

文章编号: 1001-3806(2006)05-0494-04

激光对光伏探测器真空破坏的实验研究

薛海中¹, 李 伟², 张海涛², 雷 鸣², 过 振^{1*}, 巩马理²

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 清华大学 光子与电子研究中心, 北京 100084)

摘要: 为了进一步研究激光对光电探测器的损伤破坏特性, 以损伤面积和开路电压的变化为判断标准, 实验研究了真空环境与大气环境中, 脉冲激光辐照对光伏型探测器的破坏特性。选用无覆盖层的 2CR 10×2.5 四象限硅光电池作为探测器试件, 辐照光源为波长 1064nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器。分析讨论了真空及大气环境下, 单脉冲及多脉冲激光打击时, 光伏型探测器的破坏阈值及破坏形貌的区别及其成因。实验分析比较了不同环境下的破坏面积异同及其对光伏型探测器的影响。结果表明, 真空环境中的破坏阈值明显低于大气环境, 在本文中的实验条件下, 其实际阈值约为大气中的 40%。该研究在光电对抗及有效防护等方面有重要意义。

关键词: 激光技术; 真空破坏; 损伤面积; 破坏阈值

中图分类号: TL814 **文献标识码:** A

Experimental study about laser induced damage to photovoltaic detectors in vacuum

XUE Hai-zhong¹, LI Wei², ZHANG Hai-tao², LEI Ming², GUO Zhen¹, GONG Ma-li²

(1. School of Technical Physics Xi'an University, Xi'an 710071, China; 2. Center for Photonics and Electronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In the field of laser radiation protection and photoprotective countermeasure, it is important to find out the laser damaged characteristics of photovoltaic detectors. Considering the damaged area and the open circuit voltage, different performance of pulse laser induced damage to photovoltaic detectors in vacuum and atmosphere environments is investigated. The measuring object is uncovered 2CR 10×2.5 four quadrant silicon photo cell and the irradiation source is 1064nm wavelength pulsed solid state Nd:YAG laser. In both vacuum and atmosphere, the damage threshold and damage spot appearance of the photovoltaic detector are discussed under single pulse or multiple pulse laser irradiation. The difference of the damage area and their influence on the photovoltaic detector are compared experimentally in both environments. The results show that the laser induced damage threshold in vacuum is obviously lower than that in atmosphere. It is about forty percent of that in atmosphere under the experimental condition.

Key words laser technique; vacuum damage; damaged area; damage threshold

引 言

研究激光对光电探测器的损伤破坏特性, 在评估强激光的破坏效能、实施光电对抗及有效防护等方面都有重要意义^[1~4]。一直以来, 人们偏重于研究在大气环境中激光对光电探测器损伤特性, 并且取得了许多富有意义的成果^[5~7], 却很少关注在真空环境中激光对目标的破坏损伤情况, 至今仍有这方面的报道。随着空间技术的发展, 卫星间光通信和卫星间光电对抗技术日趋成熟, 光电探测器和太阳能电池板等器件是空间卫星通信及对抗技术的关键器件, 也是薄弱环

节, 如在光电对抗中常以使这些器件失灵为目标。太空环境下激光对光电探测器件的损伤特性与大气环境中差别很大, 用大气环境中标定的参数来评估真空中的损伤效果会有较大的误差。显然研究真空中激光对光电灵敏器件的破坏特性, 具有重要的现实意义和应用价值。作者将光伏型探测器置于真空环境中进行了大量实验, 研究了单脉冲及多脉冲激光辐照对探测器的输出性能的影响, 并与大气中探测器的破坏阈值以及破坏形貌进行了比较。

1 破坏机理

激光对光电探测器的破坏效应可以分为软破坏和硬破坏两种形式^[6,8], 软破坏就是指光电材料或器件的功能退化或暂时失效, 软破坏后器件仍有信号输出, 但信噪比会大大降低。而硬破坏主要指光电探测器的结构性破坏, 即永久性破坏, 被破坏器件无信号输出或

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (104750480)

作者简介: 薛海中 (1960-), 男, 博士研究生, 主要从事光电系统工程及其设备的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhgu@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-03-29; 收到修改稿日期: 2006-06-09

