

文章编号 1004-924X(2016)增-0050-07

## 强脉冲激光作用下碲镉汞光伏探测器的反常行为

徐作冬, 张检民\*, 林新伟, 邵碧波, 师宇斌, 李云鹏

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了研究强脉冲激光辐照下光伏型探测器的响应行为, 利用室温下零偏压工作的短波红外光伏型碲镉汞单元探测器开展了实验研究。使用调制频率为 1 000 Hz 的 2.0  $\mu\text{m}$  光纤激光作为探测器正常工作时探测的信号光, 以不同能量的 2  $\mu\text{m}$  波段脉冲激光作用于工作状态的探测器。实验结果显示, 当入射到探测器光敏面的脉冲激光能量密度达到 0.1  $\text{J}/\text{cm}^2$  量级时, 在脉冲激光辐照结束后的短时间内, 探测器对信号光的响应幅值出现暂时的降低, 降低程度与激光强度正相关, 最高可达 100%; 这种现象被称作信号压制效应; 同时, 探测器响应波形的基线从零降低为负值, 基线降低幅度与激光强度正相关, 随后探测器对信号光的响应幅值以及响应波形的基线在 10~100 ms 量级的时间内逐渐恢复到辐照前水平, 这种现象被称作负基线现象。理论分析和实验测量表明, 信号压制效应是由于脉冲激光引起的光敏区域温度升高所导致; 而负基线现象与探测器结构和热效应相关, 具体产生机理则有待进一步研究。

**关键词:** 激光辐照效应; 脉冲激光; HgCdTe; 光伏探测器; 反常行为; 信号压制效应; 负基线

**中图分类号:** TN215; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0050

## Abnormal behaviors of photovoltaic HgCdTe detectors under intense pulse laser

XU Zuo-dong, ZHANG Jian-min\*, LIN Xin-wei, SHAO Bi-bo, SHI Yu-bin, LI Yun-peng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest  
Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangjianmin@nint.ac.cn

**Abstract:** The response behavior of photovoltaic detector under the laser irradiation with high-fluence pulse was researched experimentally, by using a short-wave infrared photovoltaic HgCdTe single-element detector with zero bias voltage under room temperature. Taking a 2.0  $\mu\text{m}$  fiber laser with modulation frequency of 1000 Hz as the signal light in normal working state, the detector was interacted with 2  $\mu\text{m}$  wave-band pulsed laser of different energies. Experimental results indicate that when the pulsed laser energy density on the photosensitive surface of detector reaches 0.1  $\text{J}/\text{cm}^2$ , detector has two abnormal response behaviors named after signal suppression and negative baseline respectively. In the short time after pulsed laser irradiation ends, response amplitude to signal light decreases temporarily and the decrease degree with the maximum value of 100% is positively related to laser intensity. At the same time, the base line of detector response waveform decreases from zero to negative value and the decrease amplitude is positively related to laser intensity. Then, the response amplitude of de-

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-03.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM1401); 西北核技术研究所所长线预研基金资助项目 (No. 12111502)

detector to signal light and baseline of response waveform gradually recover to the level before irradiation within 10 ms to 100 ms. The signal suppression effect is caused by the temperature increase in photosensitive area, and the negative baseline is correlated with thermal effect and structure of the detector.

**Key words:** laser irradiation effect; pulsed laser; HgCdTe; photovoltaic detector; abnormal behavior; signal suppression effect; negative baseline

## 1 引言

碲镉汞( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ )材料因其禁带宽度可随镉元素组分  $x$  连续变化,而整个红外波段得到了非常广泛的应用。但是同其它很多半导体材料制成的光电探测器一样,碲镉汞探测器在较强的人射光作用下很容易出现非线性响应行为。在这一领域人们已经开展了很多研究<sup>[1-4]</sup>。基于半导体材料 pn 结光伏效应的光伏型单元探测器是一类非常重要的探测器,也是目前主流红外焦平面光子探测器的基本结构类型。所以光伏探测器的激光辐照效应研究一直备受关注。

