

线阵碲镉汞探测器对纳秒脉冲激光的反常响应规律及机理

张月¹, 王睿¹, 杨海峰²

- (1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 利用纳秒激光辐照 PV 型线阵 HgCdTe 探测器的局部光敏元, 获得了该类器件损伤前被辐照和未被辐照像元输出信号随激光能量密度变化的全部响应规律, 指出基底信号二阶段响应和光信号六阶段响应的规律特点, 同时给出不同响应阶段激光能量密度阈值范围; 发现了基底信号整体跃变的零压输出、光响应信号输出凹陷-回升-凸起等反常响应现象; 并从探测器读出电路和热生电动势的角度揭示了反常响应现象的产生机理, 希望能加强对阵列型 HgCdTe 探测器光响应特性的深刻认识, 为该类器件的技术创新提供启示。

关键词: HgCdTe; 线阵探测器; 脉冲激光; 反常响应; 零压输出; 响应凹陷

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1003003

Abnormal response law and mechanism of linear array HgCdTe detector irradiated by nanosecond pulse laser

Zhang Yue¹, Wang Rui¹, Yang Haifeng²

- (1. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The 34th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Guilin 541004, China)

Abstract: The response law of output signal for irradiated and unirradiated pixel in PV-type HgCdTe linear array infrared detector was researched when energy density of nanosecond pulse laser, less than destroyed threshold, was increased. The features of two-stage response of base signal and six-stage response of optical signal were pointed out, the energy density threshold range of each response phase was also given; some abnormal response phenomena such as zero voltage output of base signal integral jumping, sag output-recovery-convex of optical response signal were discovered. Based on the above results, from the point of view of readout circuit and thermo-induced electrodynamic force, the mechanism of abnormal response was revealed. We hope to strengthen the deep understanding of the photoresponse characteristics of HgCdTe array infrared detector, and provide inspiration for the technical innovation of this kind of device.

Key words: HgCdTe; linear array detector; pulse laser; abnormal response; zero voltage output; response convex

收稿日期: 2017-08-11; 修订日期: 2017-08-29

基金项目: 高能激光技术湖南省重点实验室(2015TP1001)

作者简介: 张月(1993-), 女, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: 981946038@qq.com

导师简介: 王睿(1976-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: xi_g_z@126.com

0 引言

随着红外探测器在国防与商业上的广泛应用,人们越来越关注 HgCdTe 探测器相关技术以及激光辐照效应的研究,国内外的科研工作者也在该领域进行了大量的工作^[1-11]。目前,人们已经对连续及短脉冲激光辐照下 HgCdTe 探测器的响应特性进行了较为深入的研究。连续激光对 HgCdTe 探测器辐照效应的研究主要围绕在微观层次的载流子输运、热损伤模型的建立等,以及宏观层次的饱和效应、过饱和和降压^[6]、零压输出^[1]、光晕现象^[7]等。对于短脉冲激光辐照效应主要报道了皮秒激光对线列光伏型 HgCdTe 探测器的负光伏响应、纳秒激光对单元光伏型探测器的信号整体跃变现象与负基线^[8-9]等现象的研究。

文中针对纳秒脉冲激光对阵列型 HgCdTe 探测器进行了辐照效应研究,与以往对 PV 型 HgCdTe 阵列探测器研究的不同之处在于:

(1) 辐照源为纳秒脉冲激光。

(2) 激光辐照能量密度范围大,覆盖了器件从出现微光响应至激光损伤时的全部能量范围,获得了该类器件在此范围内可重复的全部响应规律。

(3) 发现了基底信号 V1 整体跃变的零压输出现象。与以往不同的是,参考文献[1]报道的零压输出现象是出现在光响应信号 V2 中,文中讨论的零压输出现象出现在基底信号 V1 中。参考文献[6]报道了随激光能量的增大,未被辐照像元的基底信号出现下降→零→上升逐步变化的现象,文中讨论的零压输出现象是所有像元基底信号的零压输出,且为跃变,不是连续降压。另外,以往发现的零压输出现象是在连续激光辐照下出现的,文中的零压输出现象是在纳秒脉冲激光辐照下出现的。

