

# PV 型 HgCdTe 线阵探测器对强光反常响应机制研究

邱伟成 王睿 江天 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** 采用多种波段内激光辐照带有电容反馈互导放大器(CTIA)读出电路的 PV 型线阵 HgCdTe 探测器, 实验均发现, 当激光功率密度增强到约  $10^{-2}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 未辐照像素也存在响应, 且其基底信号出现以前未曾发现的反常响应, 即随功率密度的增加, 未辐照像素基底信号的响应值先下降后上升, 并且噪声增大。针对这一反常响应现象进行了深入研究, 结果表明器件内部公共 P 级结构、电路共用  $V_{ref}$  电压结构是导致这一反常响应的主要原因。

**关键词** 探测器; HgCdTe; 阵列探测器; 激光; CTIA 读出电路

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1004001

## Study of Unusual Response Mechanism to PV HgCdTe Linear Array Detector by Hard Light

Qiu Weicheng Wang Rui Jiang Tian Xu Zhongjie Cheng Xiang'ai

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The photovoltaic HgCdTe detectors with capacitive transimpedance amplifiers (CTIA) readout circuit is irradiated by various in-band lasers. All is found that the nonirradiated detection units' basal signals have responded, when the incident laser power density increases about to  $10^{-2}$  W/cm<sup>2</sup>. The responded value initially decreases and then increases, and the noise increases with the power density increasing. With further investigation, it is demonstrated that the paradoxical responded phenomenon is primarily caused by the public P pole structure of linear array detectors and the public  $V_{ref}$  voltage structure of circuits.

**Key words** detectors; HgCdTe; linear array detector; laser; CTIA readout circuit

**OCIS codes** 040.1240; 140.3330; 140.3580

## 1 引言

随着光电技术的发展, 光电探测器的应用越来越广泛, 因此关于光电探测器激光辐照效应的研究也受到人们的重视<sup>[1~9]</sup>。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、混沌效应和热损伤模型的建立等, 对于线阵探测器激光辐照效应的报道颇少。为了研究辐照像素对未辐照像素输出信号的影响, 本文选用目前普遍采用的带有电容反馈互导放大器(CTIA)读出电路<sup>[10]</sup>的 PV 型 HgCdTe 线阵探测器进行了辐照效应研究, 实验发现了不同于正常响应的反常现象。在揭示其

反常响应规律的基础上, 对其响应机制进行了深入研究。

## 2 实验研究

### 2.1 器件阵列结构

器件阵列结构如图 1 所示, 品字形排列, 分奇偶两列信号输出。

### 2.2 实验方法

实验采用如图 2 所示的光路进行。探测器为 PV 型 512×1 线阵 HgCdTe 探测器, 其响应波段为 1~3 μm, 工作温度为 77 K, 置于液氮制冷的杜瓦瓶内。

收稿日期: 2012-04-09; 收到修改稿日期: 2012-05-07

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(B110705)资助课题。

作者简介: 邱伟成(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: 2008qiuweicheng@sina.com

导师简介: 王睿(1976—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: XI\_G\_Z@126.com

激光器选用  $0.4\sim 2.4\ \mu\text{m}$  的超连续谱激光器和 2 种波段内连续波激光器,探测器前加一尺寸小于激光光

斑大小的小孔光阑,用来限制辐照像素的数目,使用透射波段为  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  的滤光片进行光谱选择。

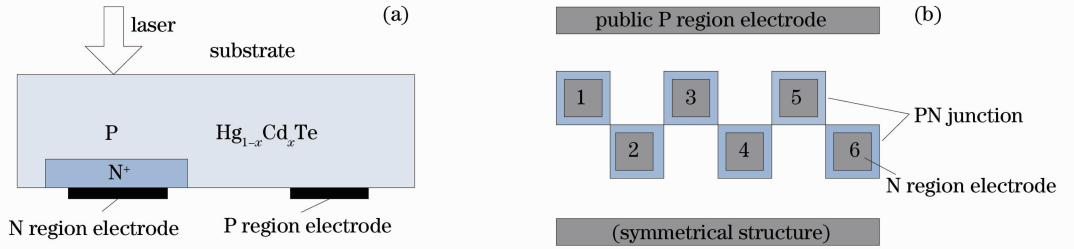


图 1 HgCdTe 探测器阵列结构。(a)单个像素结构;(b)线阵平面几何结构

Fig. 1 Structure of HgCdTe array detector. (a) Structure of single pixel; (b) plane geometry structure of linear array

