

# 光电探测器激光损伤判别法与发展现状

高 润, 牛春晖, 李晓英, 吕 勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 在现代高技术战争中, 以探测器为核心的光电设备极易受到激光的辐照干扰, 严重的情况下则导致探测器内部结构损坏以及材料的永久性损伤致使探测器功能性损坏。所以激光对探测器的硬损伤一直都是研究的热点课题, 而探测器的损伤判别方法和损伤阈值的确定则是深入研究损伤机理的关键。近几年来, 激光对探测器的损伤判别法在不断改进, 也出现了新的判别方法, 这使得判别结果的准确性和可靠性都得到了提高。本文主要对强激光损伤探测器的判别方法重新进行了总结, 介绍了各判别方法的作用机理及发展趋势, 为探测器损伤机理的研究打下了良好基础, 同时也为探测器的防护以及激光对探测器的故意损坏提供了理论依据和研究方法。

**关键词:** 激光损伤; 判别方法; 损伤阈值; 光电探测器

中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)08-0636-07

## Determination Methods and Development Status of Photoelectric Detector Damaged by Strong Laser

GAO Run, NIU Chunhui, LI Xiaoying, LYU Yong

(College of Instrumentation Science & photoelectric Engineering, Beijing Information Science & Technology University,  
Beijing 100192, China)

**Abstract:** In modern high-tech war, as the core of the photoelectric devices, CCD detector is easily dazzled and damaged by lasers due to its extremely-high sensitivity, and severe cases will lead to internal structure damage and material of permanent damage which makes the detector can't work normally. So it has been a hot topic to study the hard damage of detector irradiated by laser, and the determination of determination methods and damage threshold are the keys to in-depth study of the damage mechanism. In recent years, the determination methods of detector damaged by laser are continuously improved and some new methods also appeared, which makes the accuracy and reliability of the discriminant results improved. This paper mainly focuses on determination methods of photoelectric detector damaged by laser to carry on the comprehensive summary including mechanism and development trend, which builds a good foundation for the further study of damage mechanism as well as providing the theoretical basis and research methods for the protection or deliberately damage of detector.

**Key words:** laser-induced damage, determined methods, damage threshold, photoelectric detector

## 0 引言

在现代高技术战争中, 光电对抗作为一种全新的作战手段在不断发展和壮大, 光电对抗也从传统军事力量的一种补充演变为克敌制胜的一种有效手段<sup>[1]</sup>。在光电对抗中, 以探测器为核心的光电设备极易受到激光的辐照干扰, 严重的情况下则导致探

测器内部结构损坏以及材料的永久性损伤使得探测器无法正常工作, 甚至无法再成像。由此, 探测器的防护以及激光对探测器的故意损坏在光电对抗中一直都是研究热点<sup>[2]</sup>。为了深入研究激光对探测器的损伤机理, 探测器的损伤判别方法和损伤阈值的确定则显得尤为重要, 所以, 目前长春理工大学, 长春光机所、西安工业大学, 电子科技大学等机构

收稿日期: 2016-04-12; 修订日期: 2016-06-29。

作者简介: 高润 (1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光电对抗方面的研究, E-mail: sunnyrain512@163.com。

通讯作者: 牛春晖 (1976-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电对抗的研究工作。E-mail: 13520185497@163.com。

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (4154071); 北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目 (201400002012G105)。

对激光损伤判别法都已展开了大量的理论及实验研究<sup>[3-36]</sup>, 判别方法主要集中在光散射法<sup>[15-17]</sup>, 等离子体闪光法<sup>[18-21]</sup>, 光热偏转法<sup>[22-23]</sup>, 声学识别法<sup>[24-26]</sup>等。刘强等人<sup>[14]</sup>曾在2002年总结了关于强激光辐照损伤的判别方法, 但在这十几年的时间里, 研究方法在不断改进, 也出现了新的判别方法, 为此, 本文针对强激光损伤探测器的判别方法重新进行总结, 并介绍了各判别法的作用机理和特性以及发展趋势, 为探测器的防护以及激光对探测器的故意损坏提供了理论依据和研究方法。