者出现结构的破坏,如器件中关键部分的热熔融,龟裂、断裂、击穿等。

激光辐照引起探测器损伤的原因很多,但在通常情况下起主要作用的是热效应。在激光照射探测器时,被材料吸收的光能会转化为热能,使光电探测器的工作状态发生变化,当热能达到一定强度或能量密度时,就会产生热应力、熔化和汽化等现象,造成光电探测器光敏表面出现裂纹、熔化坑和汽化坑,可以观察到有飞溅物附着于坑周围表面。

目前,大多数的光电探测器激光损伤的热模型及实验多以大气环境为背景。激光辐照材料表面产生热量梯度后,对热量起散失作用的存在传导、辐射和对流 3 种形式。大气环境中,对流散热对于被辐照器件表面的热量散发有重要贡献。而真空状态下由于气体的密度降低,对流的贡献将十分有限或近似为 0,因此,排放多余热量的唯一方式就是辐射散热,辐射散热要比其它两种散热方式慢得多,故激光束的能量很容易在被照表面积聚而使损伤阈值降低。因此,作者设计了此次实验,研究在真空状态下,激光对光电探测器的破坏特性,并与大气状态下的相比较。

2 实验原理及实验装置

辐照光束经分光棱镜后分成两束,一束用于打击探测器,另一束用来测量激光辐照能量。利用示波器测量光电池的开路电压及对交变信号的响应曲线。实验原理图如图 1 所示。

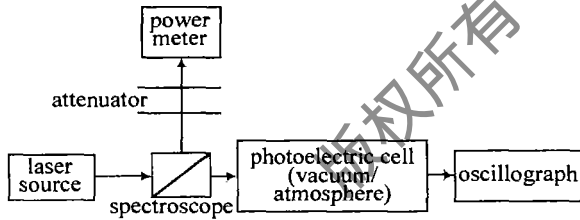


Fig 1 Schematic of laser induced damage when detector in vacuum

不同的光电探测器,有不同的破坏特性。作者选用无覆盖层的 2CR 10×2.5 四象限硅光电池作为探测器试件,将试件置于真空池或大气环境中。真空池采用北京仪器厂生产的真空泵抽取空气,制造真空环境。实验时真空室气压为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,大气环境则在大气中进行,气压为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,实验装置图如图 2 所示。

破坏探测器所用的激光器为 Nd:YAG 脉冲激光器,提供波长为 1064nm、频率 1Hz、脉宽 14ns 的辐照光束,单脉冲能量可调,随着激光器电压的增加而增大。光束在试件表面光斑直径为 2.4mm。

根据 ISO/DIS 11254-1.2 和 GB/T16601 的定义,精确测定损伤阈值需要破坏大量试件,以确定不同能量密度下的损伤几率,然后外推出零损伤几率作为损

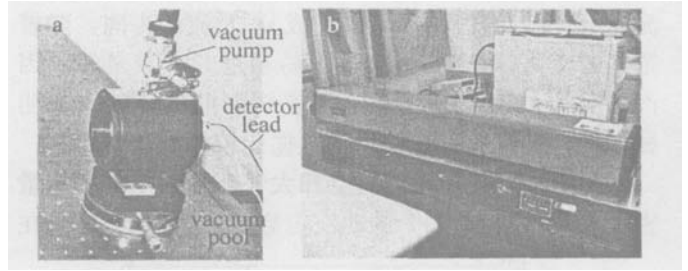


Fig 2 a—vacuum pool and vacuum pump used in the experiment b—Nd:YAG pulse laser used in the experiment

伤阈值,而且要求每次辐照前后用微分相衬显微镜检查损伤表面确定损伤情况^[9]。因为此次实验目的为比较真空和大气环境下的破坏特性差异,因此实验并没有设计对破坏阈值的精确标定,以下作者将采用“临界破坏能量密度”来代替破坏阈值的概念。“临界破坏能量密度”定义为:1-on-1 时,光电探测器表面形貌刚好出现目视可见硬损伤时的激光辐照能量密度。

3 实验数据分析

实验分别进行了单脉冲破坏和多个脉冲破坏时真空和大气不同环境下的比较。

3.1 单脉冲破坏临界能量密度比较

单脉冲破坏采用 1-on-1 的方式进行,即在样品的一个位置上只照射 1 次激光,不管这点是否遭到破坏,都换 1 个位置继续实验。

影响探测器损伤临界破坏能量密度的因素很多,除材料本身性质(如热导率,热扩散率,吸收系数,热容和密度)有关以外,激光束的光学参数(如波长,脉宽,重复频率等)以及探测器的光敏面清洁状态,都对临界破坏能量密度影响也很大^[6]。此次实验作者把注意力集中在真空和大气环境临界破坏能量密度数据的比较。

