

文章编号 1004-924X(2016)增-0272-08

脉冲激光辐照所致线阵碲镉汞焦平面 器件信号的整体跃变现象

张检民^{1*}, 徐作冬¹, 冯国斌¹, 林新伟¹, 李辉², 张震¹, 赵军¹

(1. 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;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海200083)

摘要:为研究带有电容反馈跨阻放大器(CTIA)读出电路的线阵碲镉汞焦平面阵列器件在强脉冲激光作用下的响应特性,使用100 ns脉宽的2 μm 波段红外激光开展了单脉冲辐照效应实验,发现了脉冲激光诱导的焦平面阵列输出信号整体跃变现象,即较强脉冲光辐照后,线阵器件中所有像素的输出信号出现幅度近似一致的上升。对信号跃变实验规律进行了分析,结果表明,信号整体跃变出现阈值约为1 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,信号跃变量随辐照光强单调上升,但在100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 左右呈现饱和趋势。对该现象的产生机理进行了分析,排除了光学串扰、电学串扰、热累积效应等因素的影响,得出信号跃变的主要原因在于:强光作用后,供电电路上的耦合电容因为快速放电而出现瞬时压降,导致通过公共P端电极连接的光敏二极管工作状态由零偏转变为反偏。

关键词:激光辐照效应;脉冲激光;碲镉汞;焦平面阵列;响应特性;信号整体跃变

中图分类号: TN215; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0272

Overall signal transition of linear HgCdTe focal plane array device induced by pulsed laser

ZHANG Jian-min^{1*}, XU Zuo-dong¹, FENG Guo-bin¹, LIN Xin-wei¹,
LI Hui², ZHANG Zhen¹, ZHAO Jun¹

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

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

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

Abstract: In order to investigate the response characteristics of linear HgCdTe focal plane device with Capacitive Feedback Transimpedance Amplifier (CTIA) readout circuit under intense laser irradiation, single shot irradiating experiments were performed by using a 2 μm waveband pulsed infrared laser with a pulse duration of about 100 ns. The pulsed laser induces a new phenomenon of overall signal transition, in which the output signals of all pixels of the linear device have an approximately same increment after irradiated by a relatively intense laser pulse. The rules of the overall signal transition

收稿日期:2016-05-18;修订日期:2016-06-12.

基金项目:西北核技术研究所所长线预研基金资助项目(No. 12111502);激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1503)

were summarized and it demonstrates that the overall transition occurs at a laser intensity of approximately $1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ and get saturated at about $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, during this period, the transition increases with the increase of the irradiation intensity. Influence factors such as optical crosstalk, electric crosstalk, and thermal accumulation were analyzed and excluded. Further investigation indicates that the overall signal transition is primarily attribute to the voltage drop of the couple capacitor caused by rapid discharge during intense laser irradiating in the power supply circuit, thus resulting in a transformation of operational state of all the photosensitive diodes from zero-bias to reverse-bias, which are connected by a common P-region electrode on surface of the chip.

Key words: laser irradiation effect; pulsed laser; HgCdTe; focal planed array; response characteristics; overall signal transition

1 引 言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)被大量应用于军事侦察、天文观测、医学诊断、安防监控等国防与民用领域^[1],目前技术最成熟、应用最广泛的为片上集成了读出电路(Read Out Integrated Circuit, ROIC)的第二代器件。碲镉汞(HgCdTe 或 MCT)焦平面阵列,因材料禁带宽度可随组分连续变化,响应波段可覆盖整个红外波段^[2],所以是目前最为常见红外焦平面器件之一。