(4) 发现了光响应信号输出凹陷-回升-凸起的反常响应现象。参考文献[10]曾报道连续激光辐照 PV 型线阵 HgCdTe 探测器时出现饱和凹陷,后有回升的现象。参考文献[10]使用的是连续激光,且光响应信号响应 V2 凹陷回升有限。文中讨论的现象是先出现凹陷,后凹陷回升,且回升至与未被辐照像元的电压幅值相同,其后随激光能量密度的增大被辐照像元位置出现凸起,且凸起范围逐渐扩大。

文中将针对上述问题展开深入研究,希望能加强对阵列型 HgCdTe 探测器光响应特性的深刻认识,为该类器件的技术创新提供启示。

1 实验

1.1 实验方法

实验采用的探测器为 PV 型 512×1 线阵 HgCdTe 红外探测器,探测器芯片被封装到杜瓦瓶内,其像元尺寸为 28 μm×28 μm,分为奇偶两列,按“品”字形排布,其排列结构如图 1 所示。响应波段为 1~3 μm,在 77 K 温度下工作。采用的脉冲激光波长为 1 064 nm,脉冲半高宽为 20 ns,辐照到探测器光敏面的光斑直径为 1.4 mm,单脉冲输出,激光辐照在探测器的积分时间内。

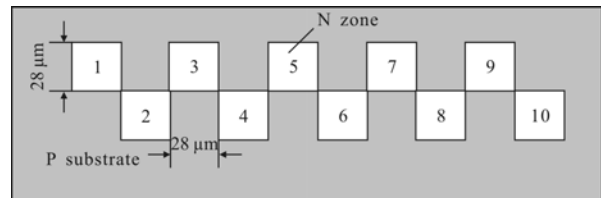


图 1 线阵 HgCdTe 探测器光敏芯片的排列结构示意图

Fig.1 Arrange photosensitive structure of chip of HgCdTe linear array detector

实验光路如图 2 所示,脉冲激光经过小孔光阑 (Aperture)、λ/2 波片 (λ/2 waveplate)、格兰棱镜 (Glan prism)、聚焦透镜 (Lens)、衰减片 (Attenuator),垂直辐照在探测器的光敏面上。在第一片衰减片处的反射光进入能量计以监测激光能量。激光能量由格兰棱镜和衰减片共同作用调节。通过示波器得到探测器基底信号 V1 和光响应信号 V2 的电压值。码型发生器 (PGAppDotNet) 同时为探测器和脉冲激光提供时序,通过调节编码时序,保证激光入射至探测器积分周期内,增强了实验数据采集的效率。

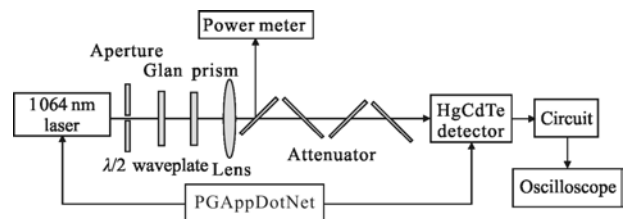


图 2 激光辐照红外线阵 HgCdTe 探测器的实验光路示意图

Fig.2 Experimental light-path diagram of HgCdTe linear detector irradiated by laser