## 1 激光对探测器的损伤判别法

通常激光损伤靶面材料的检测方法可分为两种: 一种是离线检测, 一种是在线检测。离线检测是可观察到激光辐照靶面材料的微观损伤形貌, 一般测量精度高, 有效数据多, 不足的是无法对探测器的损伤效果实现实时监测, 对连续激光的损伤无法确定, 且测试者对于损伤阈值的判定难以保持一致标准使检测效率低; 在线检测可实现实时监测靶面材料的损伤情况, 有利于获得准确的靶面损伤阈值, 检测效率相对较高。近几年在线检测在激光损伤的判别研究中处于主导地位, 研究者更多致力于研究新的在线检测方法, 由此在线检测是未来的发展趋势。

## 2 离线检测损伤判别法

### 2.1 相衬显微镜判别法

相衬显微镜判别法是符合国际标准ISO 11254的一种标准评价损伤的检测方法。利用放大100~150倍的相衬显微镜来观察探测器靶面受损情况, 若靶面受激光辐照后形貌发生永久性变化, 则判定为损伤<sup>[8]</sup>。相称显微镜又指相差显微镜, 是利用被测物反射率和吸收率的不同, 根据光的衍射和干涉现象, 通过空间滤波将被测物反射光和透射光的相位信息转为相应的振幅信息, 从而提高物体成像的反衬度。相衬显微镜判别法对于明显损伤判别准确, 是一种灵敏的检测方法, 但对于微小损伤, 则难以观察到。不足的是测试者对于损伤阈值的判定难以保持一致标准, 检测效率低, 测量范围小。

### 2.2 白光干涉判别法

垂直扫描白光干涉法是在相移干涉法的基础上, 结合了白光干涉技术和相移显微技术, 以白光为光源, 利用干涉条纹特性来对待测表面微观形貌进行高精度高分辨率测量。原理是由白光产生光程差极小的相干光波, 在等光程位置处可观察到干涉条纹,

利用CCD获取每次垂直扫描时的干涉条纹图像, 将条纹图像叠加并记录图像像素点在垂直方向的光强分布, 通过计算光强分布最大值, 从而获得待测表面的三维形貌<sup>[9-10]</sup>。白光干涉技术在国外已发展的相对成熟, 美国、日本等公司已经推出很多相关产品, 国内方面常素萍<sup>[9]</sup>等研究者利用白光干涉技术同样进行了大量的轮廓尺寸和表面形貌的测量研究, 精度、分辨率可达到纳米级。由此, 垂直扫描白光干涉法可应用于损伤判别的离线检测, 通过观测靶面三维微观形貌来别探测器是否受到激光损伤。白光干涉法提供了完整的三维受损表面形貌, 测量范围大, 精度高, 可实现非接触, 无损伤、远程测量<sup>[11]</sup>。所以在今后, 白光干涉法可以更多的应用于激光损伤靶面材料的判别检测中, 对损伤机理的研究会具有推进作用。

### 2.3 雾气判别法

光电探测器靶面受到轻微损伤或变形时, 若使用相衬显微镜难以观察到, 可使用雾气法对损伤情况进行辅助判别。雾气法是在探测器靶面处喷射未达饱和蒸汽压气体, 如水蒸气, 使探测器轻微受损处或形变处被放大从而更容易被显微镜观察到, 得以对损伤情况准确判别<sup>[12]</sup>。雾气判别法适用于难以观察到的轻微损伤, 操作简单, 常用于辅助相衬显微镜判别损伤。

