

基于 CTIA 的 PV-HgCdTe 线阵近红外激光响应特性

邱伟成, 王 睿, 许中杰, 程湘爱

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 使用超连续谱激光辐照 PV 型线阵 HgCdTe 探测器, 探测到了线阵器件输出信号随光照强度变化的全过程, 发现了被辐照单元过饱和降压、低压稳定输出的反常响应规律; 同时, 未被辐照单元也存在响应。在总结实验响应规律的基础上, 给出了各不同响应阶段功率阈值范围, 并分别对辐照单元出现的过饱和降压、低压稳定输出等异常现象及未被辐照单元存在的整体降压反常响应现象进行了深入研究。研究认为采用 CDS 相关双采样电路使器件的基底信号在强光下存在光响应是造成辐照单元异常响应的主要原因; 而器件内部公共 P 级结构、电路共用 V_{ref} 电压结构是导致未被辐照单元反常响应输出的主要因素。

关键词: 辐照效应; 阵列探测器; 激光; HgCdTe

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1394-05

Study on the light response characteristics of PV HgCdTe linear array detector with CTIA circuit

Qiu Weicheng, Wang Rui, Xu Zhongjie, Cheng Xiang'ai

(College of Opt-electrical Science and Engineering, National University of Defensive Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: PV HgCdTe linear array detector was irradiated by supercontinuum laser light of various intensities. A series of photoresponsive output of HgCdTe detector under various laser intensities were shown. Some new phenomena of irradiated cell, supersaturation, low-voltage output were observed. The results were quite different from normal linear and saturated response. Besides, the nonirradiated units' output signal had responded. The range of threshold of various stages were given, on the basis of summarizing the responsive properties of HgCdTe detector. With further investigation, it is demonstrated that the paradoxical responded phenomenon of irradiated cell is primarily caused by the light response of the basal signal of the device's CDS circuit in bright light and the phenomenon of nonirradiated cell is primarily caused by the public P pole structure of linear array detector and the public V_{ref} voltage structure of circuit.

Key words: irradiating effect; linear array detector; laser; HgCdTe

收稿日期: 2012-10-12; 修订日期: 2012-11-24

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(B110705)

作者简介: 邱伟成(1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: 2008qiuweicheng@sina.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

随着激光和红外技术在国防、工业和科学技术领域的广泛应用,研究激光对红外探测器的辐照效应已经成为国内外一项重要的内容,并做了大量的研究工作^[1-7]。但以往该领域的研究工作主要集中在单元探测器微观层次上的载流子输运、混沌效应、热损伤模型的建立等,对于红外线阵探测器激光辐照效应研究的报道颇少。文中使用超连续谱激光对 PV 型 HgCdTe 线阵探测器进行了辐照效应研究,探测到了器件输出信号随激光强度呈现出线性增压、饱和、过饱和降压、低压输出的响应全过程,发现了辐照单元过饱和降压、低压稳定输出,以及未被辐照单元出现整体下降的反常现象。在揭示不同辐照单元光响应规律的基础上,重点对其反常响应机制进行了深入研究。

1 实验

1.1 实验方法

实验中采用如图 1 所示的光路进行,激光经过滤光片和衰减由光阑进入可在导轨上三维移动的探测器后垂直辐照在探测器的光敏面上,记录仪采集输出信号。PV 型 512×1 HgCdTe 探测器阵列与读出电路的连接方式采用混合式,即探测单元与读出电路(位于探测器阵列侧边)通过钢凸点倒装互连。截止波长为 3 μm,工作温度为 77 K。激光器选用 0.4~2.4 μm 的超连续谱激光器,探测器前加一尺寸小于激光光斑大小的小孔光阑,使用透射波段为 1~3 μm 的滤光片进行光谱选择。

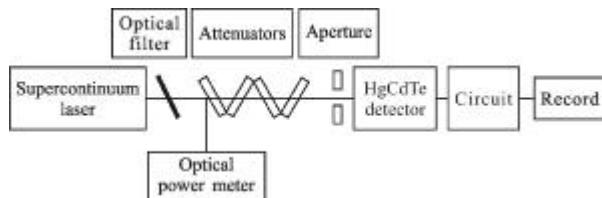


图 1 激光辐照 HgCdTe 线阵探测器的实验光路示意图

Fig.1 Experimental light-path diagram of HgCdTe linear detector irradiated by laser