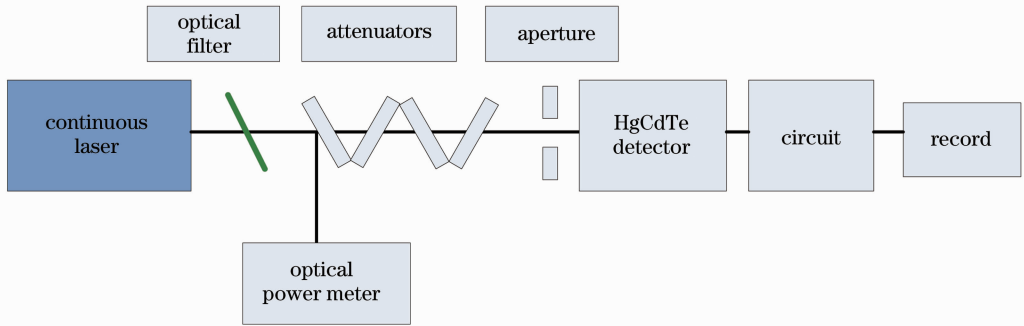


图 2 激光辐照短波 HgCdTe 线阵探测器实验光路示意图

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

### 2.3 典型实验结果

通过实验得到以下典型实验结果,如图 3 所示。图 3 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 V1 信号的输出曲线,其中

V1 是基底信号。小孔光阑直径为  $1\ \text{mm}$ ,辐照像素数约为 18 个,其他两种波段内( $1.319\ \mu\text{m}$ ,  $2.8\ \mu\text{m}$ )连续激光辐照效应的实验结果与图 3 相似。

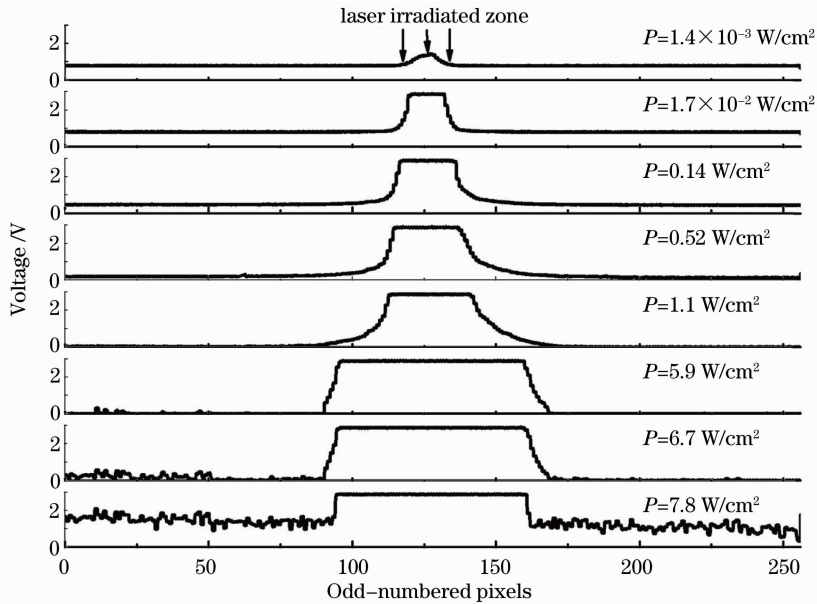


图 3 超连续谱激光辐照线阵 HgCdTe 探测器奇数列的 V1 信号曲线

Fig. 3 V1 signal curve of HgCdTe linear detector's odd-numbered columns irradiated by laser