## 3 在线检测损伤判别法

### 3.1 光斑变形法

激光辐照光电探测器时, 可通过观察激光光斑来判别探测器是否受到损伤。刘延武<sup>[13]</sup>指出当光电探测器处于线性工作区功率范围时, 干扰光斑呈近似圆形, 随着激光功率的逐渐增加, 产生的信号电荷逐渐填满积分势阱, 当积分势阱饱和时, 此时的输出功率为探测器的像元饱和阈值。继续增大功率, 信号电荷溢出积分势阱使得未受光辐照的区域也有电信号输出, 从探测器中可观察到一条穿过干扰光斑的亮线, 此为串音现象。串音现象没有对器件及其组成材料造成破坏, 但却干扰了其正常工作, 此为探测器的软损伤。若继续增大激光功率, 探测器内部结构将破坏且材料发生永久性损伤, 此时探测器无法获得图像信号, 造成硬损伤。一般把激光光斑是否发生变形作为探测器软损伤的判据<sup>[14]</sup>, 利用光斑形变法不易确定探测器硬损伤的损伤阈值, 所以光斑形变法在如今一般作为辅助判别研究。

### 3.2 散射光判别法

强激光辐照光电探测器后, 通过测量参考光对

作用点的散射能量变化来判别探测器的损伤情况<sup>[15]</sup>。而判别标准不一,苏俊宏等人<sup>[16]</sup>指出散射光能量角分布受参考光波长、功率、工作模式,入射角以及散射光探测距离的影响,所以在探测散射光能量时,探测器最好放在具有最大散射光能量的反射光方向附近以便获得最高散射光相对能量,并且尽量增加参考光入射角度和缩小对散射光探测器距离,以便能准确判别探测器的损伤程度。徐立君等人<sup>[17]</sup>利用了散射光法判别强激光辐照硅光电探测器的损伤阈值,测试装置如图1所示。YAG 泵浦光束通过衰减系统到最终由透镜会聚到光电探测器的表面。He-Ne 探测光束在泵浦光束辐照待测材料前后分别发出一个激光脉冲,其散射光能量被探测器接收,可根据辐照前后的散射光能量的变化量来判断是否损伤。一般把参考光在强激光作用点的反射光能量下降 10% 来判别探测器受到激光损伤,而此时强激光的入射能量则为探测器的损伤阈值。散射光判别法是一种常用的判别激光损伤的方法,可以实现实时检测,不足的是精度不高,尤其是在已经发生损伤后,若继续增加辐照光强,此时的散射光能量变化不明显,另外如果损伤区域比较小,用散射光判别法可能无法检测出探测器的损伤。

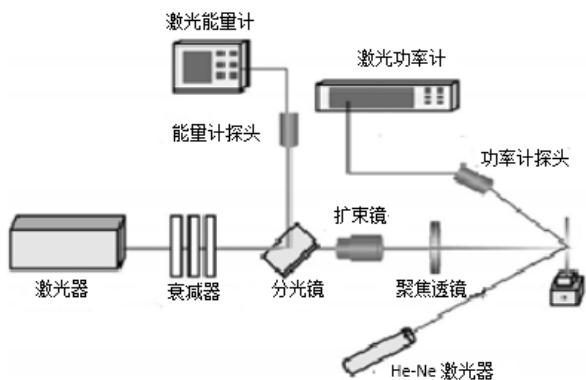


图1 激光损伤光路和激光损伤测量光路

Fig.1 The experiment installation diagram of the detector irradiation by laser

### 3.3 等离子体闪光判别法

刘丽炜等人<sup>[18]</sup>指出强激光聚焦在光电探测器靶面时,探测器材料局部温度迅速升高,且在受激光辐照的位置处发生迅速融化、蒸发或气化现象,并形成等离子体,伴有肉眼可观察到闪光。而激光参数如波长、脉宽、能量以及探测器材料都会对等离子造成小闪光或大火花闪光的差异。一般地,无论大闪光还是小闪光,只要发生等离子闪光现象即可认为探测器已受到激光损伤。这种标准可以较大排除人为因素的影响,但在等离子体闪光产生之前

材料实际上已产生了一定的损伤,所以等离子闪光判别法对探测器的轻度损伤并不能及时检测到。李兴文等人<sup>[19]</sup>总结了判断等离子体闪光的产生可使用快速拍照法和发射光谱法。快速拍照法使用ICCD 或条纹相机以获取等离子体闪光的成像信息,而发射光谱法利用的是激光诱导击穿光谱技术(LIBS),Marcello M.等人<sup>[20]</sup>基于 LIBS 技术,获得了等离子体散射光谱,实验装置如图 2 所示。当激光诱导击穿半导体材料,产生等离子体时,等离子体发射的光谱中具有强激光谱线成份以外的含有其他样品元素信息的线状谱线,通过谱线分析便可对样品中所含元素进行定性和定量分析<sup>[21]</sup>。

