

文章编号: 0253-2239(2007)01-0085-5

双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的 实验研究*

李 莉 陆启生 江厚满 程湘爱

(国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为研究波段内和波段外组合激光对光导型光电探测器的辐照效应, 实验采用 532 nm(波段内)和 1319 nm(波段外)双光束组合连续激光辐照光导型 CdS 光电探测器, 分别改变两束激光的辐照功率, 得到探测器的电压响应曲线。实验结果表明, 光电探测器对波段内和波段外激光都有响应, 但在激光开始和停止辐照瞬间探测器对两束激光的响应电压刚好相反。探测器对波段外激光的电压响应随线性工作区间内的波段内激光功率升高而增大; 随着波段内激光趋于饱和, 对波段外激光的响应电压近似指数级下降。分析认为, 光电探测器对波段外激光的响应为光激发热载流子效应, 是由自由载流子吸收激光能量产生带内跃迁引起的; 波段内激光辐照影响探测器对波段外激光的吸收系数。

关键词: 光导型 CdS 光电探测器; 激光辐照效应; 波段内激光; 波段外激光; 光激发热载流子

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Photoconduction-Type CdS Detector Irradiated by Two Laser Beams

Li Li Lu Qisheng Jiang Houman Cheng Xiang'ai

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: PC-type CdS detector is irradiated by 532 nm in-band and 1319 nm out-of-band continuous wave (CW) lasers simultaneously. The voltage responses are recorded when the power of the two laser beams changes separately. It is shown that the detector responses to the irradiation of both in-band and out-of-band lasers, but the response to the irradiation of out-of-band laser is opposite to that of in-band laser. The voltage response to the out-of-band laser increases with the rise of line-working in-band laser power and decreases rapidly while the in-band laser power approaches to the saturation threshold. Analysis shows that the response to the out-of-band laser is related to laser excited hot carriers, which is due to the carrier absorption of the incident photons resulting in an intra-band transition. In-band laser irradiation has an effect on the absorption coefficient of the out-of-band laser.

Key words: photoconduction-type CdS detector; effect of laser irradiation; in-band laser; out-of-band laser; laser excited hot carriers

1 引 言

随着光电探测器在军事和民用许多领域的广泛应用, 光电探测器的激光辐照效应在理论和实验方面得到了广泛深入的研究。目前的研究工作主要是针对波段内单束激光辐照^[1~8], 对波段外单束连续激光辐照效应也有研究。近年的激光辐照效应实验中, 发现在波段外连续激光辐照下光导型 HgCdTe 红外光电探测器出现反常响应^[9,10], 作者从热效应

方面对其作用机理进行了初步的分析。但作为一种新的现象, 光电探测器的波段外激光辐照效应在理论和实验方面都有待进一步深入研究。

文中采用了波段内和波段外两束激光辐照光导型 CdS 光电探测器, 分别改变两束光的功率密度, 发现了一些新的实验现象。实验中我们看到: 1) CdS 探测器对波段内和波段外激光的光电响应是相反的; 2) 波段内激光辐照改变了 CdS 探测器对波段

* 国防预研(2004413260101)资助课题。

作者简介: 李 莉(1979—), 女, 河北人, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: lilyamon@sina.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用、非线性光学等研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

收稿日期: 2006-04-19; 收到修改稿日期: 2006-05-26

外激光的吸收系数。文中对这些实验现象进行了初步分析,并对其作用机理给出了比较合理的解释。

2 实验内容

实验光路电路如图 1,实验中使用 CdS 光敏电

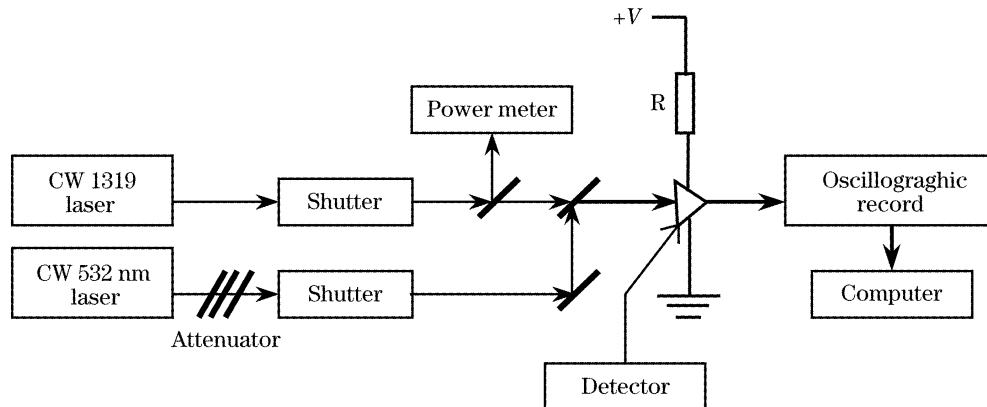


图 1 实验光路电路图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

其中波长为 1319 nm 的激光,光斑大小为 $\phi 6\text{mm}$,发散角小于 9 mrad,出光时间可预先设定,出光功率最大为 24 W,功率连续可调;波长为 532 nm 的激光,光斑大小为 $\phi 2\text{ mm}$,发散角为 1~3 mrad,出光功率约为 15 mW 左右,使用衰减片调节其辐照探测器的功率密度。

