

doi:10.3788/gzxb20134207.0787

室温中红外 HgCdTe 光导探测器响应率的 温度特性

冯国斌¹, 张检民², 杨鹏翎², 王群书², 安毓英¹

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

(2 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

摘要:为了评定基于室温中红外 HgCdTe 光导探测器的氟化氘激光阵列靶斑仪系统的测量不确定度, 需要对 HgCdTe 光导探测器响应率的温度特性进行定量分析. 理论分析了室温中波红外 HgCdTe 光导探测器响应率与温度和波长的关系, 得出了在一定范围内探测器响应率可以近似表示为温度和波长变量分离函数形式的假设. 采用波长为 3.8 μm 和 1.31 μm 激光光源, 分别测量了在一 40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +30 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内室温中波红外 HgCdTe 探测器响应率变温特性, 实验结果验证了在测量不确定度范围内假设的正确性. 基于此结论, 提出了一种高效标定 HgCdTe 光导探测器在氟化氘激光波长处响应率温度特性的实用方法.

关键词: 中红外探测器; 光导探测器; HgCdTe; 响应率; 温度特性

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0787-5

Responsivity Variation with Temperature of Uncooled Mid-infrared HgCdTe Photoconductive Detector

FENG Guo-bin¹, ZHANG Jian-min², YANG Peng-ling², WANG Qun-shu², AN Yu-ying¹

(1 Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To measure the mid-infrared deuterium fluoride laser irradiance distribution, a laser beam profile diagnostic system based on uncooled mid-infrared HgCdTe photoconductive detector array is developed. Because the mid-infrared detector is very sensitive to work temperature, it is necessary to quantitatively analyze its temperature characteristics for evaluating the measuring uncertainty of the system and providing the criterion of selecting the satisfactory detector. The responsivity of HgCdTe photoconductive detector related with temperature and wavelength is analyzed. It is deduced that the responsivity can be expressed as a variable-separate function of temperature and wavelength under special conditions. The assumption is validated by the experiment, of which the responsivity of uncooled mid-infrared HgCdTe photoconductive detector in (-40 ~ +30) $^{\circ}\text{C}$ is measured with 3.8 μm and 1.31 μm lasers. Based on the results, a simple and practical method to measure the temperature characteristic of the responsivity of uncooled MIR HgCdTe detector is presented.

Key words: Mid-infrared detector; Photoconductive detector; HgCdTe; Responsivity; Temperature characteristic

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室 (No. SKL111103) 资助

第一作者: 冯国斌 (1971-), 男, 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为强激光测量和辐照效应. Email: fgb02@163.com

导师 (通讯作者): 安毓英 (1941-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为激光技术. Email: anyy@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2013-03-22; 录用日期: 2013-06-05

0 引言

中红外波段由于在各个领域广泛的应用需求,一直以来都是研究的热点^[1-4].与之相对应的常见室温中红外光电探测器件有光导型 HgCdTe、PbSe、InSb 等,其中 Hg_{1-x}Cd_xTe 三元合金材料可随其合金组分 x 变化而改变其禁带宽度,受到了更多的关注^[5-7],并且已成为在中远红外探测器最重要的半导体材料^[8-11].基于 HgCdTe 材料制作的室温光导探测器,具有探测率高、响应速度快等优点,在激光测量、红外探测和红外告警等系统中得到了广泛应用^[12-14].

为了测量中红外氟化氙激光(波长范围为 3.6~4.2 μm)远场辐照度时空分布,本文采用室温中红外 HgCdTe 光导探测器研制了一种强激光阵列靶斑仪^[5].由于中红外探测器对工作温度较敏感,为了评定系统测量不确定度,有必要对探测器性能变温特性进行定量分析,同时可为器件筛选提供依据.目前有关室温 HgCdTe 光导探测器在不同波长下其响应率随温度变化特性的研究文献较少,且探测器生产厂家一般不提供探测器的变温特性数据.本文从应用需求出发,对昆明物理所生产的一种 n 型室温中红外 HgCdTe 光导探测器响应率的变温特性进行了理论分析和实验研究.

1 探测器响应特性理论分析

室温 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器典型结构如图 1.