1.2 典型实验结果

通过实验得到的典型实验结果如图 2 所示。图 2

给出了不同功率密度下超连续谱激光辐照线阵 HgCdTe 探测器时探测器的光响应输出曲线。小孔光阑直径为 1 mm,辐照像元数约为 18 个。

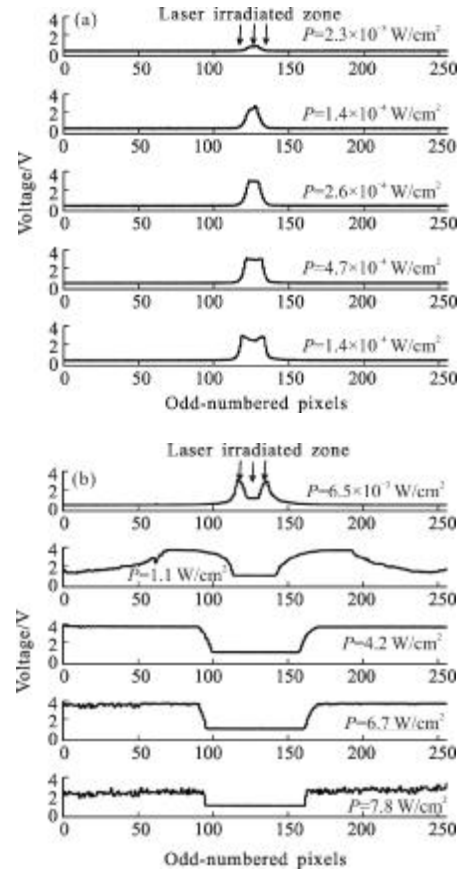


图 2 超连续谱激光辐照线阵 HgCdTe 探测器奇数列的光响应曲线

Fig.2 Photoreponsive signal curve of HgCdTe linear detector's odd-numbered columns irradiated by laser

通过上述实验结果分析出以下实验规律:

(1) 无光照时,背景输出为 0.14 V;当激光功率密度小于 $1.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 时,辐照像元成线性光响应输出。

(2) 当激光功率增强到约 $1.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 时,辐照中心像元的光响应输出达到饱和值约为 2.88 V。随着激光功率密度的增大,饱和像元数增加,光响应信号出现过饱和并下降。图 3(a)为光照区域中心的第 127 号像元随超连续谱激光功率密度变化的光响应曲线。将响应曲线划分为 4 个典型阶段:AB 段 ($0 \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$) 为线性响应区;BC 段 ($1.6 \times 10^{-4} \sim 3.4 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$) 为饱和区;CD 段 ($3.4 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$) 为过饱和区;DE 段 ($4.0 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$) 为低压稳定输出区,输出电压约为 0.9 V。

(3) 未被辐照单元随着功率密度的增大呈现先上升至饱和,后整体下降,且噪声明显增加的反常现象。图 3(b)为离光照区最远的第 1 号像元随激光功率密度变化的光响应曲线。

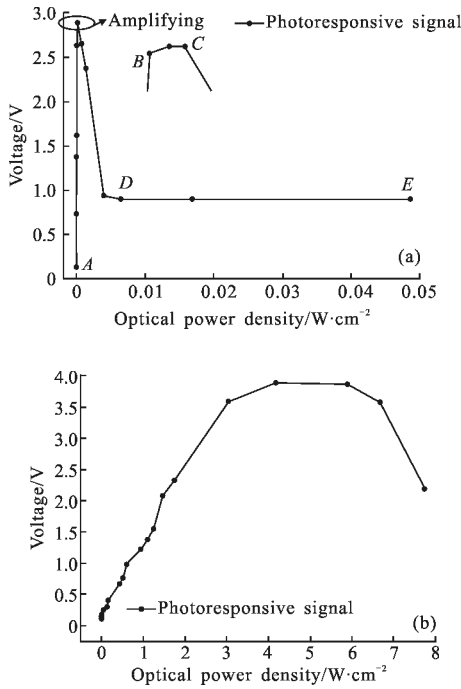


图 3 被辐照单元未被辐照单元的光响应曲线

Fig.3 Irradiated cell and non-irradiated cell response for different laser power density

