

# 红外传感器的带外激光对抗技术试验研究

李松山,王 岳,朱 虹  
(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘 要:**带外干扰是光电对抗领域的热门研究内容,本文分析了激光带外干扰的作用机理,搭建了一套试验平台,针对典型红外光学材料,系统性开展了 1064 nm 带外激光破坏试验,收集了大量详实的试验数据,并在远场对数据予以验证,希望能对从事红外光学传感器带外激光对抗技术研究的工作者起到参考和借鉴的作用。

**关键词:**带外干扰;热应力;功率密度;破坏阈值

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.05.016

## Experiment and research on laser countermeasure of infrared sensor

LI Song-shan, WANG Yue, ZHU Hong  
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Out-band jamming is a hot research spot in photoelectrical countermeasure field. This paper analyzes the mechanism of the out-band laser countermeasure. A set of testing platform was built. Experiments of out-band damage induced by laser with the wavelength of 1064 nm were systematically conducted on typical infrared optical materials. Large amounts of experimental data were collected from both laboratory and field tests. That will provide references for researchers who specialize in out-band laser countermeasure technology.

**Key words:** out-band jamming; heat stress; density of power; destructing threshold

### 1 引 言

主动激光干扰是较为有效的光电对抗手段,利用一定功率的激光辐照光电传感器,造成传感器被辐照激光干扰、致盲甚至破坏从而不能完成既定的战术任务。

目前激光带外对抗是光电对抗领域的热门研究内容,由于辐照激光的波长处于目标光电传感器的响应频带之外,辐照激光不能够直接干扰或破坏传感器的核心组件,而是主要作用到传感器的光学传输系统,达到阻塞信号通道、破坏传输膜层或摧毁镜片组件的效果,造成传感器不能正常工作。

目前国内外有关频带外激光与光学传输系统间相互作用的研究有大量的文献可供参考,但大多集中在理论基础研究和热力学数学模型推导方面,实际破坏试验和破坏数值的分析较少,应用 1.06  $\mu\text{m}$

连续激光对典型中、长波红外光学材料的破坏试验数据有限,本文通过系统性的近场试验研究获得了大量详实的试验数据,并通过实际远场破坏试验予以验证,希望能对该研究领域的其他工作者起到参考和借鉴的作用。

### 2 带外对抗的对抗机理简述

红外光学材料对于波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的激光有着不同的物理特性,本实验的研究对象选择典型中、长波红外成像器光学窗口及光学镜片常用的光学材料。依据激光的功率密度和作用时间的不同,实际作战过程中主要产生以下四种干扰和对抗效果:

---

**作者简介:**李松山(1974-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为激光在光电系统中的应用。E-mail:li\_song\_shan@sina.com

**收稿日期:**2012-03-23

(1)当激光功率密度较低时,一定时间的辐照使得镜片温度缓慢升高,光学镜片因热变形导致曲率参数变化,图像模糊离焦、扭曲变形,影响红外成像器的成像质量;

(2)被加热的光学镜片自身成为热辐射源,造成热传输通道被阻塞,影响红外传感器的有效作用距离,甚至造成红外传感器因热饱和而无法正确识别目标;

(3)当激光功率密度较高时,被辐照部位温度快速升高,当表面温度达到足以损伤传输膜层甚至造成镜片基底材料熔化时,辐照激光将造成光学材料永久性损伤,出现膜层剥离、成分析出、基片龟裂、材料熔化等现象,将大幅降低成像器的性能指标,甚至无法正常工作;

(4)当激光的功率密度足够强大时,短时间的照射就能导致温度急速升高,温度的快速变化及分布不均匀导致镜片产生巨大的热应力,当应力超过材料的破坏阈值时将造成镜片迸溅、破碎甚至炸裂,对产生硬杀伤的作用效果。

3 红外光学材料的激光损伤试验

3.1 试验装置及试验对象

为了开展激光辐照破坏试验,录取试验数据,搭建了一套试验记录平台,主要包括光束分析仪、1.06 μm 连续激光器、功率计、准直扩束结构、聚焦透镜、透镜夹及滑轨、高速图像记录设备、成像型红外测温仪及 He - Ne 激光指示器等,试验装置示意图如图 1 所示。