激光辐照试件表面产生热量梯度后,对热量同时存在着传导、辐射、对流 3 种散热方式。其中对流的大小既取决于表面材料及其粗糙度,又取决于冷却剂的

Table 1 The damage effect of single pulse and multi pulses

parameters	first pulse	continuous 10 pulses	continuous 20 pulses	
vacuum	peak open circuit voltage/mV	316	316	308
	mean open circuit voltage/mV	132	131.7	130.7
	damaged area/cm ²	0.00008	0.00025	0.00044
atmosphere	peak open circuit voltage/mV	291	225	145
	mean open circuit voltage/mV	198	146	98
	damaged area/cm ²	0.002	0.0109	0.024

流速、密度、温度、黏度、压力、成分、及流动方向。随着条件的变化,对流的大小很容易超过一个数量级。因而真空和大气两种环境下,激光辐照的破坏效率有明显差别。单脉冲破坏效果的数据比较如表 1所示。

图 3是实际测得的真空和大气环境临界破坏能量密度比较曲线,从图 3的曲线走势可以清楚地看到,在

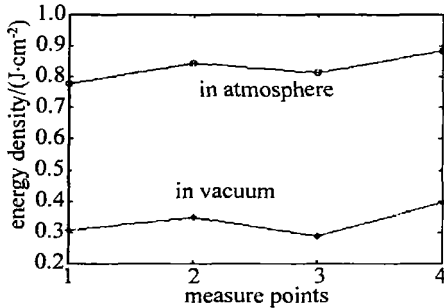


Fig 3 Comparison of the critical damage energy density in vacuum and atmosphere

真空和大气两种不同环境下,激光辐照的破坏效率有明显差别。在真空状态下探测器的激光临界破坏能量密度明显低于大气环境状态的临界破坏能量密度。大气环境中的临界破坏能量密度为 0.8285 J/cm^2 ,而真空状态下的临界破坏能量密度只有 0.3362 J/cm^2 ,真空状态下的临界破坏能量密度只有大气环境下的 41%。这是因为真空状态下空气密度的降低,使得对流效应大幅减弱或消失,因而与大气环境下相比,被打击点的局部对辐照所产生的热量的散失能力大幅下降,从而使得入射能量产生了更高的破坏效率。材料所处的真空度越高,则材料的破坏阈值越低,越容易破坏。

3.2 多脉冲打击的破坏效果比较

同时设计观察了真空和大气两种不同环境下,利用较低重复频率 (1Hz),在两种环境各自的临界破坏能量密度下,对同一点实施多脉冲打击后的破坏现象。

多脉冲破坏采用 N-on-1 的方式,“1”表示对同一点连续辐照,“N”表示连续辐照 N 次,即 N 个脉冲。脉冲的能量都采用单脉冲临界破坏时的能量。打击 N 次后,都重新换一位置继续实验。分别在 1-on-1, 10-on-1, 20-on-1 的打击次数下,测量了探测器的输出电压。

表 1表明真空环境下在 1Hz 频率下连续对同一点实施多次打击后,光电池的输出并没有显著下降,同时实验中观测到破坏点的面积增长也很缓慢。而在大气环境下,多次打击同一点时损伤面积的增大和输出电压的下降却很明显。分析是由于在大气环境状态下存在大量氧气,致使破坏时产生氧化烧蚀,而真空状态中不存在这类可能,因而损伤面积发展较慢,因此在相同多脉冲打击条件下,真空中的破坏面积比大气下的小很多,并且打击后的被破坏面很干净,从图 4破坏点照片可以看出,大气环境下实施多次打击的点,四周有较

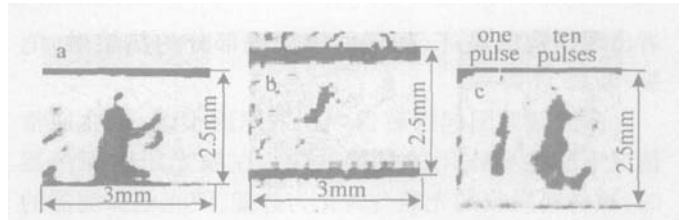


Fig 4 a—the damage appearance of 10 pulses laser in the atmosphere ($P = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) b—the damage appearance of 10 pulses laser in vacuum ($P = 1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$) c—the damage area of 1 pulse and 10 pulses laser in the atmosphere

