

激光辐照 HgCdTe 探测器输出特性与软损伤判定

范永杰¹, 秦 强²

(1. 昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 根据 PV 探测器的开路输出公式, 建立了涵盖长波、中波、短波的 HgCdTe 探测器响应模型。模型仿真发现探测器被激光辐照后产生的温升将降低探测器的输出, 探测器被激光直接照射后会立即产生饱和输出。综合实际应用提出了探测器软损伤的判断门限。

关键词: HgCdTe; 红外探测器; 激光器; 软损伤; 激光辐照

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2020)09-0829-04

HgCdTe Detector Output Characteristics and Soft Damage Determination under Laser Irradiation

FAN Yongjie¹, QIN Qiang²

(1. School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Based on the open-circuit output function of a photovoltaic (PV) detector, the response model of a HgCdTe detector that is operable in the long-wave, medium-wave, and short-wave bands is established. Simulation results show that the temperature rise generated by laser irradiation reduces the output of the detector, and the detector produces a saturated output immediately upon direct irradiation by the laser. Based on practical applications, the threshold of soft damage to the detector is proposed.

Key words: HgCdTe, infrared detector, laser, soft damage, laser irradiation

0 引言

HgCdTe 是重要的红外探测器制造材料。不同的材料组分可以分别接收从长波到短波的红外辐射, 进而可以制造不同响应波长的器件。激光作为一种重要的光电对抗手段已经得到了广泛的应用。随着光电对抗的技术发展, 研究激光辐照 HgCdTe 探测器的损伤情况, 对于攻守双方都有着很强的必要性。

国内已有不少对于激光辐照 HgCdTe 探测器损伤情况的研究。国防科技大学的马丽芹、程湘爱等, 对激光辐照 HgCdTe 探测器的混沌现象进行了相关研究^[1]。装备指挥技术学院的李修乾等进行了 HgCdTe 探测器的激光辐照响应特性研究^[2]。北京信息科技大学的牛春晖等人进行了激光辐照探测器热传导的模拟研究^[3-4]。

以往的理论及仿真研究的不足有: 主要针对某一波长的探测器响应; 主要针对单元探测器没有考虑面阵探测器; 没有考虑未受到照射的像元所受的影响; 主要研究探测器的硬损伤情况, 没有考虑软损伤(软

故障)的评价等。

我们的研究将针对目前使用最广的 HgCdTe 红外探测器, 主要研究当激光辐照探测器还未出现硬损伤时, 探测器的响应变化对使用的影响, 当影响使得探测器无法满足使用时, 我们认为探测器进入软故障。我们在 PV 探测器开路响应^[5-6]基础上建立的模型将包含短波、中波、长波 3 个波段的情况; 将分别讨论由于激光照射后产生的温升对像元响应的影响, 以及被直接照射的像元响应的影响。我们还将根据模型和实际使用经验提出软故障的判定条件。

1 探测器开路响应模型

PV 型探测器的开路电压包含 3 个部分: 光生电动势, 探测器表面底面温差电动势, 以及 Dember 电动势(P-N 结电子空穴扩散形成的电动势)。由于 Dember 电动势很弱, 在此忽略, 认为最终的开路电压 V_0 可表示为^[5-6]:

$$V_0 = V_L + V_S + V_T \quad (1)$$

收稿日期: 2020-01-16; 修订日期: 2020-07-10.

作者简介: 范永杰(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理以及光电检测方面的研究与教学工作。E-mail: 47883027@qq.com.

通信作者: 秦强(1980-), 男, 研究员, 研究方向为红外技术。E-mail: 149578363@qq.com.

式中: V_L 为激光辐照产生的光生电动势; V_S 为场景辐射产生的光生电动势; V_T 为温差电动势。

1.1 光生电动势

光生电动势表达式^[6]为:

$$V_{LS} = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{q + \sqrt{kT\mu_p / e\tau_p n_i^2 / (N_D + n_i)}}{q \frac{n_i^2}{(N_D + n_i)(N_A + n_i)} + \sqrt{kT\mu_p / e\tau_p n_i^2 / (N_D + n_i)}} \right] \quad (2)$$

$$q = \frac{\eta}{h\nu} \sqrt{D_n \tau_n} P \quad (3)$$

$$D_n = \mu_n kT / e \quad (4)$$

$$n_i = \frac{(1 + 3.25kT / (E_g)) \times 9.56 \times 10^{14} \times 1.5T^{3/2}}{1 + 1.9E_g^{3/4} \exp(E_g e / (2kT))} \quad (5)$$

