

TEA-CO₂ 激光辐照 HgCdTe 图像传感器的实验研究

雷 鹏 李 化 卞进田 聂劲松

(电子工程学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 利用 TEA-CO₂ 激光对碲镉汞(HgCdTe)图像传感器的干扰和损伤现象进行了实验研究, 分析了干扰和损伤机理。探测器上激光能量密度小于 255 mJ/cm² 时, 饱和像素仅出现在光斑区域, 激光能量密度为 425.8 mJ/cm² 时, 像素被损伤, 观察到了弥散斑和暗环等现象。建立了探测器的激光辐照模型, 计算了探测器的温升, 讨论了温升与载流子浓度、迁移率的关系。分析认为, 弥散斑的出现是探测器升温产生的热激发载流子浓度扩散所致, 暗环的出现是迁移率与载流子浓度扩散共同作用的结果, 像素的损伤则是因为温升导致汞的析出。

关键词 激光技术; HgCdTe 图像传感器; 干扰损伤; 热效应; 迁移率

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0214002

Experimental Study of HgCdTe Imaging Sensor Irradiated by TEA-CO₂ Laser

Lei Peng Li Hua Bian Jintian Nie Jinsong

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract The disturbance and damages of TEA-CO₂ laser to HgCdTe imaging sensor are researched experimentally and theoretically. The saturation of pixels of the HgCdTe detector just appears inside the facula when the energy density on it is less than 255 mJ/cm². Pixels are damaged when the energy density is 425.8 mJ/cm², and a dispersed spot and a dark ring are observed. By the simulation of the HgCdTe detector under CO₂ laser irradiation, the temperature distribution of the detector is calculated. The relationship among temperature-rise, carrier density and mobility of the detector is discussed. The dispersed spot occurs because of free carriers excited by heat diffuse under carrier density grades. The dark ring appears because of both of the mobility changing and carrier density diffusing. Hg atoms separate out from the detector due to their high temperatures, resulting in the pixels damage.

Key words laser technique; HgCdTe imaging sensor; disturbance and damage; thermal effect; mobility

OCIS codes 140.3330; 140.3538; 350.1820

1 引 言

碲镉汞(HgCdTe)光电探测器由于其灵敏度高、响应频带宽和响应时间短等许多优点, 已经在军事和民用领域得到了广泛的应用, 然而 HgCdTe 探测器极易受到激光辐照的干扰甚至破坏, 以致不能正常工作, 因此研究激光对其作用的机理具有重要意义。目前关于不同波段激光对 HgCdTe 单元探测器的辐照研究较多^[1~4], 对出现的各种干扰、损伤

现象有较为深入的分析, 另外激光对 HgCdTe 晶体的损伤实验也多有报道^[5,6], 但是关于 HgCdTe 图像传感器的激光辐照实验报道却相对较少。相对于单元探测器, 图像传感器结构发生了较大的变化, 研究的侧重点也有所不同, HgCdTe 图像传感器像素很容易被激光饱和^[7], 大功率激光辐照也可以使器件完全失效^[8]。本文介绍了 TEA-CO₂ 激光对长波红外 HgCdTe 图像传感器的干扰损伤实验, 随着激

收稿日期: 2012-07-11; 收到修改稿日期: 2012-09-19

作者简介: 雷 鹏(1987—), 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: leipeng0214@sina.com

导师简介: 聂劲松(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电技术方面的研究。E-mail: njs7001@sina.com(通信联系人)

光能量的变化,出现了一些新的现象,并对实验现象做了初步的解释。

2 模型的建立

为了计算探测器的温升,建立了激光辐照探测器的理论模型。实验所用红外图像传感器的探测器为光伏型 HgCdTe 红外焦平面器件。探测器的组成包括衬底材料 CdZnTe、光敏材料 HgCdTe、铟(In)柱阵列、硅(Si)读出电路、宝石电路板以及杜瓦冷头 Kovar 合金。In 柱单元之间充入环氧树脂, Si 读出电路与宝石电路板之间的胶接材料也为环氧树脂^[9,10]。为了简化计算,将探测器看作半径为 4 mm 的圆柱体,其对称结构如图 1 所示。

衬底对 10.6 μm 激光的反射率为 21%,吸收系数约为 200 m^{-1} ,有大约 70%的激光能量透过衬底。HgCdTe 光敏层对 10.6 μm 激光的反射率为 31%,吸收系数为 $1 \times 10^5\text{ m}^{-1}$ ^[5]。In 柱对 10.6 μm 激光的反射率较高,在此不考虑 In 柱对激光的吸收。环