通过上述实验结果,可分析出 3 点实验规律:1) 当激光功率密度小于  $1.7 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$  时,未辐照像素的基底信号 V1 输出电压为一固定值 0.8 V,没有信号响应。2) 当激光功率增强到约  $0.14 \text{ W/cm}^2$  时,未辐照像素的基底信号出现了整体的电压响应如图 3 所示。图 4 为离光照区域最远的第一个未辐照像素 V1 信号随超连续谱激光功率密度变化的响应曲线。将 V1 曲线划分为 4 个典型阶段:AB 段 ( $0 \sim 1.7 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ ) 无信号响应,BC 段 ( $1.7 \times 10^{-2} \sim 1.1 \text{ W/cm}^2$ ) V1 输出响应下降,CD 段 ( $1.1 \sim 5.9 \text{ W/cm}^2$ ) 输出响应为零,DE 段 ( $5.9 \sim 7.8 \text{ W/cm}^2$ ) 信号输出响应呈现上升趋势。3) 在激光大功率密度辐照下,探测器的 V1 输出信号包含的噪声明显增加,如图 3 中  $P=7.8 \text{ W/cm}^2$  所示。

### 3 响应机制研究

#### 3.1 CTIA 读出电路的工作原理

线阵探测器 CTIA 读出电路工作方式如图 5 所示(cp 为时钟信号,CDS 为中央动态存储器)。探测器光信号积分前,由复位脉冲  $\Phi_{\text{Rest}}$  打开复位开关

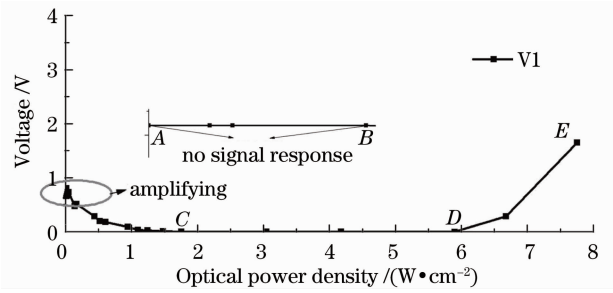


图 4 未辐照单元随激光功率密度变化的关系  
Fig. 4 Non-irradiated cell response for different laser power densities

(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  $\Phi_{\text{SH1}}$  同时开启,积分电容  $C_{\text{int}}$  上的信号被采样并被存储在电容  $C_1$  中作为基底信号 V1,然后关闭开关,在积分周期即将结束前,采样脉冲  $\Phi_{\text{SH2}}$  同时开启,将积分电容  $C_{\text{int}}$  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  $C_1$  和  $C_2$  上信号由 V1 和 V2 输出,实际光响应为 V2 与 V1 的差值,并在信号读出同时,将所有积分电容复位。

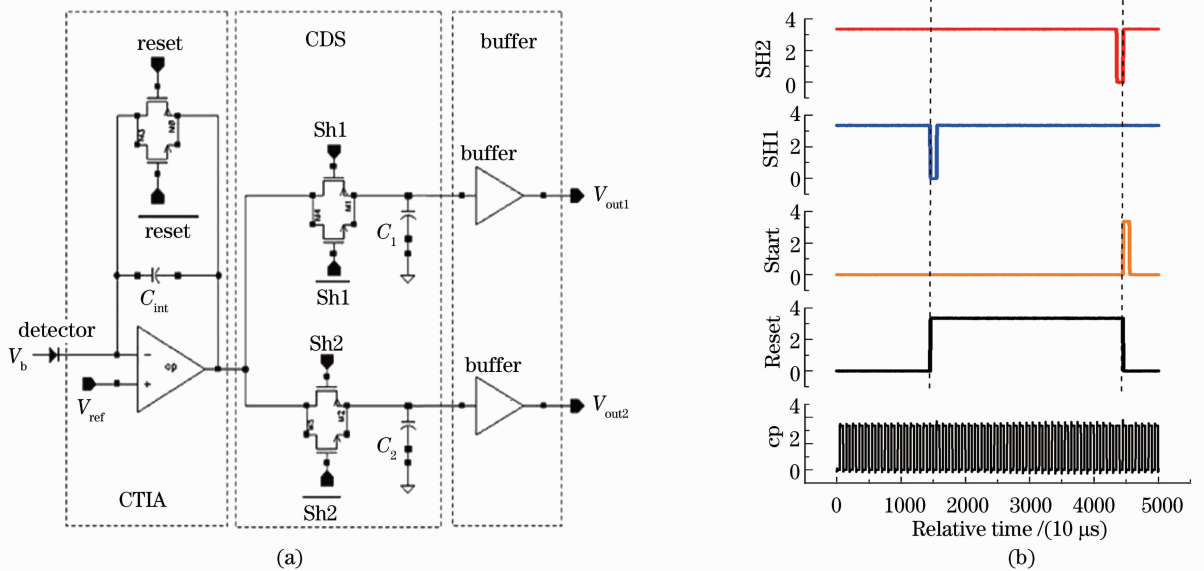


图 5 HgCdTe 线阵单元读出的电路结构(a)和工作时序图(b)