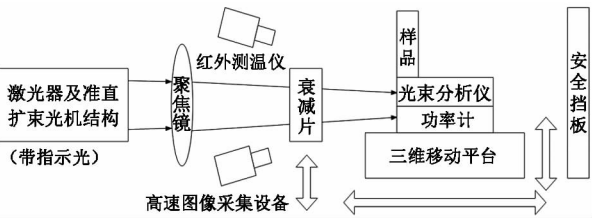


图 1 试验装置示意图

该套试验装置的目的是将激光器扩束输出的平行光经过聚焦镜聚焦,利用光束分析仪测量激光光斑的直径和能量分布情况,通过改变光斑与聚焦镜之间的距离获得不同直径的激光光斑,测量激光光斑的功率,调整激光器的输出功率,精确标定辐照激光光斑的功率密度数据。记录特定功率密度激光辐照试验样品的试验现象,试验样品为红外镜片及红外窗口的典型材料,样品种类、主要参数如表 1 所示。

表 1 试验样品基本特性

| 样品材质       | 直径/mm | 厚度/mm |
|------------|-------|-------|
| 硅(未抛光未镀膜)  | 25    | 3.4   |
| 硅(中波增透膜)   | 20    | 3.2   |
| 锗(抛光无镀膜)   | 70    | 3.3   |
| 锗(中波增透膜)   | 25    | 2.3   |
| 锗(长波增透膜)   | 20    | 3.2   |
| 硫化锌(长波增透膜) | 70    | 3.3   |
| 氟化镁(抛光无镀膜) | 50    | 3     |

3.2 试验流程及试验现象

安装试验材料,根据事先标定好的功率密度数值调整试验装置的工作参数,每种材料的试验全部从光斑功率密度为 100 W/cm<sup>2</sup> 开始试验,本项试验的目的是获取光学镜片材料的应力破坏数据,主要关心材料被高功率密度激光短时间辐照的热应力破坏效果,因此每次出光时间固定设置为 2 s,逐级提高光斑的功率密度对每种材料进行多次试验,观察被试材料的变化过程和试验现象。

试验过程中开启高速图像采集设备,根据记录图像的帧数精确测定对应试验现象的准确辐照时间,同时使用红外测温设备记录材料试验中的温度变化过程和最高温度值,依次完成几种材料的试验及数据的录取,收集试验后的样品残骸,分类标记并拍照记录。试验样品对应的试验数据和试验现象的汇总如表 2 所示。

表 2 样品试验数据和试验结果

| 样品材质           | 功率密度<br>/(W · cm <sup>-2</sup> ) | 作用时间/s | 试验现象        |
|----------------|----------------------------------|--------|-------------|
| 硅(未抛光未镀膜)      | 500                              | 2      | 材料变红无显著破坏现象 |
| 硅(未抛光未镀膜)      | 700                              | 1.4    | 材料破碎炸裂      |
| 硅(中波增透膜)       | 300                              | 2      | 有烧蚀痕迹膜层失效   |
|                | 500                              | 1.5    | 材料破碎炸裂      |
| 锗(抛光无镀膜)       | 250                              | 1.8    | 材料破碎炸裂      |
| 锗(中波增透膜)       | 200                              | 1.2    | 材料破碎炸裂      |
| 锗(长波增透膜)       | 250                              | 1.2    | 材料破碎炸裂      |
| 硫化锌<br>(长波增透膜) | 200                              | 2      | 材料无显著破坏现象   |
|                | 350                              | 2      | 材料起火伴有破裂声音  |
|                | 500                              | 1.7    | 材料破碎炸裂      |
| 氟化镁<br>(抛光无镀膜) | 800                              | 2      | 材料无显著破坏现象   |
|                | 1000                             | 2      | 材料无显著破坏现象   |

图 2 为实际光学镜片的实际破坏效果,图 2 (a)~图 2(c)分别为未抛光未镀膜的硅材料,抛光无镀膜的锗材料,抛光并镀 3~5 μm 增透膜的锗材料的破坏效果。