光电器件灵敏度高、结构精细,易受外界强光的干扰或破坏。自 20 世纪 70 年代以来,国内外诸多学者开展了 MCT 单元探测器在波段内外激光作用下的干扰、破坏效应或响应特性研究^[3-7],但有关 MCT FPA 器件或系统激光辐照效应的公开报道较少,且主要集中在近十年。2007 年,Dimmeler 等人^[8]针对光电对抗需求开展了面阵相机的连续波与高重频 DF 激光干扰效应研究,给出了饱和区尺寸与光强的关系式。2011 年,Durécu 等人^[9]提出了面阵器件的光晕现象量化评价方法,并分析了空间、时间与能量特征对图像干扰效果的影响。2012 年,聂劲松等模拟分析了 $10.6 \mu\text{m}$ 激光作用下面阵器件的热损伤与应力损伤^[10],随后实验发现了弥散斑与暗环现象,并从热载流子扩散与收集效率方面分析了该现象的产生机理^[11]。2014 年,王毕艺^[12]实验分析了面阵器件饱和干扰阈值的光谱相关性。

焦平面阵列器件按结构形式可以分为线阵和面阵两类。两者的阵列规模不同,光电转换芯片结构一致,光电转换芯片与片上读出电路的连接

方式相同或相似,所以两者的激光干扰效应可能存在较大的相似性。使用线阵器件作为实验样品,可大幅降低实验成本。2008 年至 2012 年,国防科技大学刘璞^[13]与邱伟成^[14]先后开展了连续激光与超短脉冲激光对同厂家相似线阵碲镉汞焦平面器件的辐照效应研究。前者报道了连续激光辐照所致的输出信号饱和、饱和凹陷、饱和凹陷回升现象,以及飞秒脉冲激光作用下的平区、平区周期以及信号残留现象;后者更深入地研究了上述效应,发现了连续激光所致基底信号整体先降后升的反常现象^[15],进一步开展了 100 fs、25 ps 与 60 ps 近红外与短波红外脉冲激光辐照实验^[14],更详细地解释了信号残留(续扰)效应的机理。

本文使用 100 ns 短波红外脉冲激光对类似线阵焦平面阵列进行辐照效应研究,发现了脉冲激光诱导的输出信号整体跃变现象,即较强激光脉冲作用后,焦平面阵列所有像素的输出信号出现幅度一致的上升。该现象不同于文献^[15]报道的连续激光局部作用时的未辐照像素基底信号的反常响应,也不同于文献^[13-14]报道的脉冲激光作用后出现的与辐照光信号相似的信号残留或续扰。文章在总结信号跃变规律的基础上,分析了产生机理。

2 实验研究对象与方法

2.1 线阵焦平面器件

实验所用线阵碲镉汞焦平面器件由中科院上海技术物理研究所研制,其横截面结构与典型尺寸如图 1 所示。线阵规模为 512×1 ,像元呈品字形排布(见图 2),为背照式 n^+ -on-p 型结构。像元尺寸为 $28 \mu\text{m}$,像元间距为 $56 \mu\text{m}$,响应长波限为

3.2 μm , 响应不均匀性为 8%。每个像元具有独立的 N 端电极, 奇偶两列像元分别使用对称的公共 P 端电极, 以消除几何结构引起的信号差异。读出电路采用电容反馈跨阻放大器(CTIA)与相关双采样(CDS)结合的方式, 信号分奇偶两行输出。