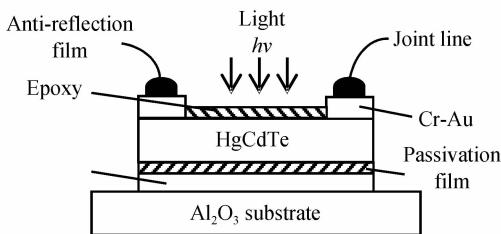


图 1 光导型探测器结构

Fig. 1 Schematic of photoconductor detector

对于 n 型 HgCdTe 光导探测器,空穴浓度远低于电子浓度,迁移率亦如此,可不考虑空穴作用.考虑采用扩展电极后,电极对电流在器件中的分布有影响.此时,器件的元阻抗 R_D 为

$$R_D(T) = \frac{\alpha L}{en_0(x, T)\mu(x, T)Wd} \quad (1)$$

式中, α 为与器件电极结构有关的常数; L 为光敏元的长度; W 为光敏元的宽度; d 为光敏元的厚度; x 为探测器中 C_d 的组份; T 为探测器芯片温度; $\mu(x, T)$ 为电子迁移率; $n_0(x, T)$ 为热平衡载流子浓度; e 为电子电荷量.

褚君浩等学者据本征吸收光谱推得,在 $0.19 \leq x \leq 0.433$ 和 $4.2 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$ 范围内,禁带宽度 E_g 与 C_d 组分 x 及温度 T 的关系,如式(2)^[8].

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

在 $x = 0.19 \sim 0.29$ 和 $T = 77 \sim 300 \text{ K}$ 范围内,热平衡载流子浓度 $n_0(x, T)$ 可由经验公式表示为^[8]

$$n_0(x, T) = \frac{(1 + 3.25k_b T) \times 9.56 \times 10^{14} E_g^{1.5} T^{1.5}}{1 + 1.9E_g^{3/4} \exp(E_g/2k_b T)} \quad (3)$$

式中, k_b 为玻尔兹曼常数.

HgCdTe 电子迁移率在高低温区域分别由晶格振动散射和电离杂质散射起主导作用,在 $T \geq 50 \text{ K}$, $0.2 < x < 0.6$ 条件下,电子迁移率 $\mu(x, T)$ 近似为^[15]

$$\mu(x, T) = 9 \times 10^8 (0.2/x)^{7.5} T^{-2(0.2/x)^{0.6}} \quad (4)$$

当 HgCdTe 光导探测器工作于恒流电路中时,可得出探测器在小信号条件下响应率 R_V 为

$$R_V = \frac{\alpha^2 \tau \eta \lambda}{ehcn_0^2(x, T)\mu(x, T)W^2 d^2} I_B = \left(\frac{\alpha^2 I_B}{ehcW^2 d^2} \right) \times \left(\frac{\tau}{n_0^2(x, T)\mu(x, T)} \right) \times (\eta \lambda) \quad (5)$$

式中 I_B 为偏置工作电流, η 为量子效率, λ 为辐照光波长, h 为普朗克常数, c 为光速, τ 为载流子寿命.

HgCdTe 材料非平衡载流子有俄歇复合、辐射复合、Shockley-Read 复合三种复合机制.室温下或组分较小时,体寿命主要由俄歇复合决定.对于 n 型半导体,俄歇复合过程起主导作用,载流子寿命是组分与温度函数.载流子寿命随着组分 x 增大而增大,对不同组分 x ,载流子寿命在一定温度存在最大值,在室温工作范围内,载流子寿命一般随温度升高而减小^[8].

在短波截止限与峰值响应波长的光谱范围内,量子效率与材料光谱吸收率相关,是波长的函数.一种简化的近似是假定在波长小于 λ_p 的所有光子的量子效率是常数,对于波长大于峰值波长小于截止波长光束,由于材料的光吸收系数迅速下降,等效量子效率快速下降为零,是波长的强相关函数.峰值波长和截止波长是组分 x 、温度 T 和样品厚度 d 的函数,可以表示为^[8]

$$\lambda_c = \frac{a(T)}{x - b(T) - c(T)\lg(d)} \quad (6)$$

$$\lambda_p = \frac{A(T)}{x - B(T) - C(T)\lg(d)} \quad (7)$$

式中: $a(T) = 0.7 + 6.7 \times 10^{-4} T + 7.28 \times 10^{-8} T^2$,
 $b(T) = 0.162 - 2.6 \times 10^{-4} T - 1.37 \times 10^{-7} T^2$,
 $c(T) = 4.9 \times 10^{-4} + 3.0 \times 10^{-5} T + 3.51 \times 10^{-8} T^2$,
 $A(T) = 0.7 + 2.0 \times 10^{-4} T + 1.66 \times 10^{-8} T^2$,
 $B(T) = 0.162 - 2.8 \times 10^{-4} T - 2.29 \times 10^{-7} T^2$,