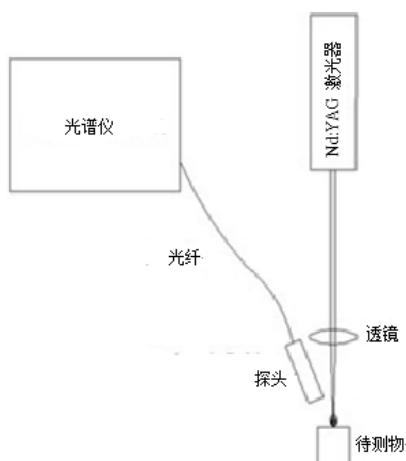


图2 LIBS 技术的实验装置

Fig.2 Schematical experimental setup used in LIBS technique

### 3.4 光热偏转判别法

泵浦光照射探测器表面时,半导体材料在光的激发下吸收光能并部分或全部转变为热能,产生光热效应。韩锦涛<sup>[22]</sup>指出半导体中光、热、力等特性的共同作用会使半导体材料发生形变,当参考光掠过被泵浦光束辐照过的地方时,若泵浦光能量较小,光、热、力等特性的变化是可逆的;当泵浦光能量大于探测器的损伤阈值,光、热、力等特性则发生不可逆改变,从而使参考光束发生不可逆偏转。一般把参考光是否发生不可逆偏转作为判别探测器是否受到损伤的依据,另外通过测量光束偏转角也可进一步研究光、热、力等特性对半导体材料的影响。光热偏转法包括横射式、掠射式、透射式 3 种,具有灵敏度高,适用性强,既可测量表面微小损伤,也可探测更深层的结构损坏,检测样品范围大,可实现非接触式实时检测<sup>[23]</sup>,不足的是实验设备搭建相对复杂且对实验环境要求较高。

### 3.5 光声判别法

光声判别法是利用光声效应来判别损伤的一种

方法。当强激光辐照光电探测器时, 半导体材料因吸收光能而产生周期性热流, 即热波, 周期性热流使周围介质热胀冷缩而产生声波, 固体的热弹效应是声波的主要来源, 而半导体中还会激发周期性变化的电子-空穴对, 即等离子体波, 等离子体波也将通过电子应变效应而产生声波。声波通过声音传感器接收, 当光声波形和振幅发生明显变化时可认为探测器已受到损伤<sup>[24]</sup>。早在1995年王乃彦等人<sup>[25]</sup>就利用光声法研究光学膜的破坏阈值, 通过判断薄膜损伤前后, 光声信号波形图是否发生明显变化来判别损伤, 由于环境因素的影响这种方法得到的损伤阈值会有一定误差, 且判别标准难以保持一致。近几年西安工业大学对光声判别法的研究相对较多, 苏俊宏等人<sup>[26]</sup>通过提取24~40 kHz高频段曲线的频率特征, 提出了使用曲线相似函数的损伤识别方法, 此方法简单易行, 增加了判断薄膜损伤的准确度并降低环境噪声对其的影响, 实验装置如图3所示。目前光声判别法能够准确判别探测器损伤, 便于应用和实时检测, 不过该方法对于光声探头的要求很高, 需要高灵敏度、抗外界电磁辐射的光声探测器。

### 3.6 声光判别法

声光判别法是由西德柏林大学的科学家于1988年提出的, 之后美国LLNL实验室采用此方法并展开深入研究。声光判别法是指强激光辐照光电探测器时, 半导体材料吸收光能, 并在光、热、力的共同作用下产生短脉冲高压冲击波, 在探测器靶面处用一束探针光来探测此冲击波, 在气体声光调制下会使探针光发生抖动, 由能量计测量探针光的抖动脉冲, 通过抖动脉冲的幅值大小来判别探测器是否受损以及计算损伤斑点的尺寸。声光判别法测量精度较高, 精度可以达到10 μm<sup>[27]</sup>。