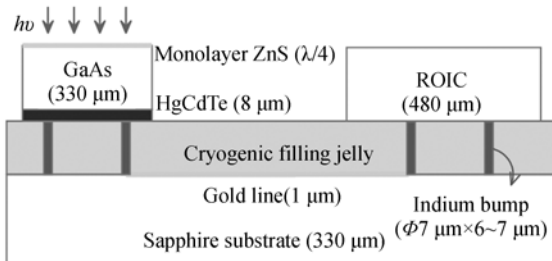


图 1 线阵焦平面阵列横截面

Fig. 1 Transverse cross section view of linear focal plane array

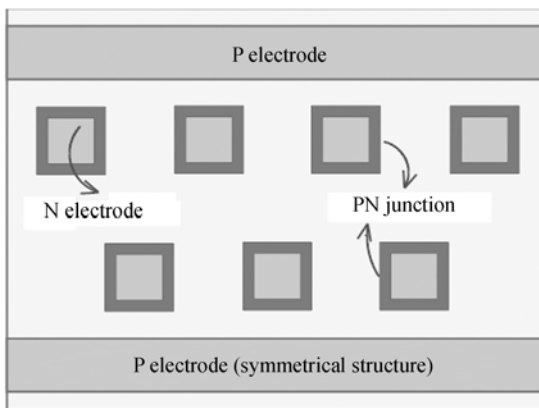


图 2 线阵焦平面阵列的像元平面分布图

Fig. 2 Schematic of pixel distribution of linear focal plane array

2.2 实验装置与方法

实验装置如图 3 所示。辐照光源为 2 μm 波段短波红外脉冲激光, 单脉冲或低重频输出, 脉冲半高宽约为 100 ns。靶面激光强度通过中性衰减片组与格兰棱镜共同调节, 分别实现大倍率阶梯与连续衰减。辐照光经透镜聚焦和 1 mm 狭缝光阑限孔后入射到样品表面。信号光为波段内连续激光, 模拟器件工作状态下的外界红外辐射。焦平面阵列由高精度电源供电, 焦平面驱动采集器由基于 PXI-E 总线的高速数字波形卡和高速同步示波卡组成。前者提供线阵驱动时序, 后者同步采集线阵奇偶行基底电压 V_1 和积分信号电压 V_2 、驱动时序波形、激光脉冲波形等。上位机运

行自编程序, 完成驱动波形编辑、线阵像素数据提取和激光脉冲与线阵工作时序相对位置分析等。

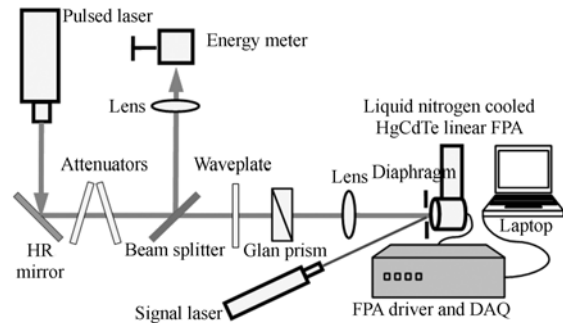


图 3 激光辐照实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of laser irradiating facilities

3 信号整体跃变现象与规律

3.1 输出信号整体跃变现象

实验发现, 以波段内较强脉冲激光辐照线阵焦平面阵列, 紧随辐照帧之后的输出信号(积分信号与基底信号之差, $V_2 - V_1$) 出现整体跃变, 即辐照后相邻帧的输出信号明显高于辐照前帧, 且前后帧的各像素输出信号差值相近。室温下能量密度分别为 155 nJ/cm^2 、1.08 mJ/cm^2 的激光辐照前后线阵焦平面阵列的输出信号特征如图 4 所示, 可见较强激光辐照时, 输出信号整体跃变明显; 而较弱激光辐照时, 无明显跃变现象。

有工作信号光时测得辐照前、中、后三帧光信号如图 5 所示, 图中可更明显地看出脉冲激光辐照所致的输出信号的整体跃变。

独立绘制线阵焦平面阵列偶行像素的基底信号 V_1 与积分信号 V_2 曲线如图 6 所示, 可见输出信号跃变主要体现为积分信号 V_2 的上升, 而基底信号 V_1 未见明显变化。

3.2 输出信号的整体跃变规律

取辐照前后帧中所有像素信号的变化均值为该帧的信号跃变量, 实验获得奇、偶行像素信号的跃变量随辐照光强度的变化趋势如图 7 所示, 可见信号跃变仅在入射激光强度高于一定值(约为 1 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) 之后显现, 并随激光变强而增大, 高能量密度下跃变量呈台阶状上升。第一个台阶期为 20~200 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, 信号跃变量约为 60 mV; 第二个台阶的信号跃变量约为 70 mV。后续实验表明,