在连续激光辐照方面,江厚满等人<sup>[5]</sup>在前人研究基础上,提出一个适用性更广的解析模型以描述光伏效应,能够解释 p-on-n 型探测器的信号饱和效应,但是未涉及脉冲强光作用下的瞬态效应。程湘爱与马丽芹等人<sup>[6-7]</sup>对连续光辐照下探测器的电压输出信号随激光功率密度的增大而下降、直到零压输出的现象进行了理论和数值的分析。江天等人<sup>[8-9]</sup>研究了碲镉汞光伏探测器在连续激光辐照下的非线性响应机理,分析认为“零压”现象的产生原因是温度升高导致 pn 结内建电场大幅减弱,而“双耳”现象的主要机理为热效应引起本征载流子浓度增大而导致暗电流增大。

在脉冲激光辐照方面,R. Allen 等人<sup>[10]</sup>测量了长波红外碲镉汞探测器在不同偏压条件下对辐照时间为 2 ms 的 10.6  $\mu\text{m}$  激光的响应波形,发现正负偏压状态下的探测器响应波形呈现出不同特点,表现为热效应,并且从探测器电压信号波形看出热恢复过程存在两个不同量级的时间常数。罗福等人<sup>[11]</sup>实验观测到在脉宽为 60 fs 的 800 nm 激光辐照后,硅 PIN 光电二极管出现 100  $\mu\text{s}$  量级的饱和时间,并且对信号光的响应在短时间内无规则变化,在长时间内随激光强度的增大而降低,该现象无法使用现有模型进行解释。豆贤安等人<sup>[12-13]</sup>研究了硅 PIN 与 InGaAs PIN 光电二

极管对不同能量飞秒激光的瞬态响应特性,提出决定响应信号持续时间和波形展宽特征的主要因素为载流子双极扩散速度和高注入载流子引起的空间电荷屏蔽效应。崔昊杨等人<sup>[14-15]</sup>研究了金属电极与半导体界面的肖特基势垒对探测器脉冲光响应特性的影响。胡伟等人<sup>[16]</sup>实验中发现 In-GaAs PIN 管在脉宽为 20 ps 的 1 064 nm 激光辐照下,当激光能量位于一定范围时,探测器响应波形在正常响应之后出现明显的负响应。该现象的产生原因是二极管表现出了电感特性。

在激光作用时间介于 ps 与 ms 之间的情况下,探测器对连续光信号或低频光信号的响应特性将如何变化是需要继续研究的问题。另外,未见报道将脉冲激光作为干扰源,研究它对碲镉汞探测器正常工作状态的影响。因此,光伏型探测器在脉冲激光作用下的响应特性还有待进一步研究。本文以一种室温下零偏状态工作于短波红外波段的碲镉汞光伏型单元探测器为作用对象,开展了脉冲激光辐照效应的实验研究。实验发现当激光辐照达到一定强度时,探测器出现一些暂时性的反常行为,具体表现为对信号光的响应减弱、波形的基线降低为负值,随后二者都逐渐恢复到辐照前水平;而且响应与基线的降低程度以及恢复时间均随激光强度的增加而增大。通过分析光敏区域温度升高对探测器量子效率的影响,认为脉冲激光引起的光敏元温升可导致光伏探测器的电压响应出现短时间的降低。

## 2 实验对象与方法

### 2.1 碲镉汞光伏探测器

本文使用的光伏型单元 HgCdTe 探测器由上海技术物理研究所提供,为前照式平面结型。p 型掺杂的光敏材料厚度约为 110  $\mu\text{m}$ ,通过离子注入方式得到 n-on-p 结构,n 型层厚度约为 10  $\mu\text{m}$ 。光敏元直径为 1.0 mm,被环形的负电极所包围,正负电极分别从光敏元两侧引出到器件管座上对

应的管脚。探测器工作于室温、零偏压状态下。器件的光谱响应波段约为  $0.8\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 。

## 2.2 脉冲激光辐照实验

按照图 1 建立实验系统,以研究脉冲激光对光伏型碲镉汞单元探测器响应行为的影响。短波红外波段激光器作为辐照光源,单脉冲方式进行辐照,其脉冲宽度约为  $100\ \text{ns}$ (FWHM),脉冲波形如图 2 所示。辐照激光穿过 ZnSe 分束片后,经  $\text{CaF}_2$  透镜聚焦,入射到探测器的光敏面上。通过中性密度衰减片调节光敏面上入射的激光能量在  $0.1\ \text{nJ}\sim 10\ \text{mJ}$  变化,并利用分束片和激光能量计进行辐照能量监测。使用斩波器对一束  $2.0\ \mu\text{m}$  连续波光纤激光进行调制,获得重复频率约为  $1\ 000\ \text{Hz}$  的重频脉冲光,其光束覆盖探测器的光敏面,作为实验样品正常探测的信号光。