$C(T) = 3.5 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-5} T - 5.85 \times 10^{-8} T^2$.
该式适用于 $0.16 < x < 0.60$, 以及 $5 \mu\text{m} < d < 200 \mu\text{m}$.

定性分析式(5)可知,对于特定的探测器而言,它的 C_d 组份和样品厚度等几何参数是确定值,此时探测器响应率 R_V 可表于为波长和温度函数.一般而言,载流子寿命 τ 、热平衡载流子浓度 n_0 和电子迁移率 μ 为温度 T 函数,且与入射光的波长无关或者弱相关性.因此认为,在一定条件下有如下假设:当探测波长位于短波截止限与峰值波长光谱范围内时, R_V 有可能进行变量分解,分别表示为波长函数 $G(\lambda)$ 和温度函数 $F(T)$, 如式(8).

$$R_V(T, \lambda) = \frac{\alpha^2 \tau \eta \lambda}{chcn_0 \mu W^2 d^2} I_B = C_0(T)(\lambda) \quad (8)$$

式中, C_0 为与探测器参数相关的常量.

为了验证假设适用性,选用昆明物理所研制的 n 型室温中红外 HgCdTe 光导探测器进行了响应率变温特性测量实验.由于材料生产工艺限制,制作中远红外探测器的 HgCdTe 芯片原材料组分不均匀,通常 C_d 组分值 x 分布在 $0.20 < x < 0.30$ 范围内,样品厚度一般为 $15 \mu\text{m}$.将此作为输入条件代入式(6)和(7),计算得到 HgCdTe 材料截止波长和峰值波长随温度变化结果如图 2.

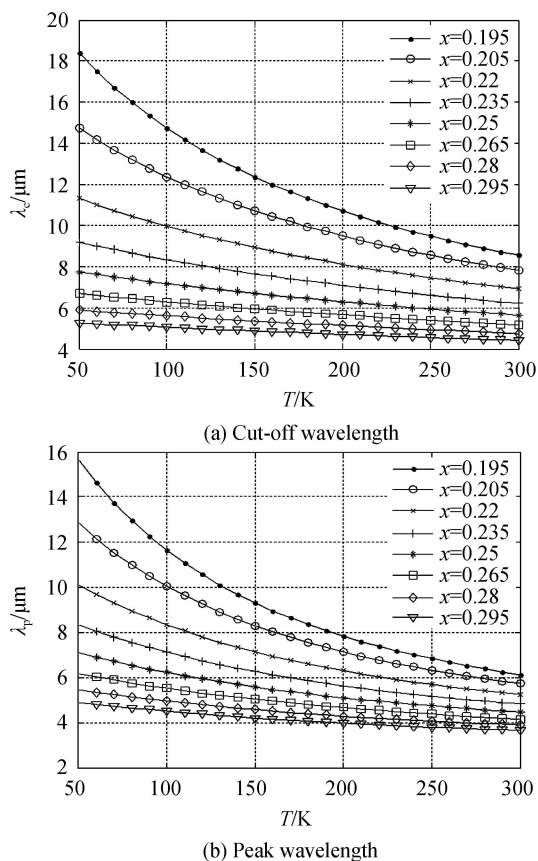


图 2 探测器响应的截止波长与峰值波长随温度变化计算结果

Fig. 2 Cut-off wavelength and peak wavelength of detector responsivity related to temperature change

从计算结果可知,所选用的探测器(根据昆明物理所提供参考数据, C_d 组分值 x 在 $0.20 < x < 0.25$ 范围内)在室温附近峰值响应波长大于氟化氙激光(波长范围为 $3.6 \sim 4.2 \mu\text{m}$)的光谱上限.为了分析该型探测器响应率温度变化特性,实验测量了探测器响应特性.