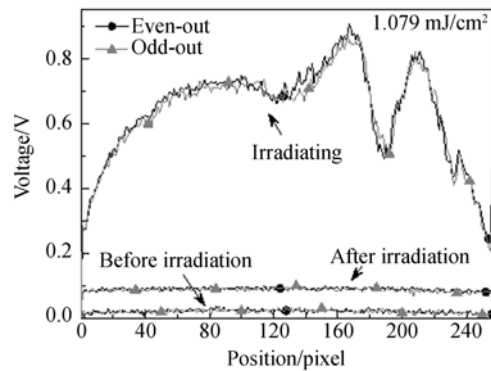
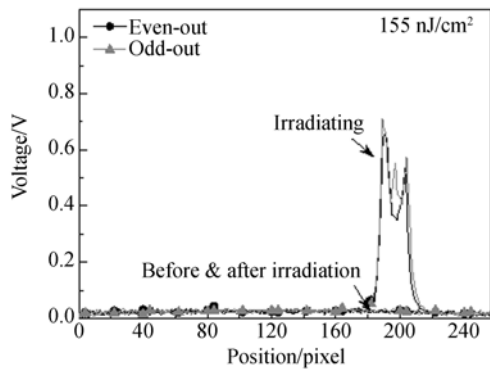


图 4 室温背景下不同强度脉冲激光作用前后线阵碲镉汞焦平面阵列的输出信号

Fig. 4 Output signal vs. pixel position of linear HgCdTe FPA irradiated by variously intense laser at room temperature

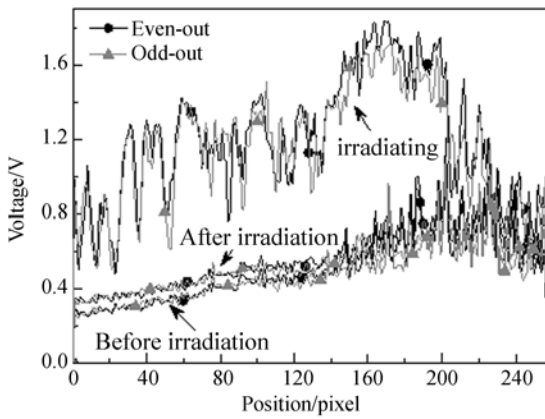


图 5 有信号光时脉冲激光作用前后输出信号

Fig. 5 Output signal around the laser irradiation vs. pixel position with signal laser existing

