glue is poor at thermal transfer, so the temperature drops dramatically in the glue layer. When the power of continuous laser is 50 W, the irradiated distance is 200 m, and the irradiated time is 3 s, the infrared detector suffers soft damage. The power of density continuous laser is lower than the pulsed laser, as a result, the optical maser doesn't bring about long-lasting destructive effects.

Key words: laser; IR detectors; damage; thermal models; temperature rise

0 引言

随着激光技术的快速发展,激光武器、激光干扰机等对抗技术成为研究的热点。激光武器功率较高,易造成目标硬损伤,使其永久性破坏,如熔融、击穿等。激光干扰机功率较低,对探测器损伤主要为软损伤,使探测器光学性能退化或暂时性失效^[1]。文中主要研究了激光干扰机对红外探测器的损伤效果,入射激光为连续激光。有关激光对探测器的损伤已有前人做了许多研究。陈金宝等用一维热传导模型计算探测器受激光照射的温度变化^[2]。段晓峰等对激光辐照 InSb 圆板型靶材的二维物理模型求解其温度场和热应力场的瞬态分布^[3]。王世勇等研究了空间分布均匀的激光对探测器的损伤效果^[4]。以上研究主要是将探测器作为一个整体,没有对其建立分层热模型,且将激光设定成在空间上是均匀分布的。文中考虑了入射激光在空间上的分布为高斯分布,基于探测器结构建立分层二维热传导模型,利用 Matlab 偏微分工具箱求解热传导方程的数值解,并通过三维图形予以显示。同时结合激光器与探测器的相互作用距离、激光辐照时间和激光器功率等多组影响因素,综合分析其损伤效果。

1 探测器损伤建模方法

文中以 InSb 探测器为例研究激光对红外探测器的损伤效果,基于 InSb 探测器的结构组成建立几何模型,结合传热学理论,导出各层材料的热传导方程。设定入射激光从顶层辐照,考虑高斯光束的空间分布,确定其边界条件。

InSb 探测器在军用红外领域中占主导地位,其响应波段为 1~5.5 μm,通常工作于液氮温度 77 K,在此温度下具有最大的灵敏度^[5],其结构如图 1 所

示,PV 型 InSb 芯片用胶粘于充满液氮的杜瓦瓶铜基座上,使探测器的工作温度稳定于约 77 K。探测器分为芯片、胶层和铜基座三层模型。

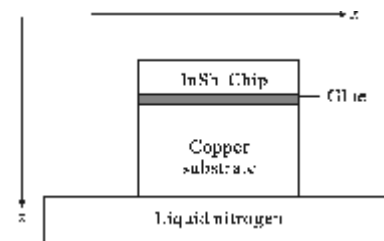


图 1 InSb 探测器结构示意图

Fig.1 Structure of InSb detector

为了便于分析传热过程,做如下简化假设:探测器各层均匀且各向同性,其光学特性与热力学参数和温度无关,忽略传热过程中的辐射和对流,只考虑物质由表面向内的热传导。

激光辐照材料表面,由于探测器光敏面上光斑的激光强度分布是对称的,其温度场也是对称的,考虑沿纵深的热量传导,可将三维模型简化成沿纵向剖面的二维模型。激光入射方向为 Z 方向,靶材表面为 Z 起点,探测器光敏面中心为坐标原点,激光辐照过程中的温度场 T 由热传导方程给出:

$$\rho c_i \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

各层之间热传导均遵循此方程,主要差异在于各层材料的密度、热容量和热导率不同,系数有所区别。其中 ρ 、 c_i 、 λ_i 分别为各层材料的密度、热容量和热导率^[6]。

求解热传导方程的温度场需确定其边界条件,按照辐照区域进行分类。

其中激光辐照区域边界条件为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = I(x, t)(1-R) \quad (2)$$