实验中探测器工作于室温下,其输出的开路电压信号经过前置放大器进行适度放大(25 倍)后由数字示波器进行采集并记录。由于探测器对强脉冲光的响应高于对信号光的响应,将示波器设置为脉冲上升沿触发,且触发阈值高于探测器对信号光的响应电压值。观察脉冲激光辐照前后探测器对信号光响应(开路电压)的变化。

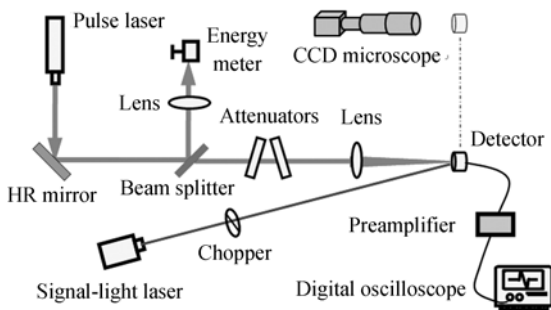


图 1 脉冲激光辐照实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of pulse laser irradiation experiment system

由于辐照激光是单脉冲光,且不可见,所以样品的精确定位比较困难。这里采取了利用 CCD 显微镜和精密电控位移台实现的一种准原位实验方法,兼具光斑测量与样品定位的功能。首先,通过烧蚀法在相纸上获得聚焦光斑图像,再利用位移台将相纸平移至 CCD 显微镜下,调节显微镜位置使烧蚀光斑成像清晰,然后保持显微镜不动,将相纸替换为辐照样品,调节样品位置,使其光敏面在显微镜下成像清晰并且同烧蚀光斑中心重合。最后,利用位移台将样品平移至辐照光路上,此时

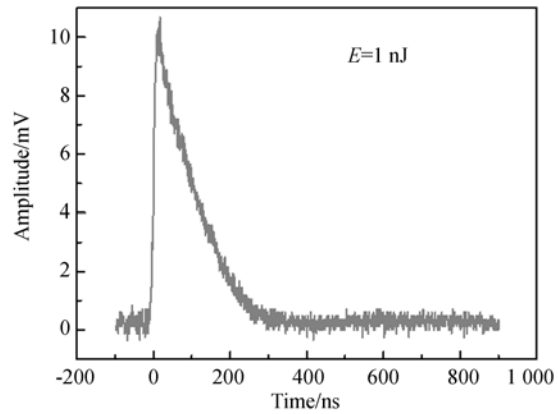


图 2 脉冲激光信号波形

Fig. 2 Signal waveform of pulse laser

探测器光敏面将位于聚焦光斑处。而光斑尺寸可利用此前显微镜下的烧蚀光斑图像测量得到。通过此种方法测得辐照光斑直径约为  $1.42\ \text{mm}$ 。因激光脉冲宽度远小于实验室现有的红外光束分析仪的积分时间,且光束分析仪不具备外触发成像模式,所以未能通过光束分析仪获取光斑尺寸。

## 3 探测器的反常行为及其机理分析

### 3.1 探测器响应波形

实验中逐渐增大脉冲激光对探测器的辐照能量,当探测器光敏面上的激光能量密度增大到  $0.1\ \text{J}/\text{cm}^2$  量级时,探测器工作信号幅值开始出现暂时的降低,降低程度与激光能量正相关,之后探测器信号幅值逐渐恢复到辐照前水平。当能量密度增大到约  $1.3\ \text{J}/\text{cm}^2$  后,信号幅值将会在短时间内( $\sim 1\ \text{ms}$ )减弱为零。另一方面,信号基线水平也在脉冲激光辐照后降低,由辐照前的零基线降低为负基线,降低程度也随着激光能量的增大而增加,之后基线逐渐恢复。本文将强脉冲激光辐照后探测器输出电压波形的上述两个特征分别称为信号压制效应和负基线现象。图 3 展示了两幅典型的探测器电压波形。