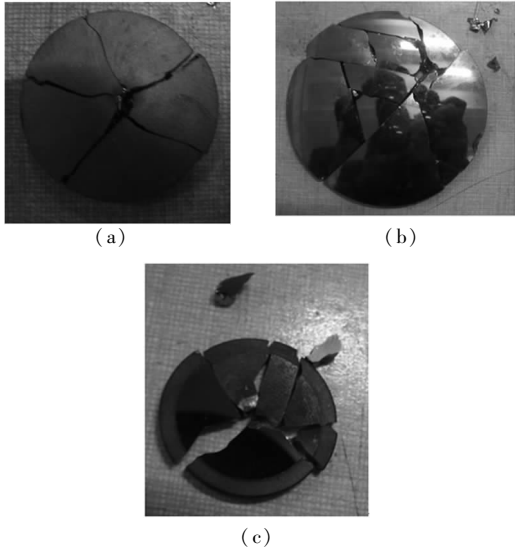


图 2 光学镜片的实际试验效果

图 3 为未产生破碎效果的试验效果图,图 3 (a)~图 3(c)分别为镀 8~10 μm 长波增透膜的硫化锌、抛光并镀 3~5 μm 增透膜的硅材料和氟化镁材料的实际打击效果。

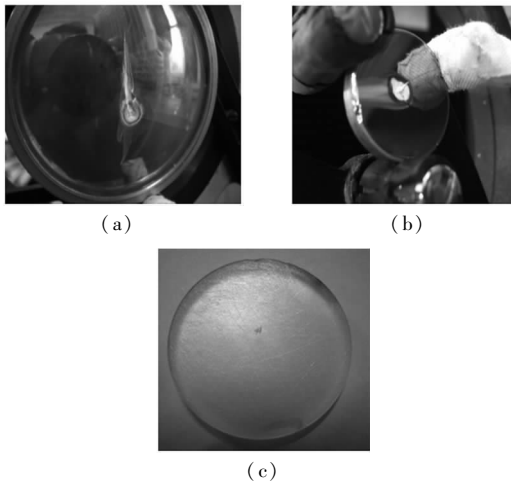


图 3 光学镜片的实际打击效果

3.3 试验数据分析

材料自身特质的区别反映出不同的破坏现象和破坏阈值,氟化镁材料对 1.06 μm 激光的透过率较高,即使将功率密度提高到 1000 W/cm<sup>2</sup> 的水平,仍然不能对样品造成有效伤害。

其他几种材料对 1.06 μm 激光的透过率相对较低,激光辐照导致被试材料温度快速升高,靶材的温度场分布与靶材的半径、厚度和辐照时间有关,因而在对比不同靶材的热应力特性时应选择半径和厚

度尽量相同的靶材对比。对表 1 和表 2 的数据进行了重新梳理,得到表 3,可以发现如下规律:

- (1)同样半径和厚度硅材料的破坏阈值高于锗材料;
- (2)同样半径和厚度硫化锌材料的破坏阈值高于锗材料;
- (3)同种材料半径越大、厚度越厚抗破坏能力越强;
- (4)综合试验数据总结可以发现,典型红外窗口材料的抗 1.06 μm 激光的带外破坏特性为氟化镁>硅>硫化锌>锗。

表 3 红外材料的带外激光破坏数据对比分析

| 材料  | 半径/厚度/mm | 有效破坏功率密度/W·cm <sup>-2</sup> | 破坏时间/s |
|-----|----------|-----------------------------|--------|
| 硅   | 20/3.2   | 500                         | 1.5    |
| 锗   |          | 250                         | 1.2    |
| 硫化锌 | 70/3.3   | 350                         | 2      |
| 锗   |          | 250                         | 1.8    |
| 硅   | 25/3.4   | 700                         | 1.4    |
|     | 20/3.2   | 500                         | 1.5    |

3.4 试验数据的远场验证

借助一套实用化激光拦截系统开展试验数据的远场验证,将试验记录平台放置到室外环境中,距激光拦截系统数百米,瞄准并控制光斑准确聚焦到靶材表面,测定远场光斑的功率密度数据,记录破坏试验的过程,完成远场试验数据验证。

对比远场数据与近场数据发现了几条规律:首先同种红外光学材料的远场破坏阈值一般高于近场破坏阈值;其次,远场光斑的破坏阈值受外界环境因素的影响明显,其中环境温度和风速等因素影响较为明显;第三,远场光斑的破坏阈值受跟瞄精度的影响较为明显,当远场光斑有晃动时,材料对应的破坏阈值有大幅提升。