属于 Neumann 边界条件,即给定了边界上的法向热流密度。其中 $I(x, t)$ 为激光功率密度; R 为激光入射表面时 InSb 芯片的反射系数。

考虑基模激光束在横截面上的光强分布为一圆斑,中心处光强最强,向边缘方向光强逐渐减弱,呈高斯型分布,满足以下方程:

$$I(x, t) = \begin{cases} I_0(z) e^{-x^2/w^2(z)}, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$w(t) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (4)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}} \quad (5)$$

$$P = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} I_0(z) e^{-x^2/w^2(z)} x dx = I_0(z) \pi w^2(z) \quad (6)$$

式中: $I_0(z)$ 为中心处入射激光束的功率密度; $w(z)$ 为激光束的高斯半径; λ 为激光波长; z 为激光器与探测器距离; w_0 为基模激光束的腰斑半径; f 为激光器对称共焦腔的焦距(共焦参数); P 为激光器输出功率^[7]。

激光未辐照区域,在界面 S 处满足:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_S = 0 \quad (7)$$

属于 Neumann 边界的特例,为绝热边界。

2 基于 Matlab 的仿真实现方法

分析上述导热方程的方法主要有解析法和数值解法。解析法能够得到适合于同类问题的一般的函数关系式,但只有少数具有特定几何形状和边界条件的问题才能得到温度场的解析解,应用范围有限。数值解法可以很好地解决各种复杂边界下的激光加热问题^[8]。

文中通过 Matlab 偏微分方程工具箱求得偏微分方程的数值解,并将结果通过图形予以显示。设温度分布和热流在交界面上连续,采用上述热传导方程及边界条件,选取可调谐固体激光器,工作波长为 $2.5 \mu\text{m}$,腰斑半径设定为 2 mm 。具体仿真过程可分为以下 4 个步骤。

(1) 选择 Heat Transfer(热传导)应用模式,建立几何模型,划分求解区域。按照表 1 设定 InSb 芯片、胶层和铜基座三层模型的几何参数,绘制分层区域。

表 1 各层材料的几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of each layer

Material	Width/mm	Thickness/mm
InSb	0.2	1.0
Glue	0.2	0.2
Copper	0.2	10.0

(2) 定义求解边界条件,其中激光辐照区域边界条件为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{P}{\pi w^2(z)} e^{-x^2/w^2(z)} (1-R) \quad (8)$$

InSb 芯片表面反射系数 R 取 0.35; 激光未辐照区域为绝热边界。

(3) 定义 PDE 类型和 PDE 系数。在 PDE 模式中设置热传导方程为抛物型 PDE 方程,按表 2 对 InSb 芯片、胶层、铜基座三层区域的 PDE 系数进行设置。

表 2 各层材料的物理参数

Tab.2 Physical parameters of each layer

Material	Density /g·cm ⁻³	Thermal capacity /J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	Thermal conduction /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Melting point /K
InSb	5.78	96.56	35.55	523
Glue	1.25	1.53×103	0.20	-
Copper	8.95	0.385	386	-

(4) 设定求解方程的时间范围和初值条件,求解热传导方程。

3 仿真结果及其分析

按照上述建模过程对损伤效果进行仿真,其中激光器工作波长为 $2.5 \mu\text{m}$,腰斑半径设定为 2 mm 。首先设定一组典型激光器参数,获得探测器温升效应的三维图。然后着重研究探测器的损伤效果与激光辐照距离、激光辐照时间和激光器功率等因素的影响。通过改变相应的参数值,并将三维图像进行二维投影变换,获得多组温升效应的对比图,在此基础上分析相应因素的影响。

3.1 典型激光器参数下温升效应

激光器输出功率设定为 50 W ,激光器与探测器距离为 200 m ,激光辐照时间为 3 s 。可求得此时光斑

半径为 79.6 mm,功率密度为 0.251 3 W/cm²。仿真结果如图 2 所示。沿入射方向 z,探测器的芯片、胶层和铜基座的温度均有不同程度的升高,主要集中于 InSb 芯片和胶层。