### 3.2 信号压制效应

信号压制效应(信号响应降低现象)表现为:

(1) 强脉冲激光作用后,探测器对信号光的响应幅值瞬间减小,然后逐渐增大并恢复到辐照前水平。

(2) 对信号光响应的减小程度随激光能量的增加而增大,如图 4 所示(数据取自辐照后  $1\ \text{ms}$

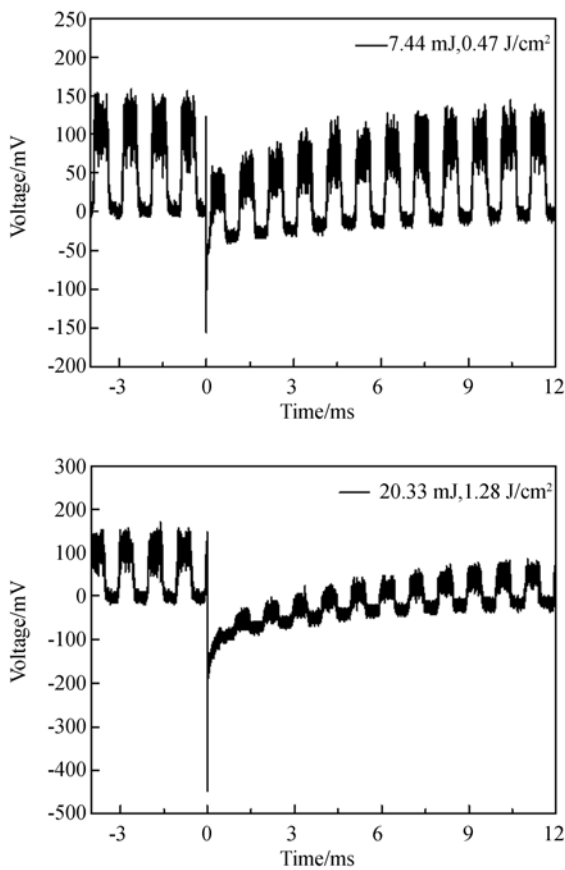


图 3 强脉冲激光辐照下典型的探测器输出电压波形  
Fig. 3 Typical open-circuit voltage waveforms of detector's output under intense pulse laser

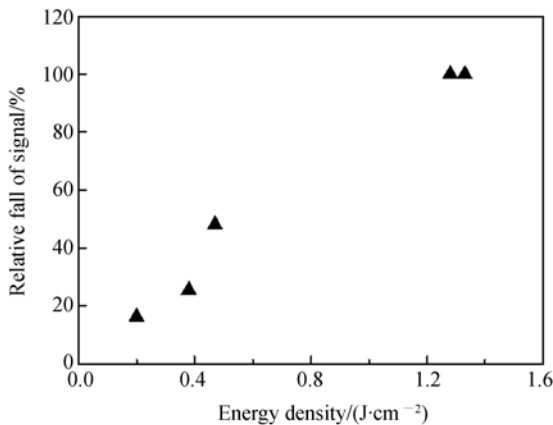


图 4 信号幅值降低程度与能量密度的关系  
Fig. 4 Reduction of signal amplitude vs. laser energy density

时的波形)。当入射到光敏面的激光能量密度达到约  $1.3 \text{ J/cm}^2$  时,探测器对信号光的响应幅值减小到零,即探测器在脉冲激光辐照后 1 ms 的时

间内彻底不能正常工作。

(3)信号幅值的完全恢复时间为 10 ms 量级至 100 ms 量级以上,与辐照激光的强度呈现正相关。在脉冲激光能量密度为  $0.47 \text{ J/cm}^2$  时,作用后 1 ms 时信号幅值减小程度约为 48%;而当激光能量密度达到  $1.28 \text{ J/cm}^2$  时,脉冲激光作用后 1 ms 内信号幅值减小程度为 100%,而且信号幅值恢复到辐照前 50% 水平所需时间达到约 7 ms。