多的斑点状产物,分析应该是氧化反应较为剧烈的结果(见图 4a),真空环境下的点则比较规则(见图 4b)。而且实验观察到,同样在临界破坏能量密度下,经过相同的打击次数后,真空状态中的破坏点面积明显小于大气环境状态。图 4c是大气中单脉冲破坏面积和 10 个脉冲破坏面积的比较。

3.3 损伤面积的影响

对于不同类型的光电探测器,破坏面积对其工作效率的影响有所不同^[10]。如 CCD 型探测器,CCD 的少数几个像元受激光辐照破坏后,其效果将是整个器件无信号输出。实验针对 2CR 型硅光电池的破坏面积进行了探测,分别研究了真空和大气环境中破坏面积对光电池输出性能的影响。

3.3.1 真空中 图 5和图 6分别是真空中点损伤前

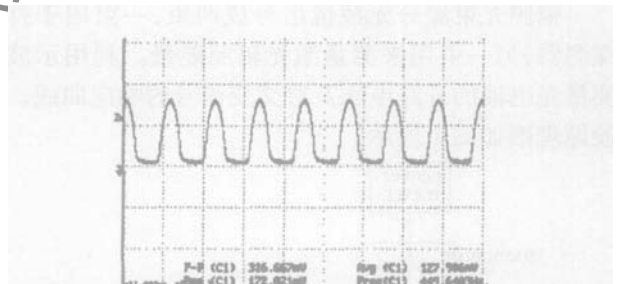


Fig 5 The open circuit voltage waveform before damage of the first spot in vacuum

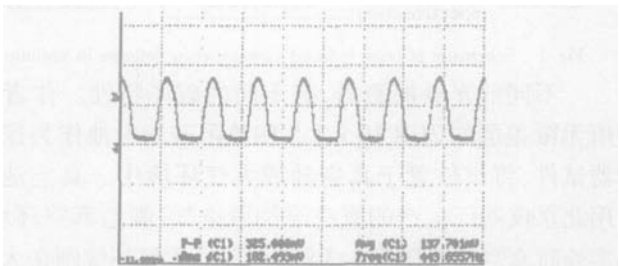


Fig 6 The open circuit voltage waveform after damage of the first spot in vacuum

后开路电压的输出波形。从图中可以看出,发生点损伤后,开路电压的平均值和峰峰值只有少量下降(10mV 左右),对交替信号的响应没有明显变化。因而对硅光电池而言,小面积点损伤对探测器工作能力的影响很小。硅光电池产生这种破坏特性的原因是,PV 型探测器受激光辐照后,其 p-n 结处温升达到熔点,p-n 结退化为电阻^[11]。虽然破坏点不能继续输出

光生电动势,但工作回路并未被破坏。

3.3.2 大气中 激光破坏光电池不同点时,分别探测出单个点的破坏面积,并将破坏点的破坏面积累积,观

察总破坏面积增加时输出开路电压的变化情况,如表 2 所示。

图 7 和图 8 显示了对硅光电池多点打击后开路电

Table 2 Influence of the damage area on the Si battery in the atmosphere

number	original state	1	2	3	4	5	6	7
single point damaged area/cm ²	0	0.0103	0.0096	0.0106	0.0121	0.0155	0.0117	0.0116
total damaged proportion/%	0	4.09	7.9	12.1	16.9	23.06	27.7	32.3
mean open circuit voltage/mV	231.05	205	136	98.5	81	64.9	64	5