氧树脂对 10.6 μm 激光的反射率为 5%,吸收系数为 510 m^{-1} ^[11]。透过环氧树脂层的激光能量很小,不考虑辐照在读出电路上的激光能量。因此,模型中考虑衬底、HgCdTe 层以及环氧树脂层对激光的体吸收。模型的初始条件与边界条件均为 77 K。器件的各膜层材料参数如表 1 所示。

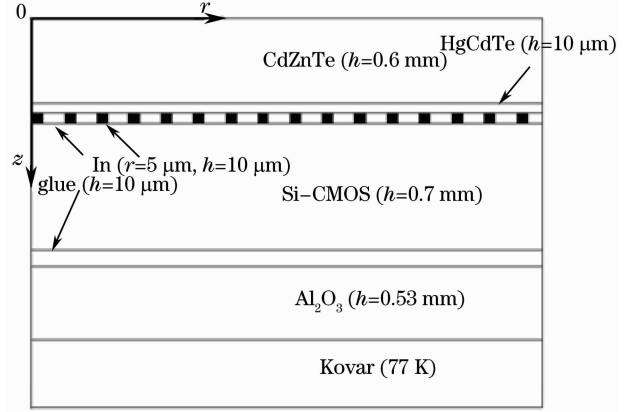


图 1 HgCdTe 红外焦平面器件模型

Fig. 1 Model of HgCdTe infrared focal plane device

表 1 器件的各膜层材料参数

Table 1 Typical parameters of materials

	CdZnTe	HgCdTe	Glue	Si-CMOS	Al ₂ O ₃	In
Density / (kg·m ⁻³)	5680	7600	1250	2330	3980	7310
Heat conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.97	20	0.2	250	70	82.061
Heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	159	150	1530	550	500	237.6

3 实验系统

实验所用 HgCdTe 图像传感器为液氮制冷,输出帧频为 50 Hz,积分时间为 200 μs ,探测器为 320 pixel \times 256 pixel 的面阵,像素中心间距为 30 μm ,响应波长范围为 7.55~9.75 μm ,对 10.6 μm 激光的响应率为 10%以下,读出电路为 CMOS。图像传感器光学镜头对 10.6 μm 激光的透射率为 0.1516。TEA-CO₂ 激光器的工作频率为 1~20 Hz,激光能量 1~2 J,脉宽

在 90 ns 左右。

实验装置如图 2 所示。激光经分束,一路送激光能量计进行测量,另一路经光学衰减片组到达探测器,用计算机采集实验图像。为保证图像传感器对激光脉冲响应,图像传感器与激光器均采用外同步工作状态。通过改变衰减片组,改变到达光学镜头时的入瞳激光能量。

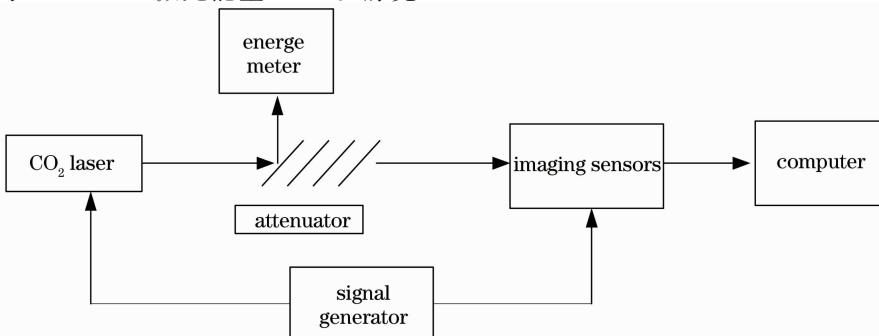


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

4 实验结果

当入瞳激光能量范围为 $4.1 \times 10^{-4} \sim 1.09$ mJ 时,实验图像如图 3(a)所示,激光辐照时出现亮斑,激光脉冲过后,图像传感器的下一帧图像恢复到正常工作状态。亮斑面积及灰度值在上述激光能量范围内均没有明显的变化,认为亮斑面积即是光斑面积,光斑内像素已经处于饱和状态,光斑面积约为

$0.18 \text{ mm} \times 0.36 \text{ mm}$ 。

当入瞳激光能量为 3.45 mJ 时,激光辐照时出现弥散斑,其面积远大于激光光斑,如图 3(b)所示,弥散斑直径在 5.5 mm 左右。辐照结束后,发现像素被损伤,如图 3(c)所示,无激光辐照时,受损像素的灰度值较正常像素高,分析图像传感器对不同亮度背景的响应,发现受损像素的灰度也有一定变化。