$$E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4 \quad (6)$$

$$\mu_p \approx \mu_n = 2.82 \times 10^9 \times T^{-2.2} \quad (7)$$

式中: V_{LS} 为激光/场景光生电动势; T 为温度; $k = 1.3806488 \times 10^{-23}$ 为 Boltzmann 常数; τ_p 、 τ_n 为电子空穴的平均寿命, $\tau_n \approx \tau_p = \tau = 10^{-7}$ s; 施主和受主浓度 $N_D = 2 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $N_A = 2 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$; 电子电荷 $e = 1.60217733 \times 10^{-31}$; 电子空穴迁移率 $\mu_p \approx \mu_n$; 本征载流子浓度 n_i ; h 为普朗克常数; ν 为入射光频率; x 为材料组份; E_g 为禁带宽度; P 为辐照光功率; D_n 为电子扩散系数; η 为量子效率。

1.2 温差电动势

温差电动势表达式^[6]为:

$$V_T = -\frac{k}{e} \left(\ln \frac{N_c}{N_D} + 2 \right) \Delta T \quad (8)$$

$$N_c = 2(2\pi m_n^* kT / h^2) \quad (9)$$

$$m_n^* = 0.05966 \frac{E_g (E_g + 1)}{E_g + 0.667} \quad (10)$$

式中: V_T 为温差电动势; T 为温度; ΔT 为探测器顶底温差; 施主和受主浓度 $N_D = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$; m_n^* 为电子有效质量; E_g 为禁带宽度。

2 不同工作温度下的像元输出特性

以接收温度为 25°C (298 K) 的场景辐射作为基准正常工作状态, 以该温度下的黑体辐射近似替代场景辐射, 并假设此时探测器全部接收相应波段内场景辐射。常规探测器响应波段为: 长波段 ($7.7 \mu\text{m} \sim 9.5 \mu\text{m}$); 中波段 ($3.7 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$); 短波段 ($0.8 \mu\text{m} \sim$

$2.5 \mu\text{m}$)。

根据黑体的光子光谱辐射出射度^[5] $M_o(\lambda, T)$:

$$M_o(\lambda, T) = \left(\frac{\lambda}{hc} \right) \cdot \left(\frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \right) \quad (11)$$

式中: c_1 、 c_2 分别为第一、第二辐射常数。

各波段内接受到的辐射功率, 示意图 1。

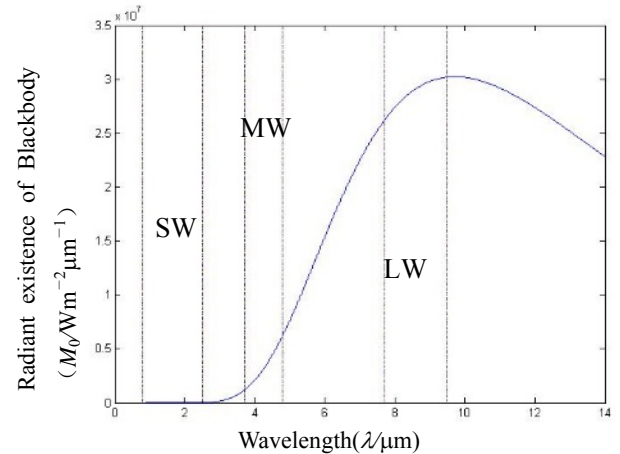


图1 298 K 各波段内黑体辐射出射度

Fig.1 Radiant existence of Blackbody at 298 K

长波:

$$P_{LW} = \int_{7.7\mu\text{m}}^{9.5\mu\text{m}} M_o(\lambda, 298\text{K}) d\lambda = 54.850 \text{ W/m}^2 \quad (12)$$

中波:

$$P_{MW} = \int_{3.7\mu\text{m}}^{4.8\mu\text{m}} M_o(\lambda, 298\text{K}) d\lambda = 3.6741 \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

短波:

$$P_{SW} = \int_{0.8\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} M_o(\lambda, 298\text{K}) d\lambda = 0.0024 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

根据第 1 章内容, 不同工作温度下探测器对场景辐射的输出开路电压可简化为:

$$V_O = V_S(T, P_S) + V_T(\Delta T) \quad (15)$$

即当探测器参数固定以后其输出主要和工作温度, 以及接收到的辐射量有关系。

由于探测器 PN 结的厚度很薄, 约为 $8 \mu\text{m}$, 通过仿真发现, 即使被激光照射其上下表面的温差非常小, 即 $\Delta T \approx 0$, 则 $V_T(\Delta T)$ 趋于 0。