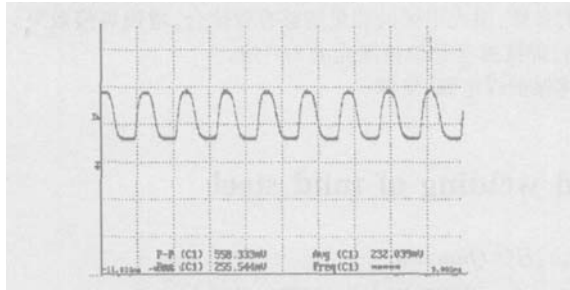


Fig 7 The waveform of the detector undamaged

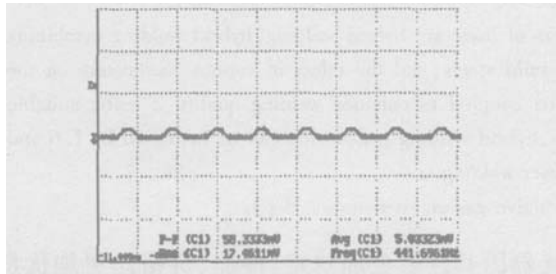


Fig 8 The waveform of the detector with 32.3% damage area

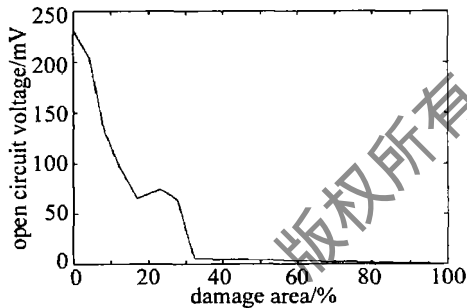


Fig 9 The damage area influence on the output voltage

压的输出情况,与初始状态相比,开路电压近乎为 0,波形已严重失真。图 9 中给出了开路电压随破坏面积的变化情况。如图所示,开路电压与破坏面积并不是线型关系,破坏面积在 30% 左右有一段平缓区,之后开路电压急剧下降。当破坏总面积达到探测器工作面积的 32.3% 时,光电池的开路电压峰值和平均值分别降到了 58mV, 5mV, 光电池已几乎完全失去工作能力。说明硅光电池并不需要损坏其全部光敏表面,就可使其失去工作能力。

4 结 论

真空状态中热对流、传导效应的减弱或丧失,使得光电探测器的破坏阈值显著低于相同条件大气环境状态下阈值,探测器在真空中比大气中更容易破坏,其实际破坏阈值约为大气中的 40%。

因真空中氧气密度极低,致使真空和大气环境下激光辐照产生的热量积累后导致的损伤形态也有所不同。在相同破坏条件下,真空中的破坏点面积明显小于大气环境状态,并且破坏形貌很干净。对于光伏型探测器,使其失去工作能力,并不需要损伤其全部光敏面。阈值降低和损伤形态差异是由真空度差异导致的结果,故对于其它类型光电探测器也应该是适用的。

参 考 文 献

- [1] JIANG Zh P, LU Q Sh, LU Z J Effects in strong laser irradiated detectors [J]. Applied Laser, 1994, 14(3): 109~ 110(in Chinese).
- [2] GAO Zh Sh, CHEN J B. Enter into to the measurement of laser induced damage optical surface [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 185~ 188(in Chinese).
- [3] ZHOU W J, YUAN Y H, ZHANG D Y *et al* Research on damage of TD₂/SD₂ film induced by 1.06μm CW laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 76~ 81(in Chinese).
- [4] MA F J, TIAN Y W, HE F *et al* Ultra short pulse laser induced damage in transparent materials [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 507~ 510(in Chinese).
- [5] WANG Sh Y, FU Y Y, GUO J Evaluation of high energy laser effecting on remote distance photoelectron sensor system [J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 28~ 30(in Chinese).
- [6] KE Ch J, WAN Ch Y. Analysis of laser damage on infrared detectors [J]. Optical Technique, 2002, 28(2): 118~ 120(in Chinese).
- [7] BURNHAM A K, BUNKELM J, DEMOS S G *et al* Effect of vacuum on the occurrence of UV- induced surface photoluminescence, transmission loss and catastrophic surface damage [J]. SPIE, 2000, 4134: 243~ 252
- [8] CHEN D Zh, ZHANG Ch Q, QING G B *et al* Research on laser damage threshold of photoelectric detector [J]. Laser Technology, 1995, 19(3): 135~ 140(in Chinese).
- [9] BECKER J, BERNHARDT A. ISO 11254 an international standard for the determination of the laser induced damage threshold [J]. SPIE, 1995, 2114: 703~ 713.
- [10] CHEN J B, LU Q Sh, SHU B H *et al* Damage effect of CW CO₂ laser on PV type InSb detector [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 47~ 49(in Chinese).