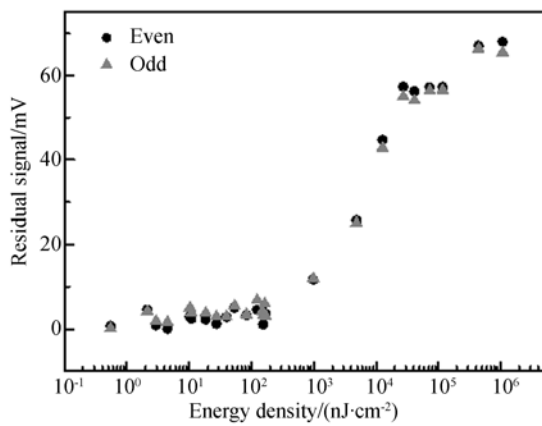


图 7 输出信号跃变量随辐照光强度的变化曲线

Fig. 7 Transition amplitude vs. laser energy density

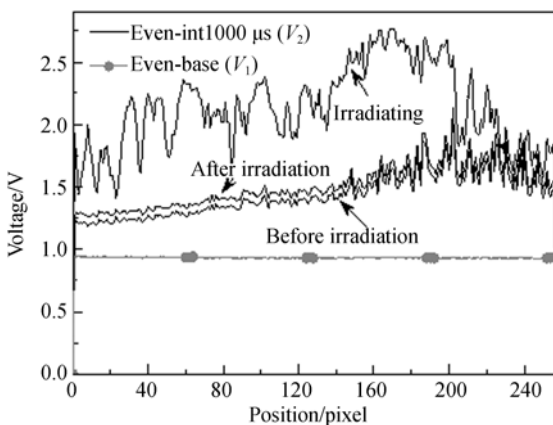


图 6 基底/积分信号跃变特征

Fig. 6 Characteristics of signal transition of baseline and integrating channel

辐照光能量密度继续增大,信号跃变量再次出现小幅上升。

以更大脉冲能量辐照线阵焦平面阵列,以帧积分时间与复位时间之和作为帧间距,得到输出信号的整体跃变量随时间的变化曲线如图 8 所

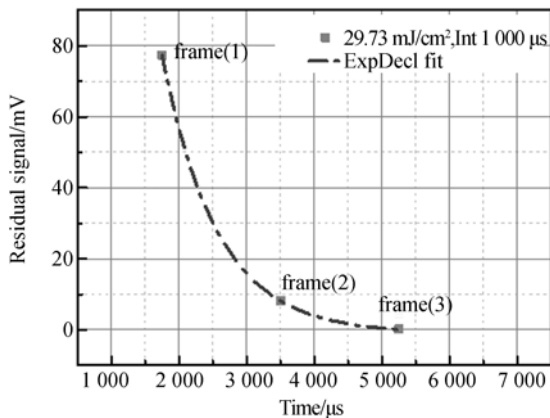


图 8 信号跃变量随时间的衰减曲线

Fig. 8 Decay of signal transition amplitude with time

示。图中定义受辐照帧为 frame(0), 辐照前帧为 frame(-1), 辐照后帧依次编号为 frame(1)、frame(2)、frame(3)。可见信号跃变主要存在于辐照之后的一帧 frame(1)中。对图中曲线进行拟合, 结果表明, 信号整体跃变量的下降过程近似符合指数衰减规律。继续提高激光辐照强度, 直至像元出现损伤, 未观察到辐照后输出信号一直维持高位而无法自行恢复^[14]的闩锁效应^[16]。

4 信号整体跃变机理分析

以弱光作用下线阵焦平面的输出信号为光斑剖面, 多次测量得到光斑的平均直径为 1 325 μm , 覆盖约 24 pixel, 可见入射光斑远小于焦平面几何尺度。同时, 考虑到信号整体跃变发生在光脉冲作用之后, 可排除外部光学结构产生的狭缝衍射光场、多次反射杂光、其他途径杂散光以及像素间电学串扰等多种因素。

若输出信号跃变因热作用引起, 则无论光脉冲是否位于驱动时序的积分域, 均应存在信号跃变。在存在信号光的情况下, 以脉冲激光辐照线阵, 光脉冲落于积分域前段时的激光作用时序和输出信号波形分别如图 9、图 10 所示。可见, 辐照前中后的奇偶行信号波形完全一致。因辐照激光脉冲作用时刻紧邻积分脉冲前沿, 辐照产生的光敏元温升与辐照脉冲作用于积分域内的情形差别极小, 实验证实此时不存在信号跃变, 因此可排除信号跃变机理中的热效应因素。

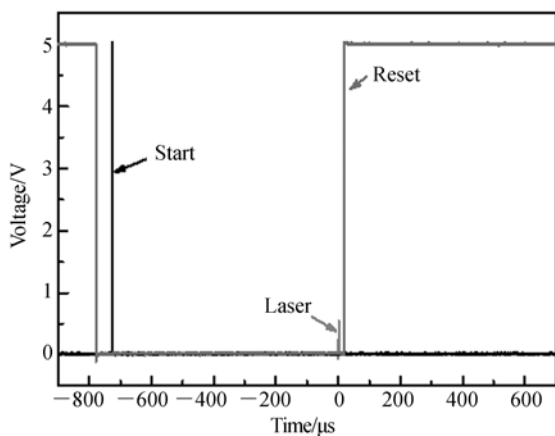


图 9 脉冲激光落于焦平面非积分域时的实测时序
Fig. 9 Timing sequence of irradiating pulsed laser beside integrating region of FPA