### 3.7 响应信号判别法

徐立君等人<sup>[28]</sup>认为光电探测器响应度变化直接反应了探测器的损伤程度, 可利用探测器对激光的响应度变化判别光电探测器是否受到激光损伤。当激光功率密度逐渐增加时, 探测器的响应信号饱和; 当光电探测器受到激光损伤时, 其PN结遭到破坏, 使探测器收集光生载流子的电场减弱, 响应信号下降; 若继续增加辐照功率, PN结被热击穿, 探测器对光没有响应, 响应度则下降为零<sup>[29]</sup>。响应信号判别法精度较高, 操作简单, 可实现实时检测。

### 3.8 散射光偏振判别法

由于目标表面粗糙度的差异会影响回波偏振度, 所以散射场的偏振特性可以用于目标识别和提取。激光具有良好的偏振性, 强激光辐照探测器靶面时, 参考光通过起偏器产生线偏振光入射到探测器受光辐照位置, 其散射光的回波信号通过检偏器被探测器接收。镜面反射光没有退偏振现象, 而粗糙表面引起的高阶散射光必存在退偏振效应。所以表面越光滑, 越接近镜面反射, 其保持入射光场偏振度的能力越强, 而反射特性越接近朗博体的目标, 其散射场的偏振度越小<sup>[30-33]</sup>。因此, 可通过探测器靶面受光辐照前后偏振度是否发生明显变化作为判别损伤的标准, 散射光偏振判别法对远距离测量精度不高, 且对于已经发生的轻度损伤不易检测到。目前此方法国外方面研究较多, 国内方面黎全<sup>[33]</sup>等研究者更多是利用偏振法研究目标伪装识别, 而较少应用与激光损伤判别的研究, 由此散射光偏振判别法可作为未来的研究课题。

### 3.9 散斑干涉判别法

散射光干涉技术是利用激光分束后在待测物体表面会产生一个干涉的散斑场, 当物体表面发生形变时散射场也随之变化, 利用CCD记录散射场的前后变化, 通过图像处理得到散射场的相位信息, 最后通过计算把相位信息转变为形变信息。散斑干

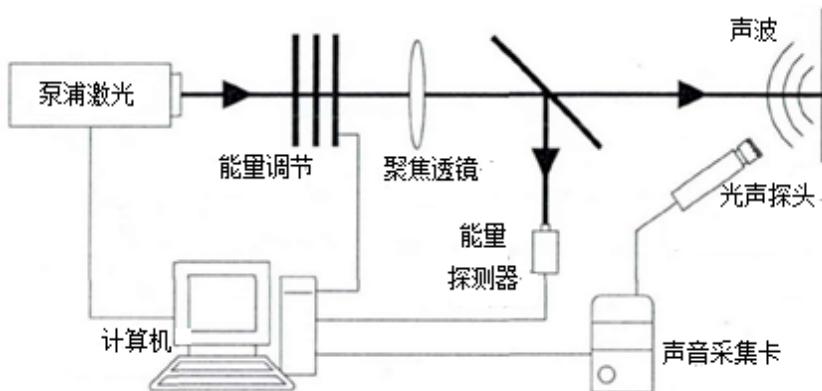


图3 损伤测试和声频采集的实验装置图

Fig.3 Schematic diagram of damage testing and acoustic frequency collecting system

涉判别法是通过散射场变化来计算得到靶面粗糙度，根据粗糙度值从而判别探测器是否受到激光损伤<sup>[34-35]</sup>。散斑干涉判别法可实现实时检测，不足的是此方法很难精确地计算出表面粗糙度<sup>[9]</sup>，从而对判别准确性造成影响。