2 响应机制

2.1 电路系统的工作原理及分析

线阵探测器的电路结构及工作方式如图 4 所示。采用目前红外焦平面器件普遍采用的 CTIA^[8]读出电路,以及 CDS^[9]相关双采样处理噪声电路。探测器光信号积分前,由复位脉冲 Φ_{Reset} 打开复位开关(低电平有效),使所有单元积分电容上的电压复位;复位结束就开始积分,此时采样脉冲 Φ_{SH1} 同时开启,积分电容 C_{int} 上的信号被采样并被存储在电容 C_1 中作为基底信号 V_1 ,然后关闭开关,在积分周期即将结束前,采样脉冲 Φ_{SH2} 同时开启,将积分电容 C_{int} 上的光信号读出,并存储在电容 C_2 ;然后读出周期开始,通过移位寄存器寻址,依次开启输出开关,将对应单元的 C_1 、 C_2 上信号由 V_1 、 V_2 输出,实际光响应为 V_2 与 V_1 的差值,并在信号读出同时将所有积分电容复位。

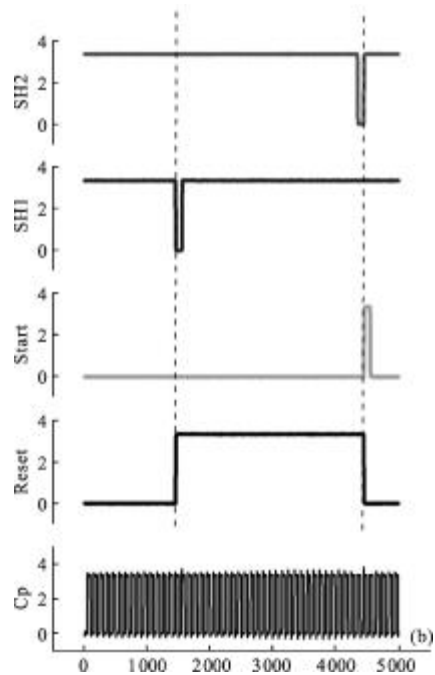
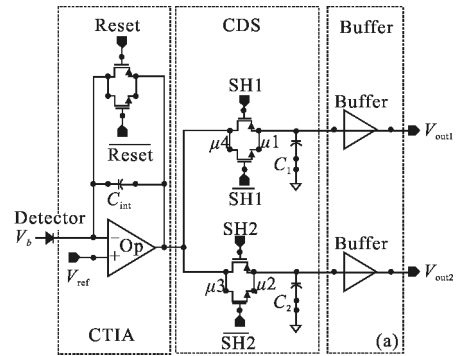


图 4 HgCdTe 线阵单元读出的电路结构及工作时序图
Fig.4 Structure and working time sequence of linear array detector's readout circuit

当器件正常工作时,探测像元的光信号输出为背景光响应,约为 0.14 V;随着光强的增大,输出电压逐渐上升,最终积分电容达到饱和,使光响应输出达到饱和(如图 2 中 $P=2.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 输出曲线所示)。但在实验中发现,当激光功率增大到一定程度时,被辐照像元的光响应信号出现了过饱和、低压输出的现象;同时,未被辐照单元的光响应信号饱和后也出现了下降的现象。下面将从器件工作原理、电路结构等方面具体分析现象产生的原因。

2.2 线阵探测器输出电压表达式

探测器二极管的工作特点由它的 I-V 特性曲线和两端的偏置电压决定,工作原理如图 5 所示。在

N⁺-on-P 型 MCT 红外焦平面器件内部结构中, 红外辐射在 P 区被吸收并激发出光生载流子, 载流子扩散至 PN 结区, 被内建电场分开通过外接电路形成光生电流。光生电流经电路中积分电容积分放大后通过相关双采样 CDS 电路输出。

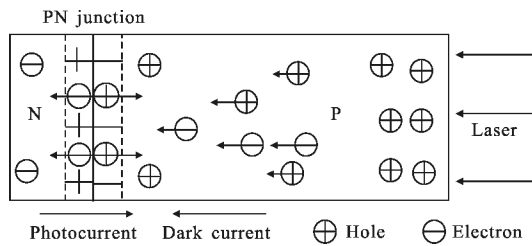


图 5 二极管工作方式示意图
Fig.5 Work way of diode

电路中电流包括光生信号电流和暗电流, 其中暗电流与探测器两端的偏置电压有关^[10]。

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

$$I_0 = q \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p n_{n0}}{L_p} \right) \quad I_d = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_b - V_{ref}}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