1.2 典型实验结果

通过实验得到不同能量密度下被辐照像元和未

被辐照像元的基底信号 V1 的典型实验结果,如图 3 所示,光响应信号 V2 的典型实验结果如图 4 所示,图

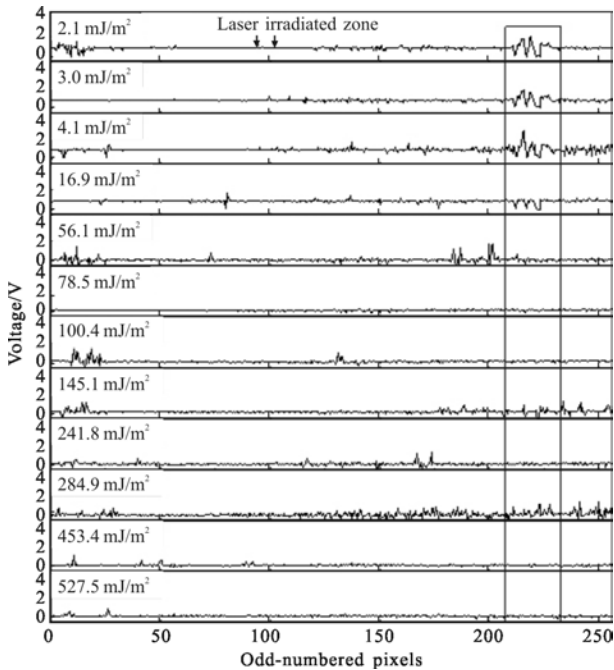


图 3 不同能量密度下探测器基底信号 V1 的响应曲线

Fig.3 V1 response curve of detector base signal for different energy density

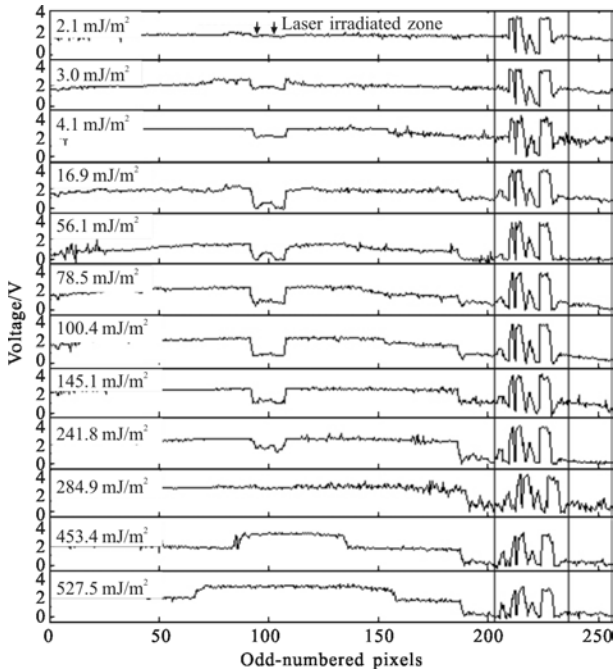


图 4 不同能量密度下探测器奇光响应信号 V2 的响应曲线

Fig.4 V2 response curve of detector odd signal for different energy density

中方框内为已损伤像元,不在此文的讨论范畴,箭头所示的位置为激光辐照的位置,辐照像元数目约为

50 个,其中奇数列 25 个,偶数列 25 个,由于探测器奇数列和偶数列的信号响应特性基本相同,因此文中仅以奇数列为例来说明探测器的响应情况。

将所有像元分为被激光辐照像元和未被激光辐照像元,图 5、图 6 分别为光照区域中心 100 号像元与未被光照的 50 号像元随纳秒脉冲激光能量密度变化的基底信号响应曲线与光响应信号曲线,其中方框内能量密度变化范围较小,因此在图中将此段放大,以便更清晰地看到响应变化的情况;将被辐照像元与未被辐照像元基底信号响应 V1 分为两个阶段,各个阶段的能量密度范围如表 1 所示;将被辐照像元与未被辐照像元光响应信号 V2 分为六个阶段,各个阶段的能量密度范围如表 2 所示。

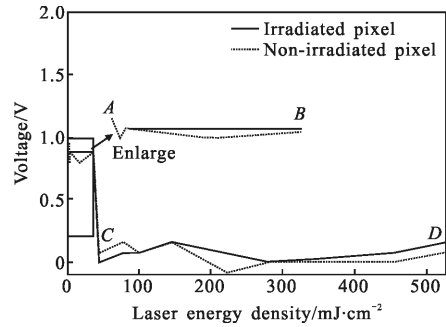


图 5 不同能量密度下被辐照、未被辐照像元的基底信号响应曲线

Fig.5 Irradiated pixel and non-irradiated pixel response curve of base signal V1 for different laser energy density

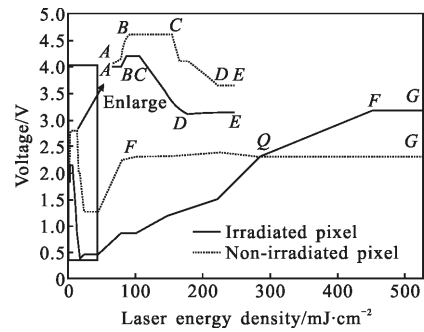


图 6 不同能量密度下被辐照、未被辐照像元的光响应信号曲线

Fig.6 Irradiated pixel and non-irradiated pixel response curve of photo response signal V2 under different laser energy density