### 3.10 六角光栅判别法

六角光栅判别法是基于六角相位光栅（DOE）的分数泰伯效应，由于光的衍射，激光束将会在光栅后面的分数泰伯距离处形成许多不同能量密度的高斯光斑，在分数泰伯处放置待测探测器以进行激光损伤，在分数泰伯共轭位置处放置观察探测器以进行实时监测光斑能量，实验装置如图4所示。当探测器发生损伤时，将各个点高斯光斑的能量密度归一化，并把光斑分布图与显微镜下探测器的损伤分布图重心重合，从而确定探测器的激光损伤阈值<sup>[36]</sup>。六角光栅判别法的优点是激光损伤阈值只需要一次测量就可确定，大大提高了测试效率，不足的是测量准确度受相位光栅尺寸和疏密程度的影响。

### 3.11 图像判别法

何长涛等人<sup>[27]</sup>研究利用图像处理的方法展开激光对探测器的损伤识别，常用的是把未损伤图像作为基准图像，对基准图像和待测图像进行滤波、二值化等处理，再对两幅图像进行相关运算，通过

相似度比较来判别探测器是否受损。当两幅图像相似度较高时，输出的相关图像出现明显峰值，可认为探测器并未受到损伤，若相关图像中没有出现相关峰值，输出比较平坦，则认为探测器已受到损伤。利用图像判别法可实现实时检测，不足的是对于不明显损伤不易检测到，且受制于算法的不同，判别损伤的标准难达成一致。

## 4 总结

激光损伤判别法和损伤阈值的确定一直都是热门的研究课题，虽然在国际标准中规定了损伤判别的标准，但各种判别法目前都在应用且发展趋势是相互配合互补长短，常以在线检测为主，离线检测辅助判别，目的是减小人为因素的影响，增加判别结果的准确性。例如，实际应用中常以散射光判别法为主要检测方式，配合使用雾气法和相衬显微镜判别法。现如今需要做的是对现有的判别方法不断改进，提高精度，扩大测量范围，减小各判别法之间存在的差异，同时发展新的检测方法，使损伤的判别结果更准确，数据更可靠，最终为损伤机理的研究打下良好基础，从而为探测器的防护以及激光对探测器的故意损坏提供良好的理论依据和研究方法。

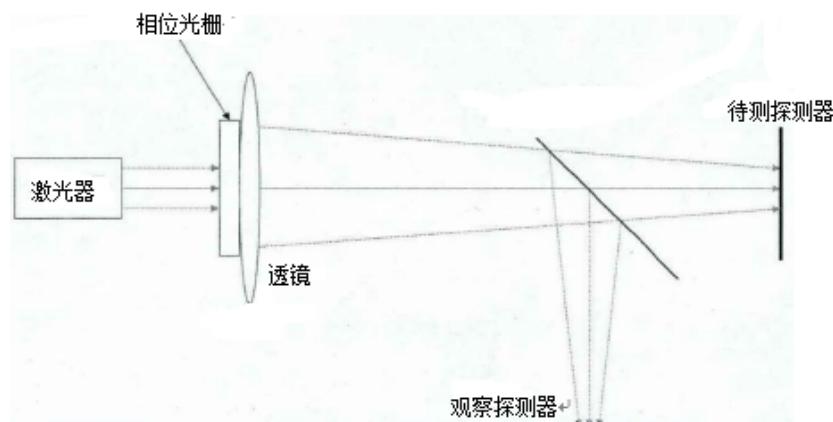


图4 六角光栅法测试损伤阈值的光路示意图

Fig.4 Hexagon grating method test damage threshold of optical path diagram

## 参考文献：

- [1] 刘松涛, 高东华. 光电对抗技术及其发展[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 1-9.  
LIU Songtao, GAO Donghua. Opto-electronic countermeasure technologies and their development[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(3): 1-9.
- [2] 栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 等. 10.6 μm 激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究[J]. 红外技术, 2016, 38(1): 6-9.  
LI Xingliang, NIU Chunhui, MA Muyan, et al. Research on the thermal

- damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6 μm Wavelength[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(1): 6-9.
- [3] Chih-Tang Sah, Horng Sen Fu. Transient response of MOS capacitors under localized photo excitation[J]. *IEEE*, 1974, 21: 202-209
- [4] ZHANG Chenzhi , Steve E, Watkings, et al. Laser-induced damage to silicon charge-coupled imaging device[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(5): 651-656.
- [5] ZHANG Chenzhi, Ludovic Blarre, Rodger M Walse, et al. Mechanism for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging