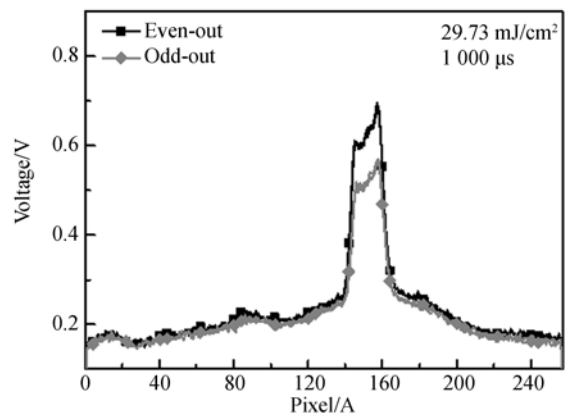


图 10 脉冲激光落于焦平面非积分域时的信号波形
Fig. 10 Signal curve of irradiating pulsed laser beside integrating region of FPA

激光辐照诱导的信号跃变同时存在于受辐照像素与未辐照像素, 且幅度一致, 故有必要从各像元的公共部分去寻找原因。由图 2 所示芯片结构和图 11 所示 CTIA 电路结构可知, 像元前端信号产生与放大环节的公共部分包括光电二极管正向偏置端(P 端电极)和运放参考电压端(相当于 N 端电极)和运放电源端。像元后端读出环节的公共部分主要包括串行读出控制所用的移位寄存器和输出级。

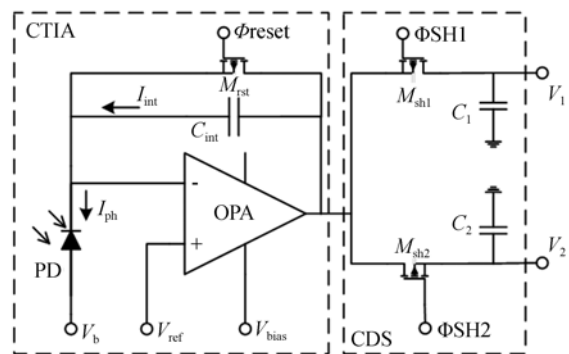


图 11 线阵焦平面阵列读出电路结构示意图
Fig. 11 Schematic of readout circuit of linear FPA

大信号工作时, 输出级中的 MOS 管及金属走线可能存在较大的寄生电阻和电容。但在公共输出级之前, 每个像素独立拥有采样电容 C_1 和 C_2 以及相关走线存在。根据信号传输路径判断, 该部分电容将优先被充电, 从而出现文献描述的信号残留^[13]或续扰^[14]现象。续扰或信号残留现象最明显的特征是, 同一帧中, 不同像素受影响的程

度与其经受的辐照光强度相关,常存在较大差别,但信号整体跃变现象中所有像素受影响的程度一致。此外,续扰可能出现无法自行复位的闩锁,但信号跃变中未观察到该效应。可见,两种现象的表观特征存在明显不同,故可排除该因素。

对图 11 所示 CTIA 电路而言,积分开始前,复位开关管 M_{rst} 导通,积分电容 C_{int} 放电,直至运放输出端电压与负输入端电压相等。复位完成后, M_{rst} 断开,积分电流 I_{int} 给积分电容充电。根据运放的虚短特性,负输入端电压与正输入端的参考电压 V_{ref} 保持一致。忽略米勒效应和探测器等效电容 C_d 的影响,且假定运放增益 A 足够大,则输出端电压为:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{A}{C_{int}(1+A) + C_d} \int_0^{t_{int}} I_{int} dt \approx V_{ref} + \frac{I_{int} t_{int}}{C_{int}} \quad (1)$$

根据运放虚断特性,积分电流 I_{int} 与探测器上的光电流 I_{ph} 和暗电流 I_d 之间满足 $I_{int} = I_{ph} - I_d$ 。将暗电流的解析表达式代入可得:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{I_{ph} t_{int}}{C_{int}} - \frac{I_0 \left[\exp \left\{ \frac{(V_b - V_{ref}) q_0}{\beta k_b T} \right\} - 1 \right] t_{int}}{C_{int}} \quad (2)$$