表 1 基底信号 V1 两阶段的激光能量密度范围

Tab.1 Laser energy density range of two stage curve of base signal V1

Response phase	Energy density of irradiated pixel /mJ·cm ⁻²	Energy density of non-irradiated pixel/mJ·cm ⁻²
Saturation(AB phase)	<36.2	<36.2
Zero voltage output (CD phase)	>43.6	>43.6

表 2 光响应信号 V2 六阶段激光能量密度范围
Tab.2 Laser energy density range of six stage photo response signal V2

Response phase	Energy density of irradiated column /mJ·cm ⁻²	Energy density of non-irradiated column/mJ·cm ⁻²
Rising(AB phase)	<3.2	<36.2
Saturation(BC phase)	3.2-6.1	>43.6
Decline(CD phase)	6.1-16.9	13.3-23.6
Low output(DE phase)	16.9-43.6	23.6-43.6
Rising(EF phase)	43.6-453.4	43.6-100.4
Saturation(FG phase)	>453.4	>100.4

从上述实验结果中可以得到以下实验规律：

(1) 随着入射激光能量密度的增大,探测器被辐照像元的基底信号 V1 响应呈现两阶段的响应规律,如图 5 所示。在能量密度低于 36.2 mJ/cm² 时对脉冲光没有响应,此时基底电压为背景电压 0.9 V,即图 5 中 AB 段;当能量密度高于 43.6 mJ/cm² 时,V1 在脉冲激光辐照的周期所有像元响应电压在-0.1~0.2 V 区间内,稳定在 0 V 附近,即图 5 中 CD 段,称这种现象为基底信号的零压输出。

(2) 从图 4 可以看出,光响应信号 V2 在有脉冲光辐照的周期全部像元都有响应。

(3) 随着入射激光能量密度的增大,探测器中被辐照像元与未被辐照像元的光响应信号 V2 呈现六阶段的响应规律,如图 6 所示,其中,AB 段为响应上升段,像元的光响应信号电压幅值随脉冲激光能量密度的增大而增大;BC 阶段为响应饱和段,像元的光响应信号电压幅值不随激光能量密度的增大而变化,其中被辐照像元的光响应电压约为 2.2 V,未被辐照像元的光响应电压为 2.8 V;CD 阶段为响应下降段,像元的光响应信号电压幅值随脉冲激光能量密度的增大而减小;DE 阶段为低压输出段,像元的光响应信号电压幅值稳定在最低点,其中被辐照像元的光响应电压约为 0.5 V,未被辐照像元的光响应电压约为 1.1 V,不随脉冲激光能量密度的变化而变化;EF 阶段为响应上升段,像元的光响应信号电压幅值随脉冲激光能量密度的增大而增大;FG 阶段为响应饱和段,像元的光响应信号电压幅值稳定在最

高点,其中被辐照像元的光响应电压为 3.2 V,未被辐照像元的光响应电压约为 2.3 V,不随脉冲激光能量密度的变化而变化。

(4) 图中 Q 点位置为被辐照像元的光响应电压与未被辐照像元相同,在 AQ 阶段,未被辐照像元的光响应电压大于被辐照像元,此时在激光辐照周期的光响应信号 V2 中表现为被辐照位置出现一个凹陷,认为这种现象为响应凹陷;在 QG 阶段未被辐照像元的光响应电压小于被辐照像元,此时在激光辐照周期的光响应信号 V2 中表现为被辐照位置出现一个凸起,称这种现象为凹陷凸起。

2 响应机制

2.1 电路工作原理

实验采用的阵列型 HgCdTe 探测器的读出电路分为两个部分:模拟电路与数字电路。模拟电路的结构如图 7 所示,其中输入级电路为电容反馈跨阻放大电路(CTIA),信号预处理电路为相关双采样(CDS)电路,可以有效地减小电路中的噪声,输出级采用源级跟随器(buffer)缓冲,最终输出电压信号 V1、V2。图中 Reset 为积分复位管,用来控制探测器的工作状态,SH1、SH2 为采样开关,通过控制 SH1、SH2 对信号进行采样。