运放 OPA 后的输出电压为:

$$V_{out} = V_{ref} - \frac{I \cdot t}{C_{int}} \quad (3)$$

式中: I_p 为光电流; I_d 为暗电流; k 为波耳兹曼常数; I_0 为反向饱和电流; V_b 、 V_{ref} 分别为探测单元 P 极和 N 极电压; L_n 、 L_p 分别为电子和空穴扩散长度, D_n 、 D_p 分别为电子和空穴扩散系数。将公式(1)代入公式(3)可得:

$$V_{out} = V_{ref} + \frac{I_p \cdot t}{C_{int}} - \frac{I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_b - V_{ref}}{nkT} \right) - 1 \right] \cdot t}{C_{int}} \quad (4)$$

实际工作中常常需要 V_{ref} 等于 V_b 电压, 器件处于零偏工作状态。从相关双采样 CDS 电路工作时序(如图 4 所示), 可以看出积分电容刚开始积分时, Φ_{SH1} 同时开启, 积分电容 C_{int} 上的信号被采样并被存储在电容 C_1 中作为基底信号 V_1 , 实际电容 C_{int} 的积分时间即为采样时间 t_1 , 因此基底信号输出响应电压 V_1 为:

$$V_1 = V_{ref} + \frac{I_p \cdot t_1}{C_{int}} \quad (5)$$

当采样脉冲 Φ_{SH2} 同时开启时, 积分电容 C_{int} 上的信号被采样并被存储在电容 C_2 中, 输出电压 V_2 , 此时积分电容已经经历了一周的积分时间 t_0 , 输出

响应电压 V_2 为:

$$V_2 = V_{ref} + \frac{I_p \cdot t_0}{C_{int}} \quad (6)$$

2.3 探测单元光响应机理分析

2.3.1 被辐照单元光响应曲线的机理分析

当连续激光辐照红外碲镉汞线阵器件时, 信号 V_1 和 V_2 电压输出表达式中 I_p 相等, 但积分时间不同。器件工作时采样时间 $t_1 = 10 \mu s$, 一周期的积分电容积分时间 $t_0 = 300 \mu s$, $t_0 \gg t_1$, 由公式(8)、(9)可知基底信号 V_1 只包含少部分光电流积分。当光强较少时, 光生电流 I_p 较小, V_1 基本没有变化, 光响应信号 $V = V_2 - V_1$, 其响应值随着光电流密度的上升而上升, 如光响应曲线 AB 段所示; 随着光功率密度的增大, 积分电容 C_{int} 在一周期积分时间 t_0 后最终达到饱和, 因此光信号响应输出为饱和值 2.88 V, 如光响应曲线 BC 段所示; 当功率密度为 $3.4 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3} W/cm^2$ 时, 基底信号 V_1 的影响不容忽视, V_1 逐渐升高, 而采集电压 V_2 处于饱和值不变, 因此输出光信号响应值反而下降, 表现为过饱和现象, 如光响应曲线 CD 段所示; 当功率密度为 $4 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-2} W/cm^2$ 时, 由于光强较大, 积分电容在采集时间 t_1 积分后就已经达到饱和, 使得基底信号 V_1 饱和, 采集电压 V_2 仍处于饱和值 3.78 V 不变, 因此输出光响应出现约 0.9 V 的低电压稳定输出, 如光响应曲线 DE 段所示。

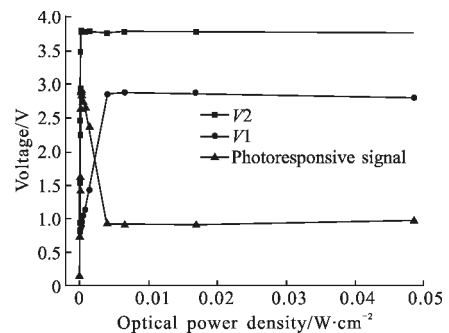


图 6 第 127 号像元的 V_2 和 V_1 信号响应曲线
Fig.6 V_2 and V_1 signal response curve of No.127 pixel

由以上分析可知, 如果基底信号 V_1 包含部分光电流积分, 那么当光强较大时, V_1 值会上升, 导致最终光响应信号下降, 出现过饱和现象; 当光强增大到一定程度时, 基底信号 V_1 达到饱和, 光信号出现低压输出现象。为了验证这一推测, 对探测器的 V_1 和 V_2 信号进行实验测量。图 6 为第 127 号像元的 V_2 和