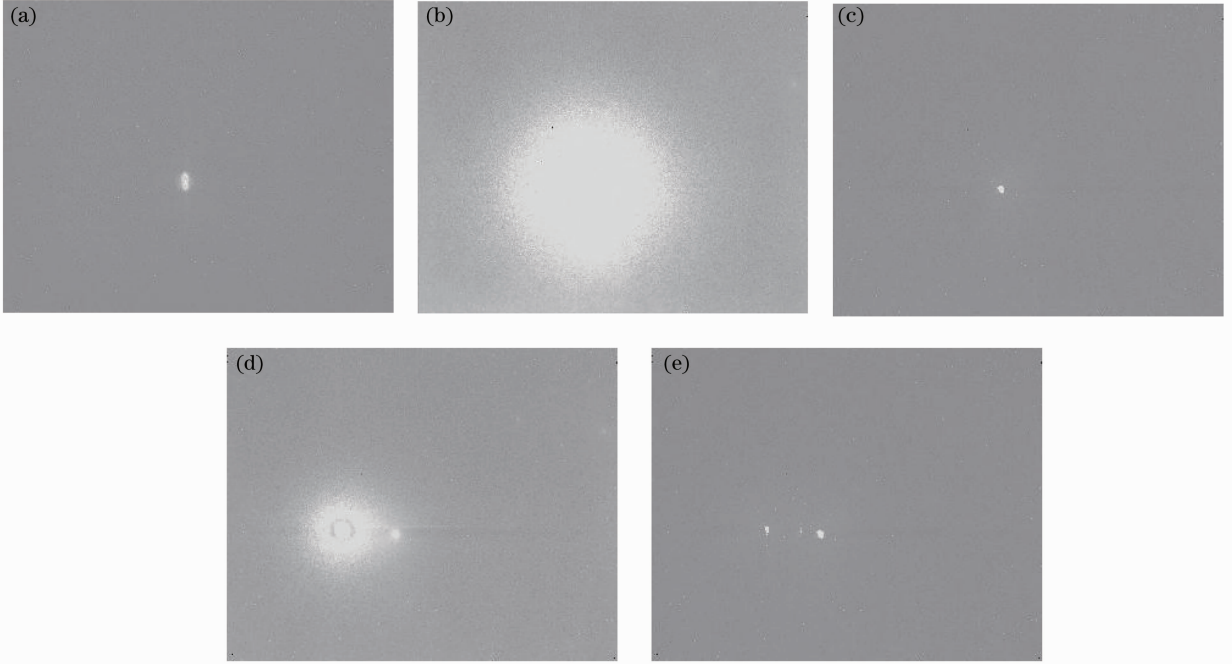


图 3 激光对图像传感器的干扰和损伤。(a) 激光辐照图像($4.1 \times 10^{-4} \sim 1.09$ mJ); (b) 激光辐照图像(3.45 mJ); (c) 像素损伤(3.45 mJ); (d) 激光辐照图像(1.82 mJ); (e) 像素损伤(1.82 mJ)

Fig. 3 Effects of CO₂ laser disturbance and damages to imaging sensor. (a) Imaging sensor irradiated by CO₂ laser at $4.1 \times 10^{-4} \sim 1.09$ mJ; (b) imaging sensor irradiated by CO₂ laser at 3.45 mJ; (c) injury pixels (3.45 mJ); (d) imaging sensor irradiated by CO₂ laser at 1.82 mJ; (e) injury pixels (1.82 mJ)

改变衰减片组,入瞳激光能量为 1.82 mJ,像素同样受到了损伤。激光辐照时的图像如图 3(d)所示,弥散斑直径为 3 mm 左右,在弥散斑内还出现一圈暗环,图 3(e)中受损像素面积小于图 3(b),此外在实验中发现了不太明显的串扰现象。

斑区域,而当激光能量为 1.82 mJ 时,弥散斑直径已经达到 3 mm,饱和像素数与激光能量的变化不成比例,排除了光电效应引起弥散斑的可能。

根据光学镜头对 10.6 μm 激光的透射率以及探测器上的光斑面积,计算出探测器上激光能量密度如表 2 所示。

表 2 探测器上激光能量密度

Table 2 Laser energy density on the detector surface

Incident laser energy /mJ	Laser energy density /(mJ/cm ²)
$4.1 \times 10^{-4} \sim 1.09$	0.096~255
1.82	425.8
3.45	807.1

5 分析与讨论

对于入瞳激光能量在 $4.1 \times 10^{-4} \sim 1.09$ mJ 范围内出现的像素饱和现象,分析认为主要是光电效应引起,激光辐照产生的电子-空穴对在扩散过程中被 pn 结分开,n 区电子浓度达到饱和^[12]形成了像素饱和现象。