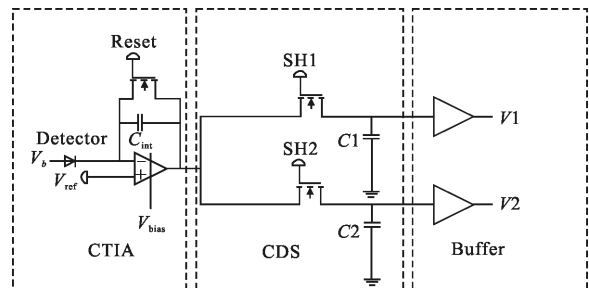


图 7 HgCdTe 线阵探测器的电路结构图

Fig.7 Circuit diagram of HgCdTe linear array detector

数字电路的脉冲时序如图 8 所示。图 8 中 CLK 为参考时钟信号,时钟周期为 40 μs,Reset 高电平时为积分时间,积分时间为 300 μs;Reset 低电平时为读出时间,通过移位寻址串行读出 256 个像元的积分电压。Reset 为低电平时也使所有单元积分电容上的电压复位。复位结束后,采样管 Reset 变为高电平开始积分,同时 SH1 变为低电平,此时积分电容 C_{int} 上的信号被采样并存储在电容 C1 中,并通过 V1 信

号输出, V_1 即为探测器的基底信号。 V_1 采样结束后, SH1 又变为高电平, 积分电容 C_{int} 继续积累光信号, 当积分快要结束时, SH2 变为低电平, 开始采样, 采样结束后 SH2 变为高电平, 从 SH1 变为高电平后到 SH2 再次变为高电平之间的积分时间内 C_{int} 上积累的光信号被采样并存储在电容 C_2 中, 并通过 V_2 输出, V_2 即为探测器的光响应信号。

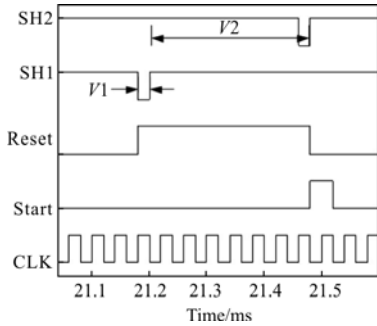


图 8 碲镉汞探测器的工作时序图

Fig.8 Working time sequence diagram of HgCdTe detector

电路中的电流主要分为光电流和暗电流, 其中光电流为光生信号产生的电流, 暗电流为在没有光照时对器件施加偏压而产生的电流。

$$I = I_p - I_d \quad (1)$$

式中: I 为二极管中辐照后产生的电流; I_d 为暗电流; I_p 为光电流。光电流为辐照到探测器上的光子经过光电转换后形成的电流, 光电流 I_p 的表达式为:

$$I_p = \eta q N \quad (2)$$

式中: η 为量子效率; q 为电子电荷量, 为一个定值; N 为光子数。通过二极管的伏安特性可以得到暗电流的表达式:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_0 = q A_d \left[\frac{D_n p_n}{L_n} + \frac{D_p n_p}{L_p} \right] \quad (4)$$

$$V = V_b - V_{ref} \quad (5)$$

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (6)$$

式中: I_0 为反向饱和电流; V 为二极管两端电压; A_d 为面积; D_n 为空穴扩散系数; D_p 为电子扩散系数; p_n 为 n 区空穴浓度; n_p 为 p 区电子浓度; L_n 为空穴扩散长度; L_p 为电子扩散长度; V_b 为探测器单元 P 极电压; V_{ref} 为参考电压; k_b 为玻耳兹曼常数; T 为温度。由公式(1)~(6)可以得到辐照电流的表达式:

$$I = I_p - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V_b - V_{ref}}{k_b T}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

运放的输出电压为:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{I \cdot t}{C_{int}} \quad (8)$$

式中: V_{out} 为 CTIA 电路的输出电压, C_{int} 为积分电容。将公式(7)代入公式(8)可以得到输出电压为:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{I_p}{C_{int}} t - \frac{I_0 \left[\exp\left(q \frac{V_b - V_{ref}}{k_b T}\right) - 1 \right]}{C_{int}} t \quad (9)$$

2.2 反常响应机理分析

2.2.1 基底信号零压输出机理分析

从公式(9)可以看出, 输出信号 V_{out} 与参考电压 V_{ref} 、 P 端电压 V_b 、光电流 I_p 、积分时间 t 有关。在实验中, 参考电压 V_{ref} 和 P 端电压 V_b 设为相同数值, 使光敏二极管的工作状态保持在零偏。在基底信号 V_1 的积分时间内没有光信号进入探测器, 因此光电流 I_p 为零, 积分时间 t_1 为一确定数值。当强脉冲光辐照探测器时, 会在短时间内产生大量的光电子, 使光电流瞬时升高, 光敏元两端开路电压增大, 从而导致实际 V_b 升高。而参考端的电流变化不大, 因此可认为 V_{ref} 不变, 此时光敏二极管的工作状态变为正偏。从公式(9)可以看出当二极管工作状态为正偏时, 暗电流增大, 输出电压 V_{out} 减小, 因此基底信号 V_1 也随之减小。