Fig. 5 (a) Structure and (b) working time sequence of linear array detector's readout circuit

当器件正常工作时,未辐照像素 V1 信号输出的是复位电压,且输出电压不变;辐照像素 V1 信号输出包含小部分光信号积分,随着光强的增大,逐渐上升最终达到饱和,如图 3 中  $P=1.7 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$  输出曲线所示。但实验中发现当激光功率增大到一定程度时,未辐照像素的基底信号不仅有响应,且出现具有一定变化规律的整体响应。

#### 3.2 未辐照像素存在信号响应的机理分析

##### 3.2.1 器件外部光学结构的影响

实验中 HgCdTe 线阵探测器前有小孔光阑、GaAs 衬底。激光通过小孔光阑时,会产生基尔霍夫衍射。常见的光场衍射公式可表示为

$$E(x, y) = A \exp(-r^2/\omega^2), \quad (1)$$

$$E'(x', y') = \frac{-i}{\lambda} \iint E(x, y) \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{1 + \cos \theta}{2} dx dy. \quad (2)$$

式中  $E(x, y)$  和  $E'(x', y')$  分别表示入射光场和衍射光场分布,  $k$  为波数,  $r$  为光阑处入射光场至衍射光场距离,  $\theta$  为  $r$  与光传播方向夹角。

采用单一波长高斯光近似, 光阑直径为 1 mm, 光阑距离线阵探测像素为 76 mm。对激光通过光阑后, 在线阵探测像素上的光场分布进行了计算, 结果如图 6 所示。当激光辐照阵列中心时, 阵列最边缘未辐照像素与辐照中心像素的光强相差 5 个量级。  $P=1.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$  时辐照像素 V1 开始存在微小响应, 以最大辐照功率密度  $P=7.8 \text{ W/cm}^2$  为例, 最多影响像素数约为 121 个, 其他低于探测光响应阈值的未辐照像素不会出现光响应, 因此光阑衍射不是造成 V1 整体电压响应的原因。

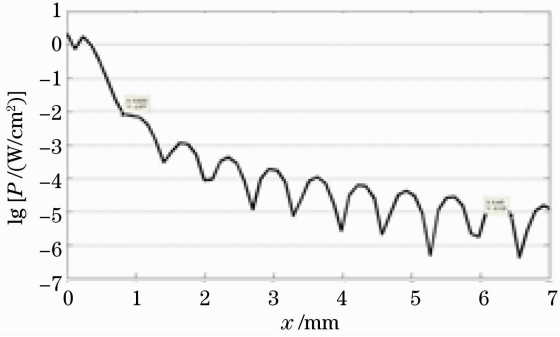


图 6 激光通过光阑后光强的对数分布  
Fig. 6 Intensity logarithmic distribution of laser passing through small circular aperture

另外, 由于实验条件不一定能保证激光理想地垂直入射, 倾斜的光线可以通过 GaAs 衬底表面的多次反射沿横向蔓延, 有可能使未辐照单元受到光照影响。本文以最大功率密度  $P=7.8 \text{ W/cm}^2$ , 噪声有效功率  $P_{\text{NEP}}=1.3 \times 10^{-9} \text{ W}$ , 衬底厚度  $d=0.35 \text{ mm}$  进行计算, 当倾斜角  $\theta=10^\circ$  时, 影响像素数