2 探测器响应率温度变化特性测量

2.1 实验设计

由理论定性分析,初步认为在一定温度变化范围内探测器响应率可以实现温度和波长函数变量分离.如果探测器在 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $1.31 \mu\text{m}$ 等不同波长处响应率随温度变化特性满足等比定标律,则在一定测量不确定度范围可采用 $1.31 \mu\text{m}$ 处探测器响应率温度变化特性作为探测器对 DF 激光波长的温度响应特性.由于 $1.31 \mu\text{m}$ 光源及光纤器件等性能优良,从而可给响应率温度特性标定实验带来极大方便.因此,从昆明物理研究所研制的一批 HgCdTe 光导探测器中随机抽取 20 支,分别测量了 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $1.31 \mu\text{m}$ 波长下探测器响应率随温度变化特性.图 3 为实验设计原理框图.

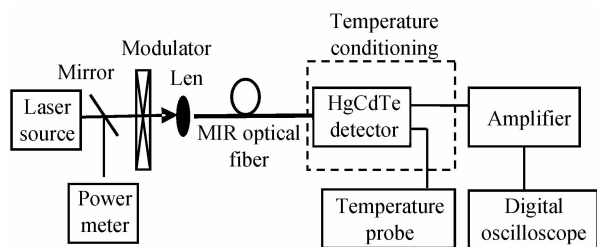


图 3 不同波长下探测器响应率变温特性测量框图
Fig. 3 Schematic diagram for measuring responsivity of HgCdTe detector related with temperature variation at different wavelength

激光光源分别采用波长 $3.8 \mu\text{m}$ 、输出功率 5 W 的小型放电泵浦 DF 激光器和波长 $1.31 \mu\text{m}$ 功率、 30 mW 带光纤输出的半导体激光器.功率计用于实时监测激光器输出功率.调制器为机械斩波器,用于对连续激光束进行调制以便信号检测.中红外光纤为硫化物光纤,工作波段范围为 $1 \sim 6 \mu\text{m}$,通过氟化钙透镜将激光耦合进光纤,然后传导到温控箱内探测器.温控装置可以实现 $-70 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的恒温控制,控温精度 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.温度探头用于实时监测探测器处温度,测量分辨力 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.示波器采用数字化示波器,用于测量探测器输出调制波形电压幅值.

由于所研制测量系统实际工作的环境温度范围为 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +30 \text{ }^\circ\text{C}$,因此,实验中只测量了此温度范围内的探测器响应率变化特性.此实验目的是分析不同波长下探测器响应率随温度相对变化规律,故

实验中只要求激光器输出功率固定且注入到探测器上的功率处在探测器线性工作区,通过调节温控箱温度,测量探测器输出幅值随温度相对变化。

2.2 实验数据

表1给出其中3只典型探测器的实测结果,表中的数据已利用监测功率值分别对两种波长下测量电压幅值进行了归一化处理。

表1 实测的典型结果

Table 1 Typical results of the measurement

Detector	T/ (°C)	Results for		$V_{3.8}/$ $V_{1.31}$
		3.8 μm $V_{3.8}/\text{mV}$	1.31 μm $V_{1.31}/\text{mV}$	
S01-144	30.1	177	172	1.03
	20.0	192	200	0.96
	10.0	268	268	1.00
	0.0	349	360	0.97
	-10.1	398	428	0.93
	-20.0	632	620	1.02
	-30.1	814	840	0.97
	-39.8	1 267	1 280	0.99
S01-193	30.2	103	124	0.83
	20.1	109	136	0.80
	10.0	129	172	0.75
	0.0	208	260	0.80
	-10.1	269	340	0.79
	-20.0	349	420	0.83
	-30.1	464	580	0.80
	-39.9	664	810	0.82
S01-062	30.1	152	190	0.80
	20.0	205	270	0.76
	10.1	248	330	0.75
	0.1	365	440	0.83
	-10.0	498	630	0.79
	-20.1	656	820	0.80
	-30.2	940	1 160	0.81
	-40.1	1 169	1 480	0.80