在文中实验中, 当纳秒脉冲激光能量密度小于 36.2 mJ/cm^2 时, CTIA 电路正常工作, 光电二极管工作状态为零偏, P 端电压 V_b 与参考电压 V_{ref} 相等, 此时基底信号 V_1 输出为背景电压。当纳秒脉冲激光能量密度大于 43.6 mJ/cm^2 时, CTIA 电路中 P 端电压 V_b 增大, 光电二极管工作状态从零偏变为正偏, P 端电压 V_b 大于参考电压 V_{ref} 。由于光敏二极管所有像元共用一个 P 极, 因此随着 V_b 增大, 所有单元输出电压减小, 即积分电容两端电势差减小, 此时基底信号 V_1 下降至 0 V 。

通过码型发生器控制改变 P 端电压 V_b 的值, 可以得到不同 V_b 的条件下探测器的输出电压曲线, 如图 9 所示, 图中框内为损伤单元。从图中可以得到: 随着 P 端电压 V_b 的增大, 探测器输出电压整体下降。这个实验证实了 P 端电压 V_b 的变化可以改变探测器整体电压的变化, 进而验证了基底信号零压输出现象理论分析的正确性。

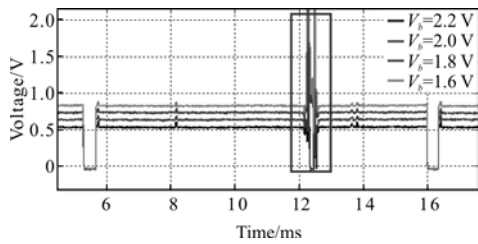


图 9 不同 P 极电压下基底信号输出曲线

Fig.9 Output curve of base signal V1 with different V_b

另外，由于实验脉冲位于基底信号积分时间之外、光信号积分时间之内，所以所有像元出现基底信号零压输出的现象。

参考文献[6]报道的现象在连续激光辐照下出现的，当基底信号降为 0 V 时，激光功率密度为 0.52 W/cm^2 ，文中的零压输出现象是在纳秒脉冲激光辐照下出现的，脉冲激光辐照时间仅有 20 ns，出现零压输出时的能量密度为 43.6 mJ/cm^2 ，峰值功率密度高达 $2.18 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ，远远大于参考文献[6]中连续光的功率密度。短时间、高功率密度的激光辐照造成光生载流子急剧增加是导致基底信号整体跃变零压输出的主要原因。

2.2.2 光响应信号反常响应机理分析

当脉冲激光辐照探测器时，采样电容 C_m 存储的电荷量为：

$$Q = I_p \cdot t \quad (10)$$

式中： I_p 为光电流，当激光能量密度较大时，由于 CMOS 管的开关特性，流过 CMOS 管的电流不变，因此公式(10)中 I_p 不变，采样电荷量 Q 仅与积分时间 t 有关，当积分时间一定时，采样电容 C_m 中存储的电荷量也一定，从而导致输出电压不随激光能量密度的增大而变化。因此当激光能量密度为 $3.2 \sim 6.1 \text{ mJ/cm}^2$ 时，被辐照像元响应饱和。

被辐照像元的积分电容达到饱和后，光敏元 PN 结两端产生开路电压。如图 6 所示， Q 点之前，开路电压上升，进而引起整列像元的偏置电压 V_b 上升和参考电压 V_{ref} 下降，探测器处于正偏状态，被辐照单元输出电压下降，小于未被辐照单元的整体电压变化，表现为响应凹陷。

当激光能量继续增大至 43.6 mJ/cm^2 时，所有像元的光响应信号整体下降，是由于 P 极电压 V_b 升高，而参考端电压 V_{ref} 降低，致使光敏二极管的工作