通过以上公式我们发现, 探测器的响应区别, 除了工作温度不同, 主要源于探测器组份的不同。探测器组份为 x ^[5], 长波时 x 为 0.20, 中波时 x 为 0.285, 短波时 x 为 0.41。可以得到如图 2 的开路电压仿真结果。结果表明, 探测器的开路电压会随着工作温度逐

渐降低。

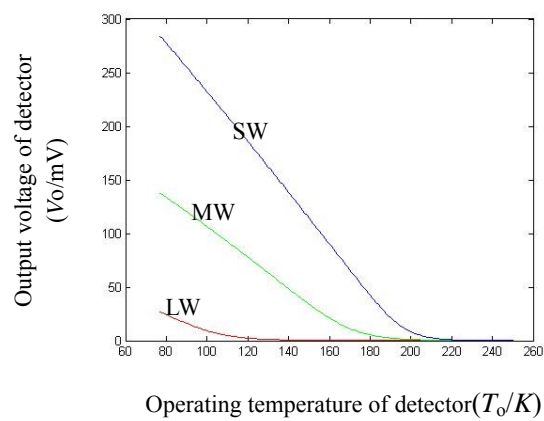


图2 探测器输出电压与工作温度关系

Fig.2 The relationship between output voltage and operating temperature of detector

3 探测器软故障判定

3.1 直接接受激光辐照的像元区域的软故障判定

相比自然景物的辐射，如公式(12)计算结果，激光有着极高的辐射功率，如 15 W 低功率 CO₂ 激光器，波束直径 7 mm，辐照功率可达 $3.89 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。若用激光照射热像仪，考虑光学系统的聚焦效果，到达探测器的辐照功率还会大幅地增加。此时激光直接照射到的探测器像元会产生大量的光生载流子，使得输出马上进入输出饱和状态，失去了探测能力，实质上进入一种软故障状态。

3.2 探测器温升与软故障判定

当探测器接受到激光辐照后，将会吸收激光能量产生温升，这种温升不会局限于受光照的像素，只要能量充足，就会引起整个探测器的工作温度上升，这是激光辐照影响探测器性能另外一个主要的因素。

在探测器制作完毕后通常装入液氮制冷的杜瓦中进行测试，此时工作温度为 77 K，中波、短波探测器有着较高的输出。而探测器进行集成封装以后的工作温度通常需要考虑性能和经济性，在性能可以接受的

情况下，工作于较高的温度，如长波探测器工作于 80 K，中波探测器工作于 90 K，短波探测器工作于 190 K。

在信号检测中通常采用 3 db (50%) 门限，在此我们将探测器的软故障的判定阈值定为，以正常工作温度下的输出为基准，当由于工作温度升高引起探测器输出下降至正常值一半时的探测器工作温度。具体门限则根据实际工作状态进行适当浮动。

通过仿真计算，以及综合探测器实际工作情况可将探测器的软故障温度阈值定为长波探测器 110 K，中波探测器 120 K，短波探测器 200 K。各个温度点的探测器输出仿真计算值，如表 1 所示。

4 结论

通过以上的仿真计算我们可以发现，当对应波长激光照射到探测器时，探测器可以出现两种软故障：

- ①被直接照射的像元会马上进入输出饱和状态，立即失去探测能力进入软故障状态；
- ②像元的响应会随着激光照射后引起的工作温度升高，而逐步降低，直至失去探测能力，出现故障。经过仿真计算，并结合实际的工作经验，我们将探测器由于工作温度升高引起的软故障温度门限定为长波 110 K，中波 120 K，短波 200 K。

通过本次仿真我们还可以发现，探测器的工作温度对探测器的响应有着很重要的影响。对于长波探测器而言，其输出幅度本身较低，因此需要严格控制工作温度，应该尽量降低探测器读出电路的功耗，避免在探测器底部形成局部的高温区，影响探测器的性能。对于一些特殊要求，可以通过进一步降低工作温度以提高探测器性能。

对于中波、短波器件由于其本身输出较高，特别是中波探测器完全可以工作在一个较高的温度下 (140 K~160 K)，这样可以大幅降低制冷机的性能要求，开发出性能满足要求、体积功耗更低的探测器。

表 1 探测器主要工作温度点及软故障阈值温度下的输出电压

Table 1 Operating temperature thresholds and output of detectors

Components of detectors x	T_o/K	Cutoff wavelength/ μm	Output of detector/mV	Detector working condition
LW $x=0.20^{[5]}$	77	10	26.6	smoothly
	80	10	24.138	smoothly
	110	10	9.296	soft fault
MW $x=0.285^{[5]}$	77	5	137.698	smoothly
	90	5	120.24	smoothly
	120	5	77.87	soft fault
SW $x=0.41^{[5]}$	77	2.5	284.19	smoothly
	190	2.5	21.68	smoothly
	200	2.5	8.31	soft fault

参考文献:

[1] 马丽芹, 程湘爱, 许晓军等. PV 型 HgCdTe 光电探测器中的混沌及其诊断[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 38-40.