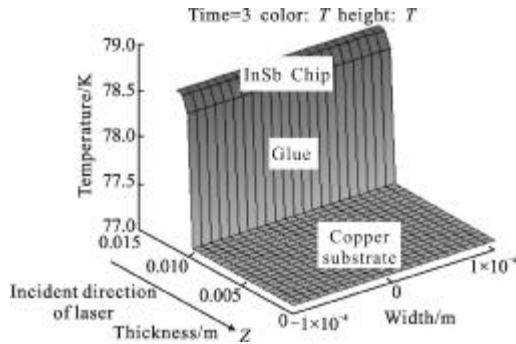


图 2 探测器温升效应三维图
Fig.2 3-D plot of temperature rise in IR detector

3.2 不同辐照距离温升效应对比

激光器输出功率为 50 W,设定激光器与探测器距离分别为 200 m、1 000 m、2 000 m,激光辐照时间为 3 s,仿真图像的二维投影对比如图 3 所示。随着距离的增加,激光束腰展宽,光斑半径扩大,能量衰减,对探测器的影响减弱。可以看出当距离为 2 000 m 时,探测器吸收的激光能量很弱,温度基本没有升高。

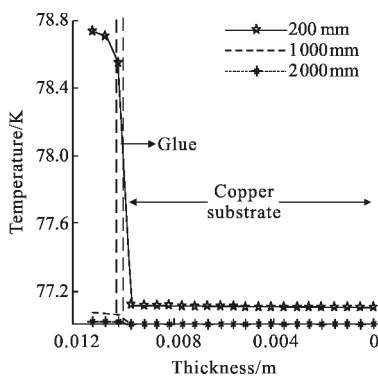


图 3 不同距离温升效应对比
Fig.3 Contrastive plots of temperature rise with different distance

3.3 不同辐照时间温升效应对比

激光器输出功率为 50 W,激光器与探测器距离为 200 m,设定激光辐照时间分别为 1、3、5 s 时,仿真图像的二维投影对比如图 4 所示。随着辐照时间的延长,探测器吸收的激光能量增加,温升程度也随之增加。

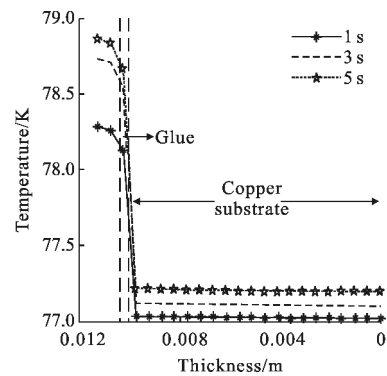


图 4 不同辐照时间温升效应对比
Fig.4 Contrastive plots of temperature rise with different irradiated time

3.4 不同功率温升效应对比

激光器与探测器距离为 200 m,激光辐照时间为 3 s,分别设定激光器工作于 10、100、200 W 时,仿真图像的二维投影对比如图 5 所示。激光功率不断增加,探测器接收到的激光能量增强,相同辐照时间内引起的温升效应也随之增强。当激光器输出功率为 200 W 时,此时温度升至 84 K,相比于激光器工作于 10 W 时的探测器温度 77.35 K,温升效应更为显著。

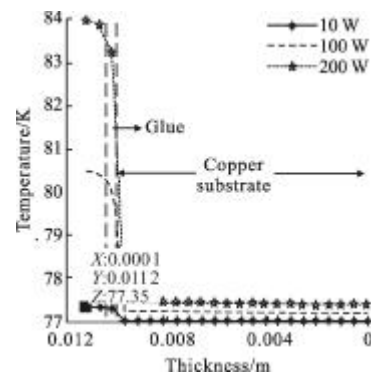


图 5 不同功率温升效应对比
Fig.5 Contrastive plots of temperature rise with different power of laser