### 3.3 负基线现象

负基线现象特点为:(1)强脉冲激光作用后,探测器输出电压波形的基线瞬间从零降为负值,随后基线逐渐升高并恢复到辐照前水平;(2)基线降低的幅度随激光能量的增加而增大,如图 5 所示(图中数据同样取自脉冲激光辐照后 1 ms 时的波形);(3)基线恢复时间为 10 ms 量级至 100 ms 量级以上,取决于辐照激光的强度,呈现正相关。当激光能量密度为  $0.47 \text{ J/cm}^2$  时,基线恢复时间约为 20 ms。而当激光能量密度达到  $1.28 \text{ J/cm}^2$  时,在测量时间(41.7 ms)内基线尚未完全恢复到辐照前水平,估计完全恢复时间接近 100 ms。

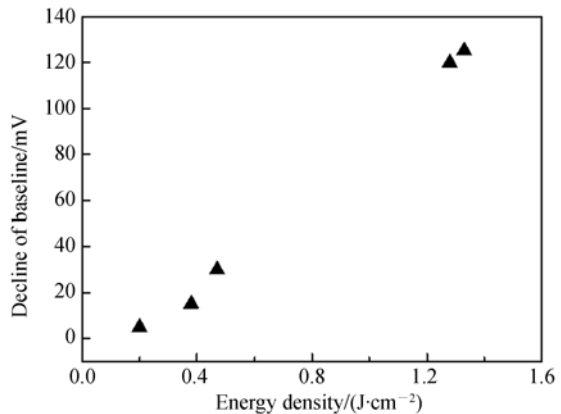


图 5 基线降低程度与能量密度的关系  
Fig. 5 Decline of baseline vs. laser energy density

### 3.4 产生机理分析

HgCdTe 光伏探测器在较高功率连续激光辐照下输出信号将会降低甚至接近为零,此即“零压”输出现象。关于这一现象的解释,文献[6]认为在激光辐照时光敏材料中产生大量光生载流子,导致出现半导体-金属的电相变,从而伴随出现光生电压的降低、消失;当激光辐照结束后,光生载流子浓度急剧下降,此时出现金属-半导体的

电相变,探测器恢复到正常状态。然而,这种理论并不能解释在脉冲光辐照情况下,光脉冲结束后 ms 量级时间尺度上出现的探测器输出信号降低现象。文献[7-8]认为连续激光辐照情况下的“零压”现象产生机制主要是激光的热效应,过量的入射光子使材料晶格温度升高,导致 pn 结的内建电场减弱。

在脉冲光辐照下,探测器光敏材料价带电子吸收光子能量后被激发到导带,随后很快弛豫到导带底,多余能量通过电子-声子耦合作用传递给晶格,使晶格温度升高。之后在大约为少数寿命的时间内(0.1~1  $\mu$ s 量级),光生载流子的浓度迅速减小到零。但是晶格的热恢复将持续较长时间,尤其在强脉冲激光辐照下,光敏区域材料的降温过程将会比较缓慢(可大于 ms 量级)。

关于强脉冲激光作用下探测器对信号光的响应降低现象,由其信号特征可将产生原因初步归结为激光辐照的热效应。对一个未经脉冲激光辐照的样品进行相同功率密度 50 Hz 调制信号光辐照条件下的饱和和开路电压测量,得到探测器开路电压随温度变化的曲线,如图 6 所示。结果充分显示出探测器电压响应随温度升高而降低的特性。