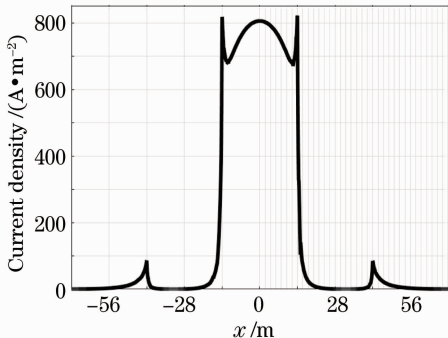


图 7 横向电流密度分布曲线

Fig. 7 Distribution curve of transverse current density

为 6 个, 表明这种机制影响非常小, 可以忽略不计。

### 3.2.2 器件内部结构的影响

根据器件工作原理, 探测器采用零压偏置, 产生的光生载流子首先在 P 区局部, 载流子在向 N 区扩散的同时, 也会有横向方向的扩散。横向方向扩散的电子会继续向不同方向扩散, 采用 Comsol 对零偏压时光生载流子的二维扩散模型进行了仿真计算。光垂直入射在中心像素上, 单个像素线度为  $28 \mu\text{m}$ , 观察相邻未辐照像素的光电流响应。仿真结果表明, 如图 7 所示, 相邻未辐照像素与辐照像素响应光电流的比值约为 4%, 那么间隔为  $n$  个像素数的未辐照像素与辐照像素的光响应电流约为  $(4/100)^{n+1}$ , 当  $n > 2$  时未辐照的光响应电流可以忽略不计, 因此这种机制的影响非常有限。而本文探测器采用  $\text{N}^+$ -on-P 型结构, 其单个像素结构如图 1(a) 所示, 利用分子束外延 (MBE) 方法在 GaAs 衬底上生长出掺杂的 P 型 HgCdTe 层, 然后采用离子注入法形成 PN 结, 在离子注入区, P 型外延层转变为 N 型。实际 HgCdTe 器件阵列结构如图 1(b) 所示, 两行 PN 结错开成品字形排列, PN 结之间无其他隔离措施, 采用公共 P 极结构, 因此若当辐照像素引起 P 极电压  $V_b$  变化时, 将导致整列像素的 P 极电压发生变化, 进而会引起未辐照像素出现整体电压响应。

### 3.2.3 电路结构的影响

COMS 混合集成电路中的串扰效应<sup>[11]</sup> 与制造工艺和设计技术有着非常密切的联系。相邻电路之间的近场耦合和相隔较远的电路之间通过芯片衬底的耦合<sup>[11]</sup> 以及焊接线和管脚寄生电阻 R、电感 L、寄生电容 C 形成 RLC 网络都会对电路造成串扰。通过实际测量, 这种电路串扰机制也比较小, 大约为几个百分点, 对相隔 3 个以上的像素响应就已经很微弱了, 因此也不是反常响应现象的主要原因。而在电路结构中, 每个像素的参考电压  $V_{\text{ref}}$  由同一根电线提供, 因此若当辐照像素引起  $V_{\text{ref}}$  变化时, 将导致整列像素的参考电压发生变化, 进而会引起整列像素存在电压响应。

### 3.2.4 温升的影响

当探测器受到激光辐照时, 器件的温度会发生变化, 通过求解热扩散方程可以得到探测器的温度场分布。热扩散方程为

$$C_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + Q_j, \quad (3)$$

式中下标  $j$  从激光入射方向分别对应 GaAs 衬底层、HgCdTe 芯片层、前胶层、宝石基板层、后胶层、Cu 层。

$T_j$  为各层温度,  $Q_j$  为各层激光产生的热源,  $C_j$ ,  $\rho_j$  和  $k_j$  分别为各层的热容、密度和热导率。探测器表面处入射激光束的光斑直径大于阵列探测器的宽度, 因此采用芯片垂直方向以及像素排列方向的简化二维热

传导模型进行了计算。当激光垂直入射在光敏芯片中心时 Comsol 仿真结果如图 8 所示, 其中光斑直径为 1 mm, 功率密度为  $7.8 \text{ W/cm}^2$ , 辐照时间为 2 s。