V_1 信号随激光功率密度的变化曲线。可以看出, V_2 信号随着激光功率密度的增大迅速上升并达到饱和; 而基底信号 V_1 确实包含部分光电流积分, 随着激光功率密度的增大缓慢上升, 最终达到饱和, 光响应信号呈现低压输出, 与前面的分析一致。对信号 V_1 和 V_2 线性响应区的斜率比值 k_1/k_2 的分析进一步验证了基底信号的光响应与采集时间 t_1 的关系。实际测量 $k_1 \approx 512.5 \text{ V}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$, $k_2 \approx 13\,554 \text{ V}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$, $k_1/k_2 \approx 26.5$ 。由公式(8)和(9)可知, 信号 V_1 和 V_2 线性响应区斜率比的理论值 $t_0/t_1 = 30$ 。考虑到电路中 CMOS 管的差异性, 实际计算值与理论值很接近, 由此可见, HgCdTe 线阵探测器在强光下出现的过饱和与低压输出现象主要是由于基底信号响应值的增大、饱和所引起, 且与电路采样时间密切相关。

2.3.2 未被辐照单元光响应曲线的机理分析

未被辐照单元随着功率密度的增大呈现先上升至饱和, 后整体下降, 且噪声明显增加的反常现象。这一反常现象与辐照单元的影响密不可分。从 CTIA 电路结构可以看出, 当功率密度增加到一定程度时, 辐照单元的积分电容 C_{int} 达到饱和, 光生电荷不能再转移到积分电容, 此时相当于开路, 辐照单元将产生开路电压, 影响整列像元公共 P 极的偏置电压 V_0 和 N 极的参考电压 V_{ref} , 进而由公式(7)可知影响整列探测器的输出电压。参考文献[11]详细分析了未被辐照像元的反常响应机理, 这里不再赘述。

3 结论

超连续谱激光对 PV 型 HgCdTe 线阵探测器的辐照效应规律体现了这类红外焦平面器件随激光强度变化的普遍响应规律。通过实验发现了探测器辐照单元过饱和降压、低压稳定输出以及未被辐照单元出现整体下降的反常现象, 给出了各阶段响应的功率密度范围, 并在此基础上对不同辐照单元的反常响应机制进行了深入研究。结果表明: 采用 CDS 相关双采样电路使器件的基底信号在强光下存在光响应是造成辐照单元异常现象的主要原因; 器件内部公共 P 级结构、电路共用 V_{ref} 电压结构是导致未被

辐照单元光响应出现整体下降的主要因素。研究结果揭示了 PV 型 HgCdTe 线阵探测器在强光下响应的不足, 为今后红外焦平面器件在强光下性能的改进提供了一定的理论指导和方向。

参考文献:

- [1] Krueer M, Esterowitz L, Allen R, et al. Thermal models for laser damage in InSb photovoltaic and photoconductive detectors[J]. *Infrared Physics*, 1976, 16(3): 375-384.
- [2] Yoffa E J. Role of carrier diffusion in lattice heating during pulsed laser annealing[J]. *Appl Phys Lett*, 1980, 36(1): 37-38.
- [3] Wang Xiaokun, Zeng Zhijiang, Zhu Sangen, et al. Dewar for medium wave 2048 pixel long linear HgCdTe IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 611-614. (in Chinese)
- [4] Zhuang Jisheng, Wang Yifeng, Fan Naihua, et al. Correction of test data of infrared focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 195-198. (in Chinese)
- [5] Sui Xiubao, Chen Qian, Bai Lianfa, et al. Multiple sampling and filter technology of infrared focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 993-998. (in Chinese)
- [6] Cui Haoyang, Li Zhifeng, Ma Fajun, et al. Negative photovoltaic -responses in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2009, 28(3): 161-164. (in Chinese)
- [7] Jiang Tian, Cheng Xiangai, Jiang Houman, et al. Investigation of the response mechanism of photovoltaic semiconductor with sub-bandgap photons[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(10). (in Chinese)
- [8] Fang Dan. Skill analysis of readout integrated circuits of IRFPA [J]. *Infrared Technology*, 2004, 26 (2): 23-28. (in Chinese)
- [9] Yuan Xianghui, Lu Guolin, Huang Youshu, et al. CMOS readout intergrated circuit for IRFPA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, 20(2): 123-126. (in Chinese)
- [10] Deng Ning, Tian Lilin, Ren Min. *Fundamentals of Semiconductor Devices* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 530-535. (in Chinese)
- [11] Qiu Weicheng, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Study of the unusual response mechanism to PV HgCdTe linear array detector by hard light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): P1004001-1-1004001-6. (in Chinese)