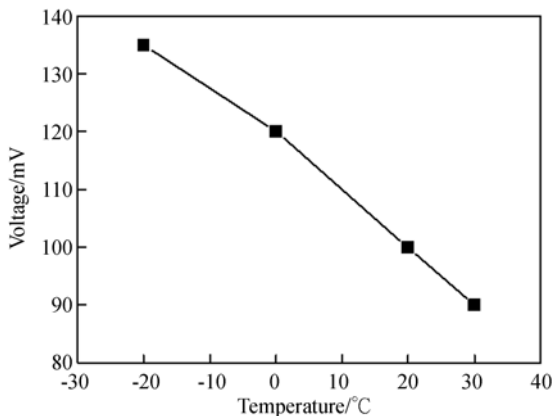


图 6 探测器饱和和开路电压随温度变化的曲线

Fig. 6 Saturating open-circuit voltage vs. temperature

导致探测器响应度随温度下降的因素有两个:一是入射光子被材料吸收转化为非平衡载流子的效率,二是光生非平衡载流子形成光电流的效率。

前者主要受限于光子吸收系数,对于组分较大的 HgCdTe 材料,随着温度升高,吸收系数下降,即吸收路程变长,对于前照式探测器(如实验

样品),这意味着入射光子在 p-n 结附近一个少数扩散长度内被吸收转化为光生载流子的几率降低,因此,探测器对入射光子进行有效吸收的能力下降,宏观上表现为响应率降低。随着温度升高,材料禁带宽度增大,导致相同光子能量条件下可供价带电子跃迁至导带的能级数变少,所以入射光子被吸收转化为光生载流子的几率随之降低。

后者主要取决于非平衡少数扩散、漂移与复合过程的竞争。随着温度升高,载流子迁移率降低,影响其运动到结区以及被内建电场分离形成光电流过程的少数扩散速度和漂移速度都会下降;同时,少数寿命随温度的升高而降低,复合率增大,因此,光生载流子形成光电流的效率大大下降。综合上述两方面原因,由于强脉冲激光的加热,探测器的内量子效率会迅速降低,导致对工作信号激光的响应率明显降低,从而出现信号压制效应。光敏元温度足够高时,材料的本征激发可能导致 PN 结本征化失效,信号电压为零。

目前,现有理论均无法解释强脉冲激光作用下的负基线现象。文献[13-14]报道了碲镉汞阵列光伏探测器对响应波段内 30 ps 激光辐照的光响应信号之前先出现一个负响应,分析认为该现象的产生原因归结于 p 区电极的肖特基接触特性。本文的负基线现象出现在脉冲光响应之后,不能用电极的肖特基接触特性来解释。另外,基线降低之后是一个单调上升的恢复过程,不同于文献[15]中报道的具有振荡特征的基线变化。所以,对于负基线现象还需要做进一步研究。

## 4 结 论

本文以室温下零偏压工作的碲镉汞光伏型单元探测器为作用对象,以调制频率为 1 000 Hz 的激光信号作为探测器正常工作时探测的信号光,以探测器响应波段内的短波红外脉冲激光作为干扰源,实验研究了脉宽 100 ns 的强脉冲激光辐照下探测器的响应特性。实验结果显示:当入射到光敏面的脉冲激光能量密度达到 0.1 J/cm<sup>2</sup> 量级时,探测器对信号光的开路电压响应幅值立即出现降低;当激光能量密度达到 1.3 J/cm<sup>2</sup> 左右时,信号响应幅值的降低程度可达 100%;随后响应幅值在 10 ms 至 100 ms 量级的时间内逐渐恢复到辐照前水平,响应降低程度与响应恢复时间均

随着激光能量的增加而增大。同时,探测器响应波形的基线也在强脉冲激光辐照后立即降低,由辐照前的零基线变为负基线,随后基线缓慢恢复,基线降低程度与恢复时间均随着激光能量的增加而增大。本文将上述现象称为信号压制效应与负基线现象。