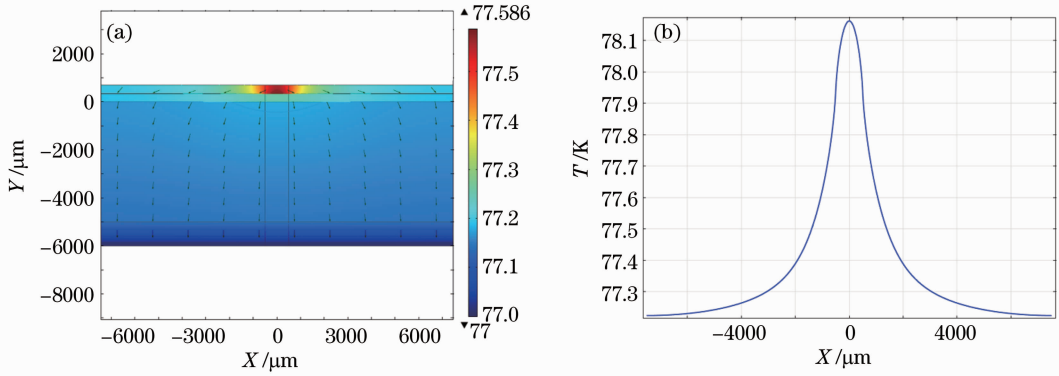


图 8 (a)探测器各层温度场分布;(b) HgCdTe 芯片层表面温度场分布

Fig. 8 Temperature fields of (a) each layer of detector and (b) surface of HgCdTe irradiated by laser

从图 8(b)可以看出, 当以最大激光功率密度  $7.8 \text{ W/cm}^2$  辐照时, HgCdTe 芯片层温度最高仅上升 1.2 K, 对未辐照像素的载流子浓度, 迁移率不会造成多大的影响, 因此温度的影响可以忽略。因此, 器件外部光学结构、温升虽然对串扰效应有影响, 但是作用甚微, 更无法解释实验中基底信号的整体变化现象。认为芯片内部公共 P 极结构、电路共用  $V_{\text{ref}}$  电压结构是造成基底信号反响应的根本原因。

### 3.3 基底信号反响应机理分析

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。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:

$$I = -I_p + I_d, \quad (4)$$

$$I_0 = q \left( \frac{D_n n_{p_0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n_0}}{L_p} \right), \quad (5)$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_b - V_{\text{ref}}}{nkT} \right) - 1 \right], \quad (6)$$

运算放大器(OPA)后的输出电压为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} - \frac{I t}{C_{\text{int}}}, \quad (7)$$

式中  $I_p$  为光电流,  $I_d$  为暗电流,  $k$  为波尔兹曼常数,  $I_0$  为反向饱和电流,  $V_b$  和  $V_{\text{ref}}$  分别为探测单元 P 极和 N 极电压,  $L_n$  和  $L_p$  分别为电子和空穴扩散长度,  $D_n$  和  $D_p$  分别为电子和空穴扩散系数,  $n_{p_0}$  和  $p_{n_0}$  分别为热平衡状态下 P 区少子电子浓度和 N 区少子空穴浓度,  $C_{\text{int}}$  为积分电容。将(4)式代入(7)式可得

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} + \frac{I_p t}{C_{\text{int}}} - \frac{I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_b - V_{\text{ref}}}{nkT} \right) - 1 \right] t}{C_{\text{int}}}. \quad (8)$$

可见电压值  $V_b - V_{\text{ref}} > 0$  正偏时, 探测器的暗电流对信号的读取准确度将产生较大的影响, 因此在实际工作中常常需要  $V_{\text{ref}}$  等于  $V_b$  电压, 器件处于零偏工作状态。

从 CTIA 电路结构可以看出, 当辐照像素的积分电容  $C_{\text{int}}$  饱和时, 光生电荷不能再转移到积分电容, 此时相当于开路, 辐照像素将产生开路电压(如图 9 所示), 进而影响整列像素公共 P 极的偏置电压  $V_b$  和 N 极的参考电压  $V_{\text{ref}}$ 。早有文献[12]对激光辐照单元 PV 型 HgCdTe 探测器的开路电压进行了实验研究, 随着入射光功率密度的增大, 探测器的光响应输出结果会从线性响应、到极短的饱和过度区、到混沌效应、到零压输出效应的几种演化过程。文献[13]通过实验得到了短波 PV 型 HgCdTe 出现以上演化过程的激光功率密度范围, 如表 1 所示。

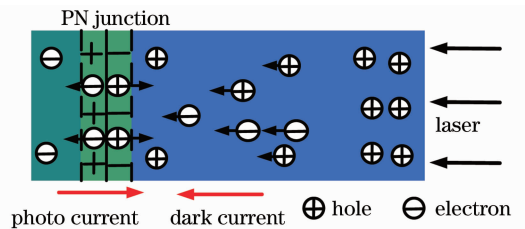


图 9 二极管工作方式示意图

Fig. 9 Schematic diagram of work way of diode  
激光功率密度首先要使辐照像素的积分电容达到饱和后, 才能使其出现开路电压, 因此辐照像素出现表 1 所示的  $V_{\text{oc}}$  演化过程所需的功率密度要大。当功率密度为  $1.7 \times 10^{-2} \sim 1.1 \text{ W/cm}^2$  时  $V_{\text{oc}}$  上升, 进而引起整列像素的偏置电压  $V_b$  上升和参