2.3 结果分析

若式(8)成立,则可得 3.8 μm 和 1.31 μm 两种波长激光输入下探测器对应的输出电压值比值 $V_{3.8}(T)/V_{1.31}(T)$ 为一常量,即

$$\frac{V_{3.8}(T)}{V_{1.31}(T)} = \frac{R_V(T, 3.8)P_{3.8}A}{R_V(T, 1.31)P_{1.31}A} = \frac{C_0 F(T)G(3.8)P_{3.8}}{C_0 F(T)G(1.31)P_{1.31}} = \frac{G(3.8)P_{3.8}}{G(1.31)P_{1.31}} \quad (9)$$

式中, A 为放大器的增益; $P_{3.8}$ 和 $P_{1.31}$ 分别注入探测器的 3.8 μm 和 1.31 μm 激光功率。

引入电压值比值测量不确定度的主要来源有: 1.31 μm 光源功率不稳定引入的测量不确定度为 3%; 3.8 μm 光源功率不稳定引入的测量不确定度为 8%; 示波器的测量不确定度 3%; 温度量精度为 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 时引入的测量不确定度约为 2%; 光学机械平

台引入测量不确定度可忽略; 放大电路增益引入测量不确定度可忽略。综上所述,合成的测量不确定度约为 9%。

从表1中可看出,典型测量结果比值相对偏差均不大于 8%,因此可认为在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +30^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,波长 3.8 μm 和 1.31 μm 下响应率变化关系符合式(8)的假设,即两者比值只与温度相关。

2.4 探测器响应率温度变化特性标定方法

为了标定中红外 HgCdTe 探测器响应率随温度变化特性,以前实验中采用氟化物红外光纤引入 DF 激光到温控箱中进行测量。由于氟化物中红外光纤脆性大、加工难、成本高,目前无成熟的光纤多路复用器件,因而标定时采用单路引入方式,一次温度循环只能标定一支器件,实验效率低。通过本文的测量实验,验证了所用的室温中红外探测器响应率在波长 3.8 μm 和 1.31 μm 下温度变化特性符合波长等效定标关系。基于此认识,建立了一种基于 1.31 μm 半导体二极管激光(Laser Diode, LD)光源和商用光纤器件的中红外探测器响应率变温特性的标定方法,测量原理如图4。

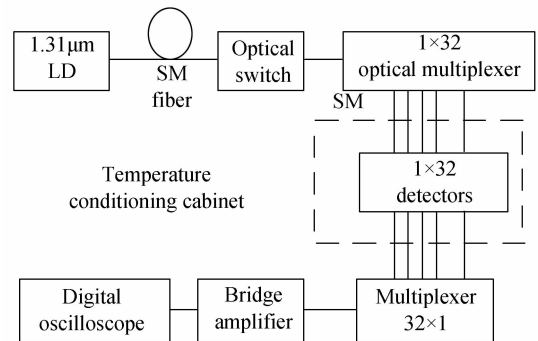


图4 探测器 1.31 μm 响应率变温特性测量原理
Fig. 4 Schematic diagram for measuring responsivity of detector related with temperature variation at 1.31 μm

此方法优点是利用成熟的 1.31 μm 波段光纤器件实现了多路复用工作模式,提高了标定效率;利用高稳定的 1.31 μm 半导体激光光源,降低了标定环节测量不确定度。图5为典型测量结果。

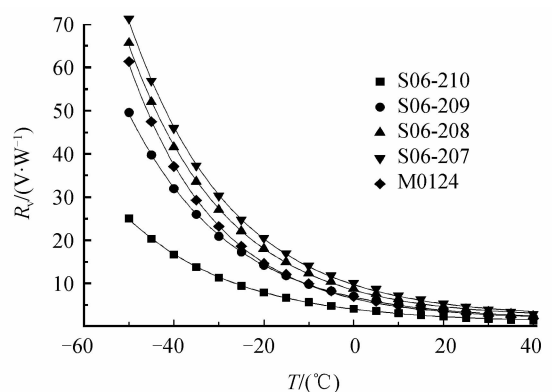


图5 探测器在 1.31 μm 下响应率变温特性典型结果
Fig. 5 Typical results of detector responsivity at 1.31 μm

3 结论

本文在对红外光导探测器工作原理进行分析的基础上,提出了在一定范围内探测器响应率可以近似表示为温度和波长变量分离函数形成的假设,并由实验验证了在测量不确定度范围内假设的正确性.基于此结论,建立了一种基于近红半导体激光光源和光纤器件的标定 HgCdTe 光导探测器在 DF 激光波长处响应率温度特性的实用方法,并已成功应用于中红外高能激光阵列靶斑仪工程研制中.该方法也可为其它的中远红外探测器响应率温度特性标定提供参考.

