



HgCdTe 探测器在激光辐照下的温度场模拟

姜可^{1,2}, 谢冀江¹, 张来明¹, 徐东东^{1,2}

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, 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 当强激光辐照光电探测器时, 热效应是最主要的破坏机制。探测器表面吸收激光能量导致表面温度升高。温度升高到一定程度, 探测器处于非正常工作状态, 输出信号失真, 不能准确探测信号。而探测器的温度场分布与探测结构和材料的物理性质有很大关系。为研究探测器内部的温度场分布, 本文建立了热传导模型, 利用 Matlab 软件数值模拟了激光辐照下探测器内 HgCdTe 光敏元的温度场分布, 并对特定外界环境条件下, 激光损伤阈值与胶层的厚度和热导率的关系进行分析, 研究结果对探测器激光损伤效应提供有效的理论依据, 同时也有助于研究 HgCdTe 探测器的激光防护性能。

关键词 HgCdTe 探测器; CO₂ 激光; 温度场

中图分类号 TN249

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)24-0063-04

Simulation of Temperature Field of HgCdTe Detector with Laser Radiation

JIANG Ke^{1,2}, XIE Jijiang¹, ZHANG Laiming¹, XU Dongdong^{1,2}

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. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Photoelectrical detectors are widely used in many fields such as satellites, missiles, remote sensing and so on, both in civil and military applications and play a major role in social security and economic development. When the detector is irradiated by high power laser, the thermal effect is the major cause of damage. The laser energy absorbed by the detector raises temperature on the surface of the detector. When the temperature goes beyond the normal temperature range, the detector will not work normally and gives wrong output signals. The temperature distribution is related with the detector structure and the material's physical properties. In order to obtain the temperature distribution in the detector, a heat conduction model is established. Using the Matlab software, the simulation is carried out for the temperature distribution in HgCdTe detector with laser radiation and the relationship between the heat conductive coefficient, the thickness of glue and the laser damage threshold under specific external environment conditions is obtained. The results can provide some guidance for the data analysis of detectors and the detector's laser proof design.

Keywords HgCdTe detector; CO₂ laser; temperature distribution

0 引言

光电探测器是侦察卫星、资源遥感卫星、气象卫星上常用的传感器, 对国家的安全和经济利益有重大影响, 在民用

和军事领域都有着广泛的用途。随着激光武器的运用和发展, 用于军事上的各种探测器都面临着被高功率激光武器打击的危险。当探测器受到激光照射时, 少部分激光能量转化

收稿日期: 2010-08-17; 修回日期: 2010-11-29

作者简介: 姜可, 硕士研究生, 研究方向为激光辐照效应, 电子信箱: jkwangyou@163.com; 谢冀江(通信作者), 副研究员, 研究方向为激光应用技术, 电子信箱: xjllaser@163.com



为有用的信号,大部分能量使物质粒子获得过剩能量,破坏原有的热平衡状态,经过各种机制的弛豫过程,向新的平衡状态过渡,最后引起探测器表面和体内温升。不考虑激光辐照时的光学饱和效应以及力学效应,强激光辐照下的红外光电探测器热学效应应占重要地位^[1-2]。激光辐照产生的温度场模拟的简化模型主要有半无限场、柱状、三维或二维模型,本文采用简化二维模型对 HgCdTe 探测器的温度场进行模拟,建模简单,容易操作,直观表现了温度扩散最终的分布状态。

1 模型建立

光电探测器结构一般较为复杂,图 1 为 PC 型 Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.27$)探测器的分层结构示意图^[3]。可以看出,HgCdTe 芯片用胶粘贴在 Al₂O₃ 衬底上。HgCdTe 芯片两端引出信号线,与电阻串联,接入恒流电路中,导线边界欧姆接触。芯片光敏面积为 1.0mm×1.0mm,入射激光束直径远大于光敏面面积,故可认为光敏面上激光束功率密度均匀。

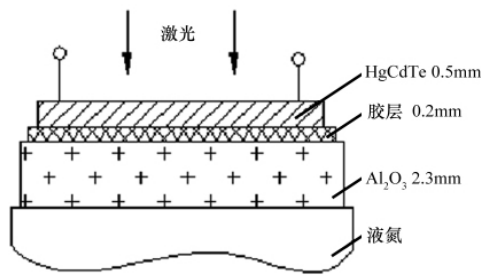


图 1 HgCdTe 探测器结构示意图
Fig. 1 Structure of HgCdTe detector

当光电探测器受到激光照射时,其表面和体内的温度会发生剧烈变化,通过求解热扩散方程^[4]可以得到探测器的温度场分布。热扩散方程为

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

式中, T 为物体的瞬态温度; C_p 为定压热容量; ρ 为材料密度,作为常数处理; k 为材料的热导率; Q 为激光束带来的内热源, $Q=\alpha p/V$,其中 α 为材料吸收率, p 为入射激光功率, V 为材料的吸收层体积。