表 1 两种 PV 型 HgCdTe 探测器在不同功率密度范围内的响应  
Table 1 Response of two PV HgCdTe detectors under various laser power

Detector	Linearity /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Saturation /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Chaos /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Zero-output /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
No. 1	<0.23	0.23~0.53	3.5~5.0	12.7
No. 2	<0.18	0.19~0.53	3.5~6.0	14.3

考电压  $V_{\text{ref}}$  下降,根据读出电路输出电压 (7) 式得出未辐照像素的电压响应值下降,并在  $P=1.1 \text{ W/cm}^2$  时,最终下降为零,设此时开路电压为零界点  $V_{\text{oc}}=V_0$ ;当功率密度为  $1.1\sim 5.9 \text{ W/cm}^2$  时  $V_{\text{oc}}$  经历继续上升、饱和、过饱和和下降直至零界点  $V_0$  的过程,由于电路的限制输出电压最低为零电位,因此  $V_1$  输出维持为零;当功率密度为  $5.9\sim 7.8 \text{ W/cm}^2$  时  $V_{\text{oc}}$  继续下降并出现震荡,导致整列像素的偏置电压  $V_b$  下降和参考电压  $V_{\text{ref}}$  上升,未辐照像素的电压响应值上升,同时  $V_b$  和  $V_{\text{ref}}$  的震荡会形成一种噪声源<sup>[13]</sup>,耦合到探测器的输出,如图 3 中  $P=7.8 \text{ W/cm}^2$  所示,未辐照像素电压输出响应值上升,并且噪声增大。

### 3.4 噪声增加机理分析

除了  $V_b$  和  $V_{\text{ref}}$  的震荡会给信号输出带来噪声外,光伏型红外探测器的噪声还包括散粒噪声、热噪声、 $1/f$  噪声。分析仅有扩散暗电流和背景光电流的情况下,散粒噪声可以表示为<sup>[14]</sup>

$$I = I_d - I_{\text{ph}}, \quad (9)$$

$$\bar{I}_n^2 = 2q \left\{ I_0 \left[ \exp\left(q \frac{V_b - V_{\text{ref}}}{nkT}\right) + 1 \right] + I_{\text{ph}} \right\} \Delta f, \quad (10)$$

式中  $I_{\text{ph}} = \eta Q_B A$ ,由背景光子通量  $Q_B$  提供, $A$  是探测面积。因此当辐照像素的积分电容饱和时,随着激光功率的进一步上升,会导致整像素的端压  $V_{\text{oc}}$  上升逐渐,由 (6) 式可知暗电流增大,由 (10) 式得出散粒噪声增强;同时,处理电路产生的像元复位 (KTC) 噪声,固定平面噪声, $1/f$  噪声<sup>[15,16]</sup> 也有相应增大。从图 3 可以明显看出,当激光功率为  $7.75 \text{ W/cm}^2$  时,信号输出响应曲线的噪声明显增大。至于哪种噪声占主要地位,还有待进一步研究分析。

## 4 结 论

阵列探测器未辐照像素基底信号出现的反常响应现象,本文从器件的外部光学结构、器件内部结构、电路结构和温升等方面进行了深入研究,结果表明器件内部的公共 P 极结构和电路共用  $V_{\text{ref}}$  电压结构是造成这一反常现象的主要原因。当辐照像素的积分电容饱和时,随着光功率密度的进一步增加,辐照像素产生的开路电压  $V_{\text{oc}}$  引起整列像素的偏置电