状态变为正偏，从而影响所有像元的响应输出下降。当脉冲激光能量继续增大时，由于入射光的光子能量大于半导体材料的禁带宽度，除了产生光生载流子外，还会有多余的能量引起器件温升，并使器件结区沿入射光方向产生温差，器件前表面温度高于后表面，导致前表面产生大量热激发载流子，这些载流子在温度梯度和浓度梯度的共同作用下向后表面扩散，并在 PN 结内被分离，产生热生电动势。热生电动势与光生电动势都是由于内建电场分离电子-空穴对产生的，因此它们响应方向相同^[11]。随着激光能量密度的增大，热生电动势也随之增加，从而引起探测器光响应信号电压回升，出现凹陷回升现象。同时，由于芯片内部像元之间的热传导，引起周围未辐照像元温度升高，从而出现未被辐照像元的响应扩展等现象。

3 结论

文中系统研究了阵列型碲镉汞探测器对纳秒激光的辐照效应，指出了基底信号两阶段响应和光信号六阶段响应的规律特点，同时给出不同响应阶段激光能量密度阈值范围；发现了基底信号整体跃变的零压输出、光响应信号输出凹陷-回升-凸起等反常现象。通过对探测器读出电路结构进行分析，认为随激光能量增强，探测器光电二极管内部公共 P 极的电压 V_b 瞬时增大，所有单元输出电压减小，即积分电容两端电势差共同减小，从而使基底信号 V1 整体跃降至 0 V 左右，出现基底信号整体跃变的零压输出现象。产生光响应信号输出凹陷的主要原因是随激光能量的增强， V_b 瞬时增大，导致探测器的工作状态从零偏变为正偏，“电容量”降低，被辐照像元输出电压减小，出现凹陷。当激光能量继续升高时，多余的能量引起器件温升，并使器件结区沿入射光方向产生温差，形成热生电动势，导致光响应信号电压回升及未辐照单元响应扩展等现象。

参考文献：

[1] Cheng Xiang'ai, Lu Qisheng, Ma Liqin, et al. Experimental study of PV type HgCdTe detector irradiated with 1.319 μm CW laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 622-626. (in Chinese)
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.
- [2] Bai Piji, Zhao Jun, Han Fuzhong, et al. Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102003. (in Chinese)
白丕绩, 赵俊, 韩福忠, 等. 数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0102003.
- [3] Yu Fei, Ren Qifeng, Li Sujun, et al. Analysis of noise for infrared focal plane array in low temperature background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0304003. (in Chinese)
余菲, 任栖锋, 李素钧, 等. 低温背景下红外焦平面阵列的噪声分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0304003.
- [4] Zhang Haiyan, Guan Jian'an, Zhuang Fulong, et al. Measurement and error analysis of low temperature deformation of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504001. (in Chinese)
张海燕, 管建安, 庄馥隆, 等. 红外焦平面低温形变测试方法及其误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0504001.
- [5] Tang Wei, Ji Tongbo, Guo Jin, et al. Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 736-742. (in Chinese)
汤伟, 吉桐伯, 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.
- [6] Qiu Weicheng, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Study of unusual response mechanism to PV HgCdTe linear array detector by hard light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1004001. (in Chinese)
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): 1004001.
- [7] Durécu A, Bourdon P, Goular D, et al. Infrared laser irradiation breadboard: dazzling sensitivity analysis of a HgCdTe focal plane array[C]//SPIE, 2011, 8187: 81870K.
- [8] Zhang Jianmin, Xu Zuodong, Feng Guobin, et al. Overall signal transition of linear HgCdTe focal plane array device induced by pulsed laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 272-279. (in Chinese)
张检民, 徐作冬, 冯国斌, 等. 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 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 272-279.
- [9] Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, et al. Abnormal behaviors of photovoltaic HgCdTe detectors under intense pulse laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 50-56. (in Chinese)
徐作东, 张检民, 林新伟, 等. 强脉冲激光作用下碲镉汞光伏探测器的反常行为 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 50-56.
- [10] Liu Pu. Study of irradiation effect to PV HgCdTe linear array detector by fs laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
刘璞. 飞秒激光对光伏型 256×1 线阵 HgCdTe 探测器的辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [11] Jiang Tian, Cheng Xiang'ai, Jiang Houman, et al. Study on the response mechanism of photovoltaic semiconductor devices to photon with energy less than band gap [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 097303. (in Chinese)
江天, 程湘爱, 江厚满, 等. 光伏半导体器件对能量小于禁带宽度光子的响应机理研究[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 097303.