对于实验中出现的弥散斑,应该主要是由热效应造成的。因为根据激光能量与光斑面积的关系来看,当激光能量为 1.09 mJ 时,饱和像素仅出现在光

运用有限元分析软件 Ansys 对激光辐照探测器的温升进行计算。当探测器面上激光能量密度为 425.8 mJ/cm² 时,探测器像素光敏层内温度达到

356 K。在探测器积分时间内,光敏层内径向热传导距离为 60 μm 左右,而亮斑直径在 3 mm 以上,所以亮斑应该不是热传导造成的。探测器的温升还可能使光敏层出现大量的热激发载流子,形成载流子浓度扩散,使周围像素载流子浓度升高,n 区电子浓度随之升高,影响像素输出电压,输出图像出现一个远大于光斑面积的亮斑。

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 本征载流子浓度与温度的关系为^[13]

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

式中禁带宽度 $E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4$ (eV),玻尔兹曼常数 $k_b = 8.625 \times 10^{-5}$ (eV/K)。针对本实验所用长波红外 HgCdTe 探测器, $x = 0.2$, 其计算结果如图 4 所示。从图中可以看出,温度达到 300 K 以后, n_i 将迅速上升。当 n_i 大于 p 区杂质浓度 n_a , 对周围出现了明显的载流子浓度梯度时,就会形成载流子浓度扩散。

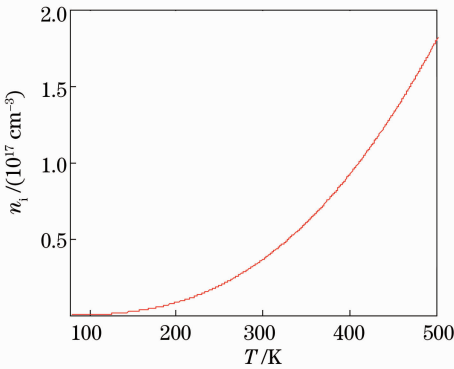


图 4 本征载流子浓度 n_i 随温度变化关系

Fig. 4 Relationship between intrinsic carrier concentration (n_i) and temperature

电子迁移率远大于空穴,在计算中仅考虑电子迁移率。当光敏层光斑内温度达到 356 K 时, n_i 约为 $6.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 大于 n_a 的典型参数值 ($10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 出现载流子浓度扩散。HgCdTe 的热传导系数为 $0.175 \text{ cm}^2/\text{s}$, 在激光脉冲作用时间内, HgCdTe 的热传导距离远小于光斑尺寸; 载流子浓度扩散系数 $D_n = \mu_n \cdot k_b \cdot T_n/q$, 在 356 K 时, D_n 约为 $227 \text{ cm}^2/\text{s}$, 且 D_n 随着温度的下降而升高, 载流子浓度扩散的速度远大于 HgCdTe 的热传导速度。因此, 在载流子浓度扩散的过程中, 认为其外部环境为 77 K, 载流子寿命 τ 可达微秒量级。载流子浓度扩散长度^[14]为 $(D_n \cdot \tau)^{1/2}$, 扩散长度约为 1 mm, 与实验结果

较一致。当入瞳激光能量增大时, n_i 也随之增大, τ 将减小, 但是载流子浓度恢复正常需要更长的时间, 扩散距离也就更远, 光斑更大。

初步认为, 暗环的出现是 n_i 与载流子迁移率 μ 共同作用的结果, n_i 因扩散自光斑中心向外下降, μ ^[13] 则随着温度的下降而上升。在光斑区域内, 即使激光能量很小, 产生的光电子仍能使像素饱和, n 区电子浓度达到最大, 因此不用考虑 n_i 和 μ 的影响。在光斑外, 像素 n 区收集的电子主要来自于 n_i 的扩散。激光辐照过后, 由于在 τ 内光敏层径向热传导深度为 10 μm 左右, 光斑外围径向的像素之间温差幅度可达到几十开尔文, 因此这些像素之间 μ 变化很大。接近光斑的像素 μ 很低, 降低了像素 n 区对热激发电子收集的效率(用 η 表示); 稍微远离光斑的像素 μ 迅速增大, 增大的速度超过了 n_i 下降的速度, 使 η 迅速上升, 因此在光斑外围, 存在 η 的极小值。当激光能量较小时, 光敏层温升减小, n_i 随之减小, 对于相同的温度变化, μ 增大的速度小于 n_i 减小的速度, 因此, 在 η 处于极小值的像素上, n 区电子浓度有可能低于饱和阈值, 在亮斑里面出现一个暗环。