参考文献

- [1] WANG Yong-chao, XIA Hai-ping, LIN Qiong-fei, *et al.* Mid-infrared luminescence properties of Tm^{3+} and Ho^{3+} co-doped fluorogermanate glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 289-295.
王勇超,夏海平,林琼斐,等. Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 双掺氟锗酸盐玻璃的中红外发光性质[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 289-295.
- [2] HUANG Zhang-Yu, DAI Shi-xun, SUN Gao-hai, *et al.* Mid-infrared emissions and multiphonon relaxation in Er^{3+} -doped chalcogenide glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1466-1471.
黄正裕,戴世勋,孙高海,等. Er^{3+} 掺杂 Ge-Ga-S-KBr 硫卤玻璃的中红外发光和多声子弛豫的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1466-1471.
- [3] LIU Yong-Xing, ZHANG Pei-jing, XU Yin-sheng, *et al.* Dispersion properties of $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$ chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid IR region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 516-521.
刘永兴,张培晴,许银生,等. $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$ 硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 516-521.
- [4] CHEN Dong, ZHANG Bo-kun, HU Xie, *et al.* Research on the high resolution trace gas detection based on the difference frequency mid infrared spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 678-683.
陈东,张伯昆,胡燮,等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 678-683.
- [5] LEI Peng, LI Hua, BIAN Jin-tian, *et al.* Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by TEA-CO₂ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 214002.
雷鹏,李化,卞进田,等. TEA-CO₂ 激光辐照 HgCdTe 图像传感器的实验研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 214002.
- [6] QIU Guang-yin, WEI Yan-feng, XU Qing-qing, *et al.* Research on P-type As-doped HgCdTe film grown by liquid phase epitaxy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(S1): 330-333.
仇光寅,魏彦锋,徐庆庆,等. P 型砷镉汞液相外延材料 As 掺杂的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(S1): 330-333.
- [7] LI Li, LU Qi-sheng. PV-type HgCdTe detector irradiated by out-of-band CW 10.6 μ m laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2535-2539.
李莉,陆启生. 波段外 10.6 μ m 激光辐照中红外 PV 型 HgCdTe 光电探测器机理分析[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2535-2539.
- [8] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] WANG Yi-feng, LI Pei-zhi, LIU Li-ming, *et al.* Developments of very long wavelength mercury cadmium telluride infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(7): 373-382.
王忆锋,李培智,刘黎明,等. 甚长波碲镉汞红外探测器的发展[J]. *红外技术*, 2012, **34**(7): 373-382.
- [10] QIU Wei-cheng, WANG Rui, XU Zhong-jie, *et al.* Optical crosstalk of HgCdTe PV linear array detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2325-2330.
邱伟成,王睿,许中杰,等. PV 型 HgCdTe 线阵探测器的光学串扰[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(10): 2325-2330.
- [11] LIU Tao, YUAN Xiao, ZHANG Xiang, *et al.* Response of PC type HgCdTe detectors irradiated by femtosecond pulses laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(suppl): 232-235.
柳涛,袁孝,张翔,等. 飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的效应[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl): 232-235.
- [12] YANG Peng-ling, FENG Guo-bin, WANG Zhen-bao, *et al.* Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 521-525.
杨鹏翎,冯国斌,王振宝,等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 521-525.
- [13] ZHU Ke-xue, ZHANG Yun, LI Xiang-yang, *et al.* Changes of the electric parameters of LWIR HgCdTe PC detector by laser irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(1): 55-59.
朱克学,张贇,李向阳,等. 激光辐照对长波 HgCdTe 光导探测器电学参数的影响[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(1): 55-59.
- [14] LIU Ning, CHEN Qian, GU Guo-hua, *et al.* Analysis of the nonlinearity of cooled infrared detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 921-925.
刘宁,陈钱,顾国华,等. 640 \times 512 制冷探测器非线性响应分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 921-925.
- [15] ROSBECK J P, STARR R E, PRICE S L, *et al.* Background and temperature dependent current-voltage characteristics of HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53**(9): 6430-6440.