结合远场试验数据,从实际作战需求分析,带外激光干扰技术在战场上的实际应用至少需要确保远场光斑的功率密度在 1000 W/cm<sup>2</sup> 的水准,且能够保证对一点稳定跟踪 2 s 以上。

4 带外激光干扰技术的战场应用

假定预期有效杀伤半径为 1 km,根据系统作战距离和功率密度需求,采用 Matlab 计算软件编程,设定大气湍流系数、系统跟瞄精度、光束质量等参数,采用逼近算法演算系统所需的发射口径和功率需求。设大气湍流系数为较弱大气湍流条件、系统跟瞄精度为 15 μrad,演算得出带外激光干扰系统的

技术需求和方案可行性分析,如表 4 所示。

表 4 技术体制、指标需求及可行性分析

| 激光器体制       | 光束质量<br>/(mm·mrad) | 口径需求/mm | 功率需求/kW | 方案可行性            |
|-------------|--------------------|---------|---------|------------------|
| 单模光纤<br>激光器 | 2.5                | 200     | 11      | 不可行,无对应<br>激光器   |
|             |                    | 500     | 5       | 基本可行,暂无<br>对应激光器 |
| 多模光纤<br>激光器 | 14                 | 200     | 200     | 不可行,无对应<br>激光器   |
|             |                    | 500     | 37      | 基本可行,但功<br>耗较大   |
| 板条激光器       | 8                  | 200     | 71      | 不可行,效费比<br>过低    |
|             |                    | 500     | 15      | 可行,但功耗较<br>大     |

随着大功率激光器技术及高精度快速跟瞄技术的长足进步,激光拦截系统甚至激光武器系统逐渐走向成熟,其技术指标已经基本能够满足上述指标需求,带外激光干扰红外成像器这一广受关注的概念将不再仅仅停留在理论和实验室中,随着实用化程度的逐渐完善,在不久的将来带外激光干扰系统必将能够走向战场迎接实战的考验。

参考文献:

[1] Hu Hanping. Theory of the heat conduction[M]. Hefei: University of Science & Technology of China Press, 2009. (in Chinese)  
胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.

[2] Liu Shida, Liang Fuming, Liu Shishi, et al. Atmospheric turbulence[M]. Beijing: Peking University Press, 2008. (in Chinese)  
刘式达,梁福明,刘式适,等. 大气湍流[M]. 北京:北京大学出版社, 2008.

[3] Zhang Wentao, Zhu Baohua. Reseach on the laser beam through turbulence atmosphere channel[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,

2007, 36(4): 784 - 787. (in Chinese)  
张文涛,朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 784 - 787.

[4] Jiang Nan, Niu Yanxiong, Zhang Shulian, et al. 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)  
姜楠,牛燕雄,张书练,等. 波段外脉冲激光对锗材料热冲击效应的数值研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 481 - 484.

[5] Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Lijie, et al. Atmospheric transmission property of 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(1): 17 - 21, 37. (in Chinese)  
杨洋,赵远,乔立杰,等. 1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 17 - 21, 37.

[6] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Analysis of threshold of laser damage in photoelectric detectors[J]. Laser Journal, 2001, 22(4): 1 - 5. (in Chinese)  
钟海荣,刘天华,陆启生,等. 光电探测器的激光破坏(损伤)阈值分析[J]. 激光杂志, 2001, 22(4): 1 - 5.

[7] Cui Yunxia, Niu Yanxiong, Wang Caili. Numerical analysis of CW laser damage in germanium[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 267 - 271. (in Chinese)  
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.

[8] Huang Feng, Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, et al. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 576 - 580. (in Chinese)  
黄峰,牛燕雄,汪岳峰,等. 光学窗口材料激光辐照热-力效应的解析计算研究[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 576 - 580.

[9] Chen Faliang. Analytical solution for laser-induced heating and thermal stress crack of optical material targets[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(4): 595 - 601. (in Chinese)  
陈发良. 强激光辐照下窗口材料靶传热及热应力破裂的解析分析[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(4): 595 - 601.