式中: I_0 为二极管反向饱和电流, β 为理想系数, q_0 为电子电荷, k_b 为玻尔兹曼常数, T 为开氏温度。

实验中,器件 P 端电压 V_b 和参考电压 V_{ref} 均为 2 V,由精密电源模块经端子板提供。端子板为每路输入设计有耦合电容。正常工作时,光敏二极管 P 端电压 V_b 和 N 端电压 V_{ref} 相等,即器件工作于零偏状态。强光辐照时,正向偏置端的工作电流大幅上升,受电源响应速度和供电耦合电容充电速度的限制。光脉冲作用后的一小段时间内,耦合电容后的实际输出电压 V_b 可能出现下降;参考端的工作电流极小, V_{ref} 近似不变。线阵焦平面阵列使用公共 P 极,导致所有光敏二极管的工作状态由零偏转变为反偏。

由图 12 所示的光电二极管伏安特性曲线可知,反偏时二极管的输出电流将叠加有更明显的暗电流成分,基底信号与积分信号均将增大,但因基底的信号积分时间远小于光信号的积分时间,可以忽略其变化,最终使得焦平面器件在脉冲激光辐照后的响应表现为输出信号的整体跃变。

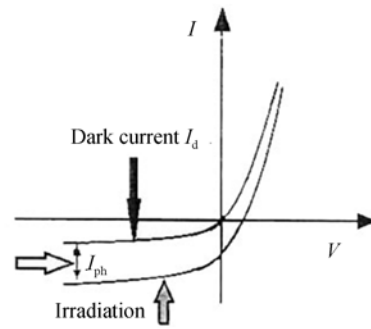


图 12 光电二极管伏安特性曲线示意图

Fig. 12 Schematic of I-V curve of photo diode

辐照激光越强, P 端压降越大,反偏电压越高。暗电流随反偏电压的上升逐步增加,最终趋近反向饱和电流 I_0 。由此可知,即信号跃变量随辐照激光强度的增加而变大,且在经历快速上升阶段后,趋于饱和。该推论与图 7 所示的实验规律一致,在一定程度上验证了信号跃变机理分析的合理性。

5 结 论

研究线阵碲镉汞焦平面阵列在强光作用下的响应特性,有利于增强对器件工作极限的认识,扩展器件的应用范围。本文利用 100 ns 脉宽的 2 μm 波段脉冲激光,对基于 CTIA 与 CDS 结构读出电路的短波红外焦平面阵列开展了单脉冲辐照效应研究,发现了脉冲激光诱导的输出信号整体跃变现象。实验表明,信号跃变量在辐照光超过一定强度(1 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) 后出现,并随激光强度的增加而单调上升,最后趋于饱和;信号跃变现象可自行恢复,不存在闩锁效应。该现象的机理分析表明,信号整体跃变效应与业内常说^[17]的光学串音和电学串音不同,也与脉冲激光加热无关,而是因为强光作用下所有像素光敏单元的公共 P 端供电电路因耦合电容快速放电而出现瞬时压降,使得阵列中所有光电二极管的工作状态由零偏转变为反偏。信号整体跃变现象使得电容反馈跨阻放大结构的焦平面器件在高重频强脉冲激光测量的应用中可能存在不足,本文的研究结果可为今后的器件供电单元设计和性能改进提供一定的技术参考。

参考文献:

- [1] ROGALSKI Antonio. *Infrared detectors* [M]. 2nd. New York: CRC Press, 2010.
- [2] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
CHU J H. *Narrow Bandgap Semiconductor Physics*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUEER M, *et al.*. Thermal modeling of laser damage in HgCdTe photoconductive and PbSnTe photovoltaic detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975,46(10):4519-4525.
- [4] 许晓军, 曾交龙, 陆启生, 等. 1.06 μm 激光对 PC 型 HgCdTe 探测器的破坏阈值研究[J]. 强激光与粒子束, 1998,10(4):552-556.
XU X J, CENG J L, LU Q SH, *et al.*. Research of Damage Thresholds of PC type HgCdTe Detector under CW YAG Laser[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1998,10(4):552-556. (in Chinese)
- [5] 王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程, 2010,18(4):798-804.
WANG S W, GUO L H, ZHAO SH, *et al.*. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(4):798-804. (in Chinese)
- [6] 汤伟, 吉桐柏, 郭劲, 等. 高重频 CO₂ 激光损伤 HgCdTe 晶体的数值分析[J]. 中国光学, 2013,6(5):736-742.
TANG W, JI T B, GUO J, *et al.*. Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(5):736-742. (in Chinese)
- [7] 张俭民, 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)
- [8] DIMMELER A, EBERLE B, VAN D H J C, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]. 2007 *Photoics in Security and Defence. Internatimal society for Optics and Photonics*, 2007: 673800-673800-10.
- [9] DURÉCU A, BOURDON P, FLEURY D, *et al.*. Infrared laser irradiation breadboard: dazzling sensitivity analysis of a HgCdTe focal plane array [J]. *SPIE*, 1999,59(2):1658-1661.
- [10] 郝向南, 聂劲松, 李化, 等. 10.6 μm 激光对 HgCdTe 焦平面器件热应力的分析[J]. 激光与红外, 2012(7):790-794.
HAO X N, NIE J S, LI H, *et al.*. Theoretical analysis of thermal-stress effect of HgCdTe infrared focal place device induced by 10.6 μm laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012(7):790-794. (in Chinese)
- [11] 雷鹏, 李化, 卞进田, 等. TEA-CO₂ 激光辐照 HgCdTe 图像传感器的实验研究[J]. 光学学报, 2013,33(2):119-123.
LEI P, LI H, BIAN J T, *et al.* Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by TEA-CO₂ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,33(2):119-123. (in Chinese)
- [12] 王毕艺, 官上洪, 赵万利, 等. 红外焦平面器件对不同波长激光辐照的响应特性研究[J]. 红外, 2014,35(1):9-13.
WANG B Y, GUAN SH H, ZHAO W L, *et al.*. Study of response characteristics of infrared focal plane device to irradiation of different wavelength lasers[J]. 2014,35(1):9-13. (in Chinese)
- [13] 刘璞. 飞秒激光对光伏型 256 \times 1 线阵碲镉汞探测器的辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
LIU P. *Study of Irradiation Effect to PV HgCdTe Linear Array Detector by fs Laser*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 邱伟成. 线阵光伏型碲镉汞探测器激光辐照效应若干问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
QIU W CH. *Research on the Irradiation Effects of PV-HgCdTe Linear Array Detector under Laser* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] 邱伟成, 王睿, 江天, 等. PV 型 HgCdTe 线阵探测器对强光反常响应机制研究[J]. 光学学报, 2012,32(10):14-20.
QIU W CH, WANG R, JIANG T, *et al.*. Study of unusual response mechanism to PV HgCdTe linear array detector by hard light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012,32(10):14-20. (in Chinese)
- [16] QIU W CH, CHENG X A, WANG R, *et al.*. The transient analysis of latch-up in CMOS trans-

mission gate induced by laser[J]. *Microelectronics Reliability*, 2014,54(12):2775-2781.

[17] 王忆锋, 马钰. 论红外焦平面器件的串音[J]. 红

外, 2014,35(1):1-8.

WANG Y F, MA Y. On the crosstalk of infrared focal plane array[J]. 2014,35(1):1-8. (in Chinese)

作者简介:



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

导师简介:



赵 军(1955—),男,山东济南人,博士,研究员,博士生导师,2000年于北京航空航天大学获得硕士学位,2004年于国防科技大学获得博士学位,主要从事激光及应用方面的研究。E-mail: zhao2k3@sina.com