压  $V_b$  以及  $V_{\text{ref}}$  发生变化,从而导致未辐照像素出现整体电压信号响应。随着光功率密度的增大, $V_{\text{oc}}$  会出现从线性上升、到饱和、到过饱和和下降,混沌、到零压输出的几种过程,从而引起未辐照像素  $V_1$  信号出现从下降、到(由于电路限制)维持零压、到上升输出的现象;同时,研究发现,处理电路产生的 KTC 噪声,固定平面噪声, $1/f$  噪声、 $V_b$  和  $V_{\text{ref}}$  电压的震荡以及暗电流增大导致探测器散粒噪声的增加,与大功率激光辐照时探测器输出响应曲线噪声增大的现象密不可分,但具体探测器和电路噪声各占比重多少,还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 M. Kruer, L. Esterowitz, R. Allen *et al.*. Thermal models for laser damage in InSb photovoltaic and photoconductive detectors [J]. *Infrared Phys.*, 1976, **16**(3): 375~384
- 2 E. J. Yoffa. Role of carrier diffusion in lattice heating during pulsed laser annealing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(1): 37~38
- 3 D. M. Kim, D. L. Kwong. Laser heating of semiconductors-effect of diffusion in nonlinear dynamic heat transport progress [J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(8): 4995~5006
- 4 D. M. Kim, D. L. Kwong. Pulsed laser annealing of single-crystal and ion implanted semiconductors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(2): 224~232
- 5 Ma Liqin, Cheng Xiang'ai, Lu Qisheng *et al.*. Research of chaos in HgCdTe (PV) detectors induced by  $1.319 \mu\text{m}$  laser [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(1): 61~63  
马丽芹,程湘爱,陆启生等.  $1.319 \mu\text{m}$  激光诱导 HgCdTe (PV 型) 探测器混沌的研究 [J]. *激光与红外*, 2003, **33**(1): 61~63
- 6 Jiang Tian, Cheng Xiang'ai, Jiang Houman *et al.*. Investigation of the response mechanism of photovoltaic semiconductor with sub-bandgap photons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 107305  
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): 107305
- 7 Fu Bo, Zhang Cuijuan, Luo Fei *et al.*. Studies on pulsed laser induced damage of silicon on insulator material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1413~1417  
付 博,张翠娟,罗 飞等. 脉冲激光对绝缘体上硅材料的损伤机理研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1413~1417
- 8 Zhu Zhiwu, Cheng Xiang'ai, Si Lei *et al.*. Numerical modeling of optical field characteristic of monolayer film irradiated by femtosecond laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0102003  
朱志武,程湘爱,司 磊等. 飞秒脉冲激光入射单层光学薄膜的光场特性数值模拟 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0102003
- 9 Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui *et al.*. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214006  
邱冬冬,张 震,王 睿等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0214006

- 10 Fang Dan. Skill analysis of readout intergrated circuits of IRFPA [J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(2): 23~28  
方丹. 红外焦平面阵列读出电路技术分析[J]. 红外技术, 2004, **26**(2): 23~28
- 11 Dong Gang, Yang Yintang. Crosstalk effects in mixed-signal CMOS IC[J]. *Semiconductor Technology*, 2002, **27**(10): 34~37  
董刚, 杨银堂. CMOS混合信号集成电路中的串扰效应[J]. 半导体技术, 2002, **27**(10): 34~37
- 12 Cheng Xiang' ai, Lu Qisheng, Ma Liqin *et al.*. Experimental study of HgCdTe(PV) detector irradiated by CW 1.319  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 622~626  
程湘爱, 陆启生, 马丽芹等. 1.319  $\mu\text{m}$ 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
- 13 Lin Yancheng, Xiao Gonghai, Shu Rong. Effects of bias voltage on the performance of solar-blinded AlGaIn [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(3): 260~263  
林言成, 肖功海, 舒嵘. 偏置电压对日盲型AlGaIn探测器性能的影响[J]. 激光与红外, 2010, **40**(3): 260~263
- 14 Zhu Junhao. *Narrow Energy Gap Semiconductor Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 811~812  
褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 811~812
- 15 Jin Xiangliang, Chen Jie, Qiu Yulin. Low-power loe-noise correlated double sampling circuit for CMOS image sensor[J]. *J. Circuits and Systems*, 2003, **8**(3): 24~27  
金湘亮, 陈杰, 仇玉林. 一种低功耗噪声相关双取样电路的研究[J]. 电路与系统学报, 2003, **8**(3): 24~27
- 16 Shen Xiaoyan. Methods of canceling noises in CMOS read-out integrated circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(6): 659~661  
沈晓燕. 消除CMOS读出电路噪声方法研究[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(6): 659~661

栏目编辑: 何卓铭