损伤的像素仍然能响应不同的背景辐照, 说明 In 柱并没有受到损坏。数值分析表明, 当脉冲激光能量密度为 $425.8 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时, 光敏层温度达到 356 K, 超过了 Hg 析出的温度^[15], Hg 的析出会在材料中造成空位^[12]。从实验中看, 受损像素灰度值升高, 在低背景下也能产生高的灰度响应, 应该是因为 Hg 的析出造成空位, 导致暗电流和漏电流增加, 使像素探测性能受到影响。

6 结 论

利用 TEA- CO_2 激光辐照 HgCdTe 图像传感器, 观察到了激光对传感器的干扰与损伤现象。通过计算探测器的温升, 对弥散斑、暗环以及像素损伤做了初步的分析。认为温度达到一定程度使热激发载流子浓度急剧增加, 形成载流子浓度梯度, 出现了载流子浓度扩散, 产生了弥散斑; 迁移率与热激发载流子的浓度扩散共同作用使光斑外像素 n 区存在对热激发电子收集效率的极小值, 进而影响到了像素的输出电压, 使亮斑里面可能出现暗环; 当激光能量密度为 $425.8 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时, 计算得知光敏层达到了 Hg 析出的温度, 使光敏材料性能受到损伤, 在低亮度背景下也能产生高的灰度响应。

参 考 文 献

- 1 Cheng Xiang'ai, Lu Qisheng, Ma Liqin *et al.*. Experimental study of HgCdTe (PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 622~626
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 Ma Liqin, Cheng Xiang'ai, Xu Xiaojun *et al.*. Chaos and its diagnosis in PV-type HgCdTe detector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 37~39
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): 37~39
- 3 Li Xiujian, Cheng Xiang'ai, Lu Qisheng *et al.*. The study on the response character of HgCdTe detectors under laser irradiation [J]. *J. Academy of Equipment Command & Technology*, 2004, **15**(2): 113~116
李修乾, 程湘爱, 陆启生等. 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
- 4 Lu Qisheng, Jiang Zhiping, Liu Zejin *et al.*. The memory effect of PC type HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 1998, **17**(4): 317~320
陆启生, 蒋志平, 刘泽金等. PC 型 HgCdTe 探测器的记忆效应 [J]. *红外与毫米波学报*, 1998, **17**(4): 317~320
- 5 Cai Hu. Investigation of High Intensity Pulsed TEA-CO₂ Laser-Induced Damage on Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te Wafer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 15~89
蔡 虎. TEA-CO₂ 脉冲强激光对 Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te 晶片的破坏研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 15~89
- 6 C. S. Chen, A. H. Liu, G. Sun *et al.*. Analysis of laser damage threshold and morphological changes at the surface of a HgCdTe crystal [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(1): 88~92
- 7 H. M. A. Schleijsen, A. Dimmeler, B. Eberle *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 65431B
- 8 Wang Siwen, Li Yan, Guo Lihong *et al.*. Analysis on the disturbance of CO₂ laser to long-wave infrared HgCdTe detector [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2010, **29**(2): 102~104
王思雯, 李 岩, 郭立红等. CO₂ 激光对长波红外 HgCdTe 探测器干扰的分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(2): 102~104
- 9 Fan Guangyu, Gong Haimei, Li Yanjin *et al.*. Temperature-cycling-reliability of IRFPA device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 607~610
范广宇, 龚海梅, 李言谨等. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究 [J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 607~610
- 10 Hu Xiaoning, Zhang Haiyan, Li Yanjin *et al.*. Thermal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on Si substrates [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(11): 1020~1022
胡晓宁, 张海燕, 李言谨等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(11): 1020~1022
- 11 Ren Yue, Hua Ping, Gong Rongzhou. Materials with low infrared emissivity based on epoxy resin [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, **34**(2): 45~48
任 玥, 华 萍, 龚荣洲. 基于环氧树脂的低红外发射率材料研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, **34**(2): 45~48
- 12 Sun Chengwei. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 343~408
孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 343~408
- 13 Chu Junhao. Narrow-Bandgap Semiconductor Physics [M]. Beijing: Science Press, 2005. 933~934
储君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 933~934
- 14 Li Li. Research on Semiconductor Detectors Irradiated by In-Band and Out-Band Laser Beams [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 83~84
李 莉. 双波段组合激光辐照光电探测器的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. 83~84
- 15 Jiang Zhiping, Liang Tianjiao, Lu Qisheng *et al.*. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detectors when irradiated by laser [J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(4): 155~156
蒋志平, 梁天骄, 陆启生等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器热效应的计算 [J]. *应用激光*, 1995, **15**(4): 155~156

栏目编辑: 宋梅梅