#### 参考文献:

- [1] 王思雯,郭立红,赵帅,等. 高功率 CO<sub>2</sub> 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程, 2010,18(3): 798-804.  
WANG S W, GUO L H, ZHAO SH, *et al.*. Experiments of high-power CO<sub>2</sub> laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 798-804. (in Chinese)
- [2] 邱伟成,王睿,许中杰,等. PV 型 HgCdTe 线阵探测器的光学串扰[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2325-2330.  
QIU W CH, WANG R, XU ZH J, *et al.*. Optical crosstalk of HgCdTe PV linear array detector [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2012, 24(10): 2325-2330. (in Chinese)
- [3] 张检民,冯国斌,杨鹏翎,等. 碲镉汞光导探测器在中红外激光测量中的热问题[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 22-30.  
ZHANG J M, FENG G B, YANG P L, *et al.*. Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 22-30. (in Chinese)
- [4] CAO G, QIU H, HUANG Y, *et al.*. Study on the limit of linear response of MCT photodiode [C]. SPIE, 2005, 5460: 671-679.
- [5] 江厚满,程湘爱. 描述光伏效应的新解析模型[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 177-180.  
JIANG H M, CHENG X A. New analytic model describing photovoltaic effect [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2002, 14(2): 177-180. (in Chinese)
- [6] 程湘爱,陆启生,马丽芹,等. 1.319 μm 连续波激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 622-626.  
CHENG X A, LU Q SH, MA L Q, *et al.*. Experimental study of HgCdTe(PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 622-626. (in Chinese)
- [7] 马丽芹,陆启生,鞠博. 光伏型光电探测器的激光软损伤机制[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 917-921.  
MA L Q, LU Q SH, JU B. Mechanism of soft-damage in photovoltaic detectors under laser irradiation [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2006, 18(6): 917-921. (in Chinese)
- [8] 江天,程湘爱,郑鑫,等. 光伏碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的非线性响应机理研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 137302.  
JIANG T, CHENG X A, ZHENG X, *et al.*. Investigation of the nonlinear response mechanism of photovoltaic HgCdTe detector irradiated by CW band-in laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(13): 137302. (in Chinese)
- [9] 江天,程湘爱,许中杰,等. 光伏型碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的两种不同过饱和现象的产生机理[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 097303-1-10.  
JIANG T, CHENG X A, XU ZH J, *et al.*. Generation mechanism of two different over-saturation phenomena of photovoltaic HgCdTe detectors irradiated by CW band-in laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(9): 097303-1-10. (in Chinese)
- [10] ALLEN R, ESTEROWITZ L, KRUEER M, *et al.*. Experimental study of laser induced temporary degradation in photovoltaic PbSnTe and HgCdTe diodes [J]. *Infrared Physics*, 1975, 15(4): 265-269.
- [11] 罗福,江继军,孙承纬. 硅光电二极管激光损伤阈值随激光脉宽的变化[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 685-688.  
LF, JIANG J J, SUN CH W. Variation in damage thresholds of Si photodiodes with laser pulse duration [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(6): 685-688. (in Chinese)
- [12] 豆贤安,孙晓泉,汪作来. 飞秒激光诱发硅 PIN 光

电二极管饱和特性的实验研究[J]. 量子电子学报, 2012, 29(6): 671-676.

DOU X A, SUN X Q, WANG Z L. Experimental research on saturation characteristic of silicon p-i-n photodiode induced by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(6): 671-676. (in Chinese)

- [13] 胡伟, 豆贤安, 孙晓泉. 强光照射下的 InGaAs 二极管内部光生载流子分析[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0625001.

HU W, DOU X A, SUN X Q. The analysis of the photo-carriers of the InGaAs p-i-n photodiode response to the high optical injection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0625001. (in Chinese)

- [14] 崔昊杨, 李志锋, 马法君, 等. 皮秒脉冲激光照射下碲镉汞光伏红外探测器的负光伏响应新现象[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 161-164.

CUI H Y, LI ZH F, MA F J, *et al.*. Negative photovoltaic-response in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser [J]. *Journal of Infrared Millim. Waves*, 2009, 28(3): 161-164. (in Chinese)

- [15] CUI H Y, ZENG J D, YANG J J, *et al.*. Dependence of transient photovoltage characteristics on bias light intensity for HgCdTe-based photovoltaic infrared detector pixel arrays [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2014, 46: 1359-1364.

- [16] 胡伟, 孙晓泉, 豆贤安. 锁模激光照射下 InGaAs p-i-n 管的负电压响应机理[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 36-40.

HU W, SUN X Q, DOU X A. Analysis of negative voltage-response in the InGaAs p-i-n photodiode under mode-locked laser illumination [J]. *Journal of Infrared Millim. Waves*, 2015, 34(1): 36-40. (in Chinese)

#### 作者简介:



徐作冬 (1982—), 男, 安徽淮南人, 硕士, 高级工程师, 2005 年、2008 年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: xuzuodong@nint. ac. cn

#### 通讯作者:



张检民 (1982—), 男, 湖南祁阳人, 博士研究生, 副研究员, 2003 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2006 年于西北核技术研究所获得硕士学位, 主要从事激光辐照效应及强激光参数测试方面的研究。E-mail: zhangjianmin@nint. ac. cn