- sensors [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(27): 5201-5210.
- [6] 陈金宝, 陆启生, 苏柏宏, 等. CW CO<sub>2</sub> 激光对 PV 型 InSb 探测器的破坏效应[J]. 激光技术, 2002, **26**(1): 47-49.
- CHEN Jinbao, LU Qisheng, SHU Bohong, et al. Damage effect of CW CO<sub>2</sub> laser on PV type InSb detector[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(1): 47-49.
- [7] 朱志武, 张震, 程湘爱, 等. 单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 113-118.
- ZHU Zhiwu, ZHANG Zhen, CHENG Xiangai, et al. Damage phenomenon and probability of CCD detector under single-laser-pulse irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1): 113-118.
- [8] Becker J, Bernhardt A. ISO11254: an international standard determination of the laser induced damage threshold[C]//SPIE, 1994, **2114**: 703-713.
- [9] 常素萍. 基于白光干涉轮廓尺寸与形貌非接触测量方法和系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CHANG Suping. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [10] Margaronea D, Kozlová M, Nejdla J, et al. Laser-induced damage studies in optical elements using X-ray laser interferometric microscopy[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7361**: 73610N-1-73610N-11.
- [11] James L B, Andrew Z, Shekhar G. Interferometric assessment of laser-induced damage to semiconductors[C]//Proc. of SPIE, 2003, **4932**: 434-443.
- [12] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 267-270.
- SUN Chengwei. *Effect of Laser Irradiation*[M]. Beijing: National of Defense Industry Press, 2002: 267-270
- [13] 刘延武. 激光干扰 CCD 系统的实验研究[J]. 激光杂志, 2011, **32**(1): 55-56.
- LIU Yanwu. Experiment research on laser disturbing CCD detectors [J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(1): 55-56.
- [14] 刘强, 林理彬, 祖小涛, 等. 强激光辐照损伤判别方法[J]. 激光杂志, 2002, **23**(4): 3-5.
- LIU Qiang, LIN Libin, ZU Xiaotao, et al. Studies on the methods to determine the damage irradiated by high-laser[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4): 3-5.
- [15] LI Fuquan, HUANG Wangqi, HAN Wei, et al. Explaining laser-induced damage behavior of fused silica in large-aperture laser by small-aperture damage test[C]//Proc. Of SPIE, 2010, **7842**: 78421J-1-78421J-7.
- [16] 苏俊宏, 梁海锋, 徐均琪. 激光损伤的光散射法判别研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, **30**(3): 325-328.
- SU Junhong, LIANG Haifeng, XU Junqi. Evaluation criteria of laser-induced damage threshold based on light scattering[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, **30**(3): 325-328.
- [17] 徐立君, 张喜和, 吕彦飞, 等. 激光与 PIN 光电探测器相互作用的响应度研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(7): 717-720.
- XU Lijun, ZHANG Xihe, LV Yanfei, et al. Research on responsibility of PIN detector interaction with laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(7): 717-720.
- [18] 刘丽炜, 张喜和, 张凤东, 等. 激光能量对 Si 等离子体电子温度的影响[J]. 长春理工大学学报, 自然科学版, 2008, **31**(4): 65-67.
- LIU Liwei, ZHANG Xihe, ZHANG Fengdong, et al. Influence of laser energy on the electron temperature of the Si plasma[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology, Natural Science Edition*, 2008, **31**(4): 65-67.
- [19] 李兴文, 魏文赋, 吴坚, 等. 激光诱导等离子体光学诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2015, **41**(6): 1788-1797.
- LI Xingwen, WEI Wenfu, WU Jian, et al. Review of optical diagnosis methods for the laser produced plasmas[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(6): 1788-1797.
- [20] Marcello M A, Marcus P R, Anderson Z F, et al. Laser induced breakdown spectroscopy(LIBS) applied to stratigraphic elemental analysis and Optical Coherence Tomography(OCT) to damage determination of cultural heritage Brazilian coins[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7391**: 739101-1-739101-12.
- [21] 刘佳, 高勋, 段花花, 等. 激光诱导击穿光谱技术研究的新进展[J]. 激光杂志, 2012, **33**(1): 7-10.
- LIU Jia, GAO Xun, DUAN Huahua, et al. Latest development of laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser Journal*, 2012, **33**(1): 7-10.
- [22] 韩锦涛. 基于光热偏转法的激光薄膜损伤识别研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
- HAN Jintao. Research of thin film damage testing based on photo thermal deflection[D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2015.
- [23] 谈恒英, 刘鹏程, 施柏煊. 激光光热偏转成像法无损检测光学薄膜的激光损伤[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 158-160.
- TAN Hengying, LIU Pengcheng, SHI Baixuan. Non destructive testing of laser photothermal deflection image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 158-160.
- [24] 丁毅. 激光薄膜损伤的声学判别方法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- DING Yi. Study on acoustic identification method of laser damage in thin films[J]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2012.
- [25] 王乃彦, 高怀林. 用光声法测定光学膜的破坏阈值[J]. 强激光与粒子束, 1995, **7**(2): 157-164.
- WANG Naiyan, GAO Huailin. Study of the phenomena on KrF