事实上,激光辐照光电探测器的温升过程是一个三维问题。光电探测器的结构一般较为复杂,一般为分层结构,探测器的光敏面积较小。由于衍射和大气扰动的影响,即使通过探测器光学系统的聚集,探测器表面处入射激光束的光斑一般也大于探测器的光敏面。在此情况下,可采用平面一维分层介质的热传导模型,层与层的界面处存在热交换和非理想热接触。因此,可将式(1)进行一维简化,得

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \quad (2)$$

由于激光束完全覆盖了探测器,只考虑在平行于光束方

向上(即 x 方向)的温度分布,垂直于光束方向(n 方向)热扩散为 0,则物理模型的光敏面和侧面满足第一类边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha p \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

设探测器处于真空中,底面有液氮制冷,满足第三类边界条件:

$$T(x, t) \Big|_{x \rightarrow \infty} = 77 \quad (5)$$

未受到激光照射时,探测器初始温度均匀,有^[1]

$$T(x, 0) = 77 \quad (6)$$

三维固态热传导方程属于抛物线型偏微分方程,只有在特定情况下才能求得解析解。由于激光辐照与半导体材料的相互作用非常复杂,一般采用数值方法。利用 Matlab 偏微分方程工具箱的可视化界面求解,方便有效,并可给出三维可视化图形。

用 Matlab 软件模拟探测器温度场分布时,HgCdTe 探测器的前 3 层厚度分别为 0.5,0.2 和 2.3mm,这里只计算前 3 层总厚度 3.0mm,不将维持温度的液氮计算在内。由此对模型网格进行剖分,如图 2 所示,三角网格中节点共 997 个,三角网格共有 1856 个。

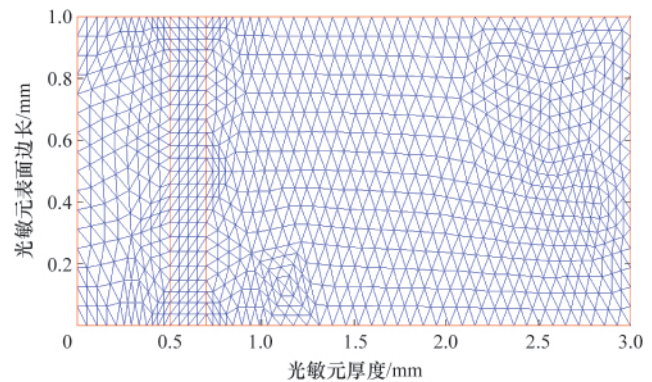


图 2 物理模型的网格剖分
Fig. 2 Grid of physical model

按式(3)~式(6)设置边界和初始条件,并根据给出的参数表格(表 1)^[5],设置 HgCdTe 探测器前 3 层的偏微分方程参数。

表 1 HgCdTe 探测器的参数
Table 1 Parameters values appearing in the thermal model

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	d/mm
HgCdTe	7600	150	20	0.5
Epoxy	1250	1530	0.2	0.2
Al ₂ O ₃	3980	174	1100	2.3

2 模拟结果和结论分析

激光光源选择连续的 CO₂ 激光光源,光束经衰减后辐照

在探测器光敏面上的功率密度为 $0.2\text{W}/\text{mm}^2$ [6] 光敏面表面吸收系数为 0.56 时,探测器在辐照 1s 后的温度场如图 3 所示。

由于激光束光斑远大于探测器光敏面的面积,辐照均匀,探测器温度场的分布关于激光光束的传播方向对称。图 3

(a)表明,激光辐照前,探测器的初始温度为 77K,经激光辐照 1s 后,温度升到 270K 左右。由于前胶层的导热系数非常小,激光辐照不能使衬底的温度迅速上升,热量几乎全部集中在 HgCdTe 材料层,破坏了材料原有性质。