由以上仿真图像可以看出,激光辐照引起探测器温度升高,温升程度与传输距离、激光辐照时间和激光器功率等因素密切相关。探测器的温升主要降在胶层,胶层的热传导率很小,热阻较大,探测器吸收的热量通过胶层时不能及时地散发出去。而铜的热导率很大,从胶层传递过来的热量能及时地传导给液氮,因此铜的温度基本没有升高,整个铜基座稳

定于液氮温度 77 K。

4 结 论

激光辐照红外探测器, 探测器吸收激光辐射而升温, 导致其性能下降。文中通过 Matlab 偏微分工具箱对探测器吸收激光能量后的温升效果进行仿真, 结合红外探测器的结构和高斯光束的空间分布, 建立分层热模型。通过改变激光束传输距离、辐照时间和激光器功率, 得到一组仿真对比图像, 在此基础上对其温度场分布进行分析。在热量由表及里的传导过程中, 由于 InSb 芯片、胶层和铜基座各层材料热传导率不同, 厚度不同, 各层温度差异很大。胶层是探测器热量传导的瓶颈, 由于其热传导率很小, InSb 芯片吸收的大部分能量不能及时传导出去, 当激光能量和辐照时间增加时, 其温升效应尤为明显。当温度升至 InSb 熔点 523 K 时, 将造成探测器永久性破坏。由仿真结果可以看出定向红外对抗系统中的激光器功率密度较小, 不足以对探测器造成硬损伤。温升程度只是达到了干扰探测器工作的范围, 未达到其破坏阈值, 连续激光要达到对红外探测器的致盲效果需要较高的功率。实际应用中, 机载激光干扰机受体积和重量所限, 激光器功率较小, 如“复仇女神”定向红外对抗系统使用的激光器为“毒蛇”固态全波段激光器, 在三个波段均能产生红外激光, 波段 I (1~3 μm) 是 3 W, 波段 II (3~5 μm) 是 2 W, 波段 IV (8~12 μm) 是 5 W, 均小于仿真实验所设定的值, 也可看出红外对抗系统中对探测器损伤以软损伤为主。文中讨论了在实验室条件下激光对红外探测器的损伤效果, 下一步将考虑激光在大气中的传输效应和导引头系统中头罩的影响。

参考文献:

- [1] Fu Wei. Laser technology of infrared countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 176-180. (in Chinese)
- [2] Chen Jinbao, Lu Qiheng, Shu Bohong, et al. Damage effect of CW CO₂ laser on PV type InSb detector [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(1): 47-49. (in Chinese)
陈金宝, 陆启生, 舒柏宏, 等. CW CO₂ 激光对 PV 型 InSb 探测器的破坏效应[J]. *激光技术*, 2002, 26(1): 47-49.
- [3] Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, 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)
段晓峰, 牛燕雄, 张雏. 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.
- [4] Wang Shiyong. Study on laser-induced CCD detector vulnerability and survivability and fussy synthetic evaluation on CCD jamming effects[D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2002. (in Chinese)
王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [5] Chen Boliang, Sun Weiguo, Liang Pingzhi, et al. Development and applications of staring InSb infrared focal plane array assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 419-423. (in Chinese)
陈伯良, 孙维国, 梁平治, 等. InSb 凝视红外焦平面组件研制和应用[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 419-423.
- [6] Jia Li, Fang Zhaohong, Qian Xinghua. High-level Heat Conduction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
贾力, 方肇洪, 钱兴华. 高等传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [7] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. *Laser Theory*[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. *激光原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] Li Can, Gao Yandong, Huang Suyi. Numerical simulation of problems in heat conduction using MATLAB [J]. *Huazhong Univ of Sci & Tech (Nature Science Edition)*, 2002, 30(9): 91-93. (in Chinese)
李灿, 高彦栋, 黄素逸. 热传导问题的 MATLAB 数值计算[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(9): 91-93.