- laser-induced coating damage by photo-acoustic method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(2): 157-164.
- [26] 苏俊宏, 王坤坤, 梁海峰. 激光薄膜损伤的声频判别方法[J]. 光学与光电技术, 2014, **12**(1): 27-31.  
SU Junhong, WANG Kunkun, LIANG Haifeng. Acoustic frequency method of detection of optical thin films damage[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, **12**(1): 27-31.
- [27] 何长涛. 激光损伤阈值测试中的图像处理技术[D]. 成都: 四川大学, 2007.  
HE Changtao. Image Processing Technologies in Laser Damage Threshold testing[D]. Chendu: Sichuan University, 2007.
- [28] 徐立君, 张喜和, 蔡红星, 等. 强激光辐照硅光电探测器的损伤判别研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(12): 1263-1266.  
XU Lijun, ZHANG Xihe, CAI Hongxing, et al. Study on determine damage of photoelectric detector irradiated by high power laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **37**(12): 1263-1266.
- [29] 周鸣岐. 毫秒激光辐照硅光电探测器的损伤研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.  
ZHOU Mingqi. The Research on Damage of Silicon Photoelectric Detector Irradiation by Millisecond Laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [30] XU Lanqing, XU Xinmiao, ZHENG Yongping, et al. Target recognition in a turbid medium with backscattered polarization patterns [C]//Proc. of SPIE, 2007, **6829**: 68291P-1-68291P-6.
- [31] WANG Qichao, WANG Jiachun, ZHAO Dapeng, et al. Recognition of camouflage targets with hyper-spectral polarization imaging system [C]//Proc. of SPIE, 2013, **8910**: 8910Q-1-8910Q-6.
- [32] Volodymyr I P, Ricardo P F, Anatoly V P, et al. Detection and recognition of the targets by using the signal polarization properties [C]//Proc. of SPIE, 1999, **3718**: 283-291.
- [33] 黎全, 刘泽金, 舒柏宏, 等. 利用表面散射光偏振差异的目标识别技术[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3): 351-354.  
LI Quan, LIU Zejin, SHU Bohong, et al. Application of polarization diversity in active imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 351-354.
- [34] 许星. 基于散斑计量的材料内部缺陷检测及物体形貌测量[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
XU Xing. Internal Flaw Detection of Materials and Shape Measurement of Objects Based on Speckle Metrology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [35] Praveen Cherian Ashok1, Usha Nair, Varun K A S. Speckle metrology based study on the effect of chattering on machined surfaces [C]//Proc. of SPIE, 2007, **6671**: 66710V-1-66710V-8.
- [36] 徐建程, 胡建平, 许乔. 基于分数泰伯效应的激光损伤阈值测量[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(12): 1970-1974.  
XU Jiancheng, HU Jianping, XU Qiao. Fractional Talbot effect based measurement of laser-induced-damage thresholds[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(12): 1970-1974.