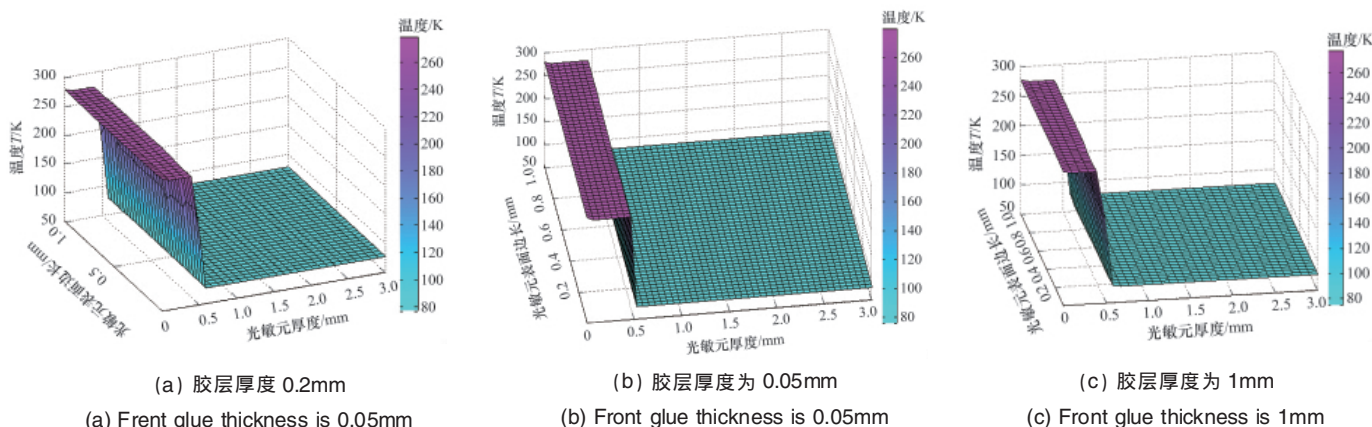


图 3 激光辐照 1s 时探测器的温度场分布 (热导率为 0.2)

Fig. 3 HgCdTe detector temperature distribution with laser radiation of 1s (heat conduction coefficient of glue is 0.2)

图 3(b)和图 3(c)分别为前胶层厚度为 0.05mm 和 1mm 情况下,激光辐照 1s 后的探测器温度场分布情况。可以看出,胶层的厚度对于探测器温度场的分布几乎无影响。

辐照时间延长到 2s 时,探测器温度场分布如图 4 所示,可以看出,探测器的温升已经达到 450K 左右,完全超出了探

测器正常工作的最大温度范围 (77~350K)。此时探测器已不能正常接收信号。

图 5 为胶层导热率分别为 0.1 和 $1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 时激光辐照 1s 后的探测器温度场分布,可以看出,胶层导热率对探测器的温度场分布影响不大。

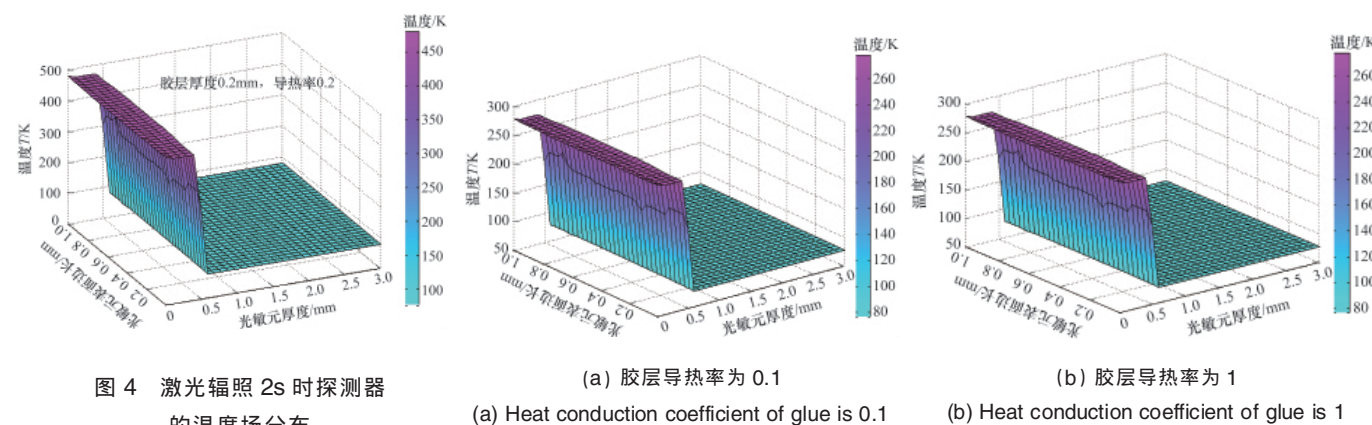


Fig. 4 HgCdTe detector temperature distribution with laser radiation of 2s

图 5 激光辐照 1s 时探测器的温度场分布 (胶层厚度为 0.2mm)

Fig. 5 HgCdTe detector temperature distribution with laser radiation of 1s (front glue thickness is 0.2mm)

综上所述,当用激光破坏参数如表 1 所示的 HgCdTe 探测器时,可以不用考虑胶层导热率和胶层厚度对破坏阈值的影响。

温度的改变将导致 HgCdTe 的禁带宽度 E_g 、长波限、峰值响应波长 λ 及探测率等参数发生相应的变化。Schmit 公式 [7]:

$$\lambda = 1/[1.28m - 0.20 + 0.264m^2 + 4.22 \times 10^{-4}T(1 - 2.08m)] \quad (7)$$