MA Liqin, CHENG Xiang'ai, XU Xiao'jun, et al. Chaos and its diagnosis in pv-type HgCdTe detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 38-40.

[2] 李修乾, 焦彦平, 江天, 等. HgCdTe 探测器的激光辐照响应特性研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(2): 113-116.

LI Xiuqian, JIAO Yanping, JIANG Tian, et al. The Study on the Response Character of HgCdTe Detectors Under Laser Irradiation[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2004, 15(2): 113-116.

[3] 栗兴良, 牛春晖, 马牧燕. 10.6μm 激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究[J]. 红外技术, 2016, 38(1): 6-9.

LI Xingliang, NIU Chunhui, MA Muyan. Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6 μm wavelength[J]. Infrared Technology, 2016, 38(1): 6-9.

[4] 张悦, 牛春晖, 李晓英. 10.6μm 激光对碲化铟红外探测器的热损伤研究[J]. 红外技术, 2018, 40(6): 528-533.

ZHANG Yue, NIU Chunhui, LI Xiaoying. Research on the thermal damage of InSb infrared detector under wavelength of 10.6μm laser irradiation[J]. Infrared Technology, 2018, 40(6): 528-533.

[5] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

ZHU J H. Narrow-bandgap semiconductor physics[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[6] 贺元兴, 江厚满. 激光辐照下 PV 型 HgCdTe 探测器反常响应机理[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1233-1237.

HE Yuanxing, JIANG Houman. Abnormal response of PV-type HgCdTe detector under intense laser irradiation[J]. High power laser and particle beams, 2008, 20(8): 1233-1237.

《红外技术》首届青年编委招募启事

《红外技术》首届青年编委甄选工作开始了。如果您是有激情、有活力、有想法的科研工作者, 如果您是
想为红外光电子领域做些贡献的有志青年, 请加入我们! 让我们共同学习, 共同进步, 一起为红外光电子领域的
成果发表和推广做些事情, 一起为《红外技术》期刊的发展做出贡献。

《红外技术》(Infrared Technology)是由中国兵器工业集团公司主管, 昆明物理研究所和中国兵工学会夜
视技术专业委员会主办, 国内外公开发行的光电子领域科技期刊。《红外技术》创刊于 1979 年, 迄今已有 40
多年的历史, 是我国光电子领域科技期刊中创刊最早的刊物之一, 期刊是中国科学引文数据库(CSCD)来源
期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊, 已被 JST 日本科学技术振兴机构数据库收录。收稿内容为与红外光
电子研究相关的前沿新技术、新材料和新工艺, 涵盖材料、光学、机械、电子和信息工程等领域。

青年编委条件:

1. 年龄在 45 岁以下;
2. 有一定的学术影响力;
3. 以第一作者或通信作者在国内外权威期刊上发表论文不少于 5 篇;
4. 有较强的中英文写作能力和语言表达能力;
5. 有时间与精力为期刊工作;
6. 已取得博士学位。



青年编委的权利:	青年编委的义务:
<div>1. 入选编委后颁发青年编委聘书, 聘期为 2 年;</div> <div>2. 青年编委本人的文章或推荐文章在审稿通过后可以优先发表;</div> <div>3. 贡献突出者可以考虑聘为编委;</div> <div>4. 我刊各种资源平台可以为青年编委进行宣传。</div>	<div>1. 积极为期刊的发展与推广出谋划策, 能提出具体措施或落实行动;</div> <div>2. 参加学术会议时, 积极推介期刊;</div> <div>3. 聘期内能为期刊组织或参与组织一个专题的组、约稿;</div> <div>4. 能为期刊撰写稿件;</div> <div>5. 积极参与期刊的审稿工作;</div> <div>6. 积极参加期刊主办或协办的各项学术会议;</div> <div>7. 积极参加期刊的青年编委会会议。</div>

报名方式:

请于 2020 年 10 月 30 日前, 访问 <https://www.wjx.top/jq/90678902.aspx> 或扫描上方二维码填写申请表。
《红外技术》编委会将于 2020 年 12 月 30 日前, 确认和公布青年编委名单, 并颁发聘书。