表明了 HgCdTe 中组分 m 和温度 T 与器件长波限的关系。

组分一定时,探测器的长波限随温度的升高而向短波方向移动。

图 6 为 $m=0.27$ 时,材料温度的变化对长波限的影响。激光辐照时探测器长波限的变化幅度很小,对探测结果不产生明显影响。激光辐照时间达到一定程度后,由辐照产生的热在 HgCdTe 材料中积累,温度升高,使长波限迅速向短波方向移动,对探测造成干扰。

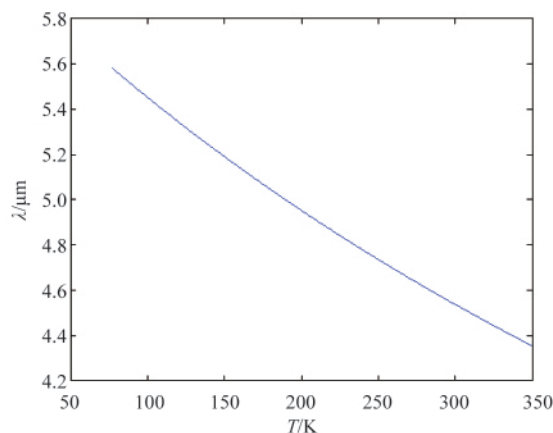


图 6 材料温度与长波限的关系

Fig. 6 Relation between wavelength and material temperature

3 结论

利用 Matlab 偏微分方程工具箱对 HgCdTe 探测器的瞬态温度场分布进行计算并对结果进行分析。研究表明,胶层的低导热系数有效阻止了热量向基底的扩散,导致激光辐照产生的热在 HgCdTe 光敏层积累,最终导致探测器光敏元的性能变化。在 $20\text{W}/\text{cm}^2$ 的 CO_2 激光辐照下,胶层的厚度与导热率在允许变化的范围内对于光敏元的热分布情况没有明显的影响。研究结果为探测器激光损伤效应提供有效的理论依据,同时也有助于研究 HgCdTe 探测器的激光防护性能。

参考文献 (References)

- [1] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
Sun Chengwei. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2002
- [2] 王飞. 单元光伏型碲镉汞探测器及可见光 CCD 的激光损伤机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Wang Fei. Damage mechanisms of laser on PV-type single element HgCdTe device and visible-light CCD[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [3] 周建民. 激光对光电制导武器跟踪系统的干扰技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
Zhou Jianmin. Research on jamming of tracking system of Photoelectric guided weapon induced by laser [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [4] 段晓峰, 牛燕雄, 张维, 等. 激光辐照 HgCdTe 探测器的温度场数值分析[J]. 光电子·激光, 2003, 14(2): 191-193.
Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu, et al. Journal of Optoelectronics Laser, 2003, 14(2): 191-193.
- [5] 吕国华. 脉冲激光与半导体材料 HgCdTe 和 GaAs 相互作用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2005.
Lu Guohua. Interaction between laser and semiconductor material HgCdTe and GaAs[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2005.
- [6] 李修乾, 程湘爱, 王睿, 等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 40-44.
Li Xiuqian, Cheng Xiang'ai, Wang Rui, et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 40-44.
- [7] Keyes R J. Optical and infrared detectors [M]. Beijing: Science Press, 1984: 170-175.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“第九届全国微型化学实验研讨会暨第七届中学微型实验研讨会”征文

中国化学会将于 2011 年 7 月 19—24 日在武汉召开“第九届全国微型化学实验研讨会暨第七届中学微型实验研讨会”。会议主题: 绿色、低碳、创新、和谐。

征文内容: 具有推广价值的微型实验方案、新仪器(含无机、有机、高分子、分析、物化和中小学自然科学)的新 ML 的软硬件; 微型实验在科学研究与工农业生产中的应用; 推广应用 ML 经验总结与问题讨论(如: ML 在生态文明建设中的作用、ML 与创新教育、ML 在研究性学习中的应用、ML 与绿色化学、环境保护与环境污染处理、低碳经济、资源节约型与环境友好型社会建设等); 境外微型实验的新进展。

联系方式: 武汉市洪山区雄楚大街 693 号(430074), 鄢国平; 电话: 027-87196030。

会议网站: <http://news.wit.edu.cn>。

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章, 被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主, 兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿, 择优刊登。每篇书评以 2100 字左右为宜, 需配书影, 并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑: 陈广仁, 投稿邮箱: chenguangren@cast.org.cn。

《科技导报》“科学共同体要闻”栏目征稿

“科学共同体要闻”栏目报道中国科协、地方科协和中国科协所属全国学会, 以及其他学术团体的重大科技事件、学术活动成果等新闻。每条科技新闻字数为 300 字左右, 要求标注新闻来源、日期。欢迎各级科协和全国学会推荐或自荐新闻。栏目责任编辑: 陈广仁, 投稿邮箱: chenguangren@cast.org.cn。