探测器与 2 k Ω 电阻串联,接在 5 V 电源上,采用数字存储示波器(DC 耦合)检测探测器受激光辐照后的响应输出。探测器光敏面 $\phi 4\text{ mm}$,两束激光通过开关控制垂直辐照到探测器光敏面上。

实验中,波段内 532 nm 激光作为背景光,首先开启波段内激光,然后开启波段外激光,双光束辐照一段时间后,先关闭波段外激光,后关闭波段内激光。

实验 1: 固定波段内 532 nm 激光功率为 0.66 mW,在探测器的线性响应范围内,连续调节

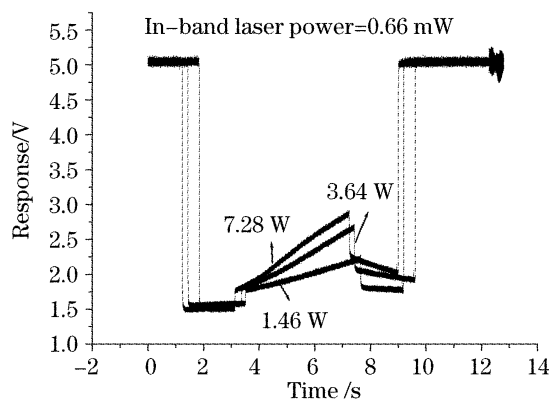


图 2 不同波段外激光辐照功率下探测器的电压响应曲线

Fig. 2 Voltage responses with different out-of-band laser power change

阻,室温下 CdS 材料的禁带宽度为 2.25 eV,光谱响应范围 400~800 nm,峰值响应波长 515~550 nm;532 nm 激光在探测器的峰值响应波段范围内,为波段内激光;1319 nm 激光在探测器的光谱响应范围外,为波段外激光。

波段外 1319 nm 激光的辐照功率,得到探测器的一组电压响应曲线,图 2 是部分实验数据。

实验 2: 固定波段外 1319 nm 激光功率为 5.1 W,使用衰减片调节波段内 532 nm 激光的辐照功率,得到探测器的一组电压响应曲线,图 3 是部分实验数据。

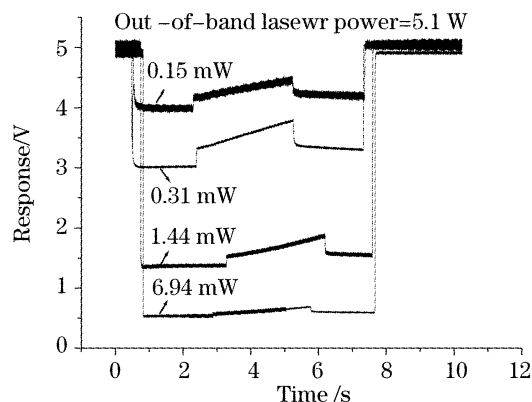


图 3 不同波段内激光辐照功率下探测器的电压响应曲线

Fig. 3 Voltage responses when in-band laser power change

3 实验结果分析

3.1 光效应分析

由图 1、图 2 中的电压响应曲线可以看出,CdS 探测器不仅对波段内激光有响应,而且对波段外激光也有响应,但是响应现象明显不同:探测器端电压在两束激光开始和停止辐照的瞬间的突变方向刚好相反。

为解释波段外光响应,首先要清楚光与光导型

光电探测器的作用机理。光导型光电探测器的工作原理在文献[11]中有详细的描述,探测器对波段内激光的吸收机理,一般以带间吸收(本征型半导体)为主。载流子吸收光子能量后,产生带间跃迁,使得载流子浓度瞬间增大,电导率随之增大,使探测器的电压输出信号降低。

研究波段外激光辐照光电探测器的反偏压现象,可从半导体的光吸收机理入手。半导体对光的吸收,主要有本征吸收(包括直接跃迁和间接跃迁)、多光子吸收、激子吸收、自由载流子吸收、杂质吸收、晶格振动吸收等^[11]。波段外 1319 nm 激光光子能量 0.94 eV 低于探测器的禁带宽度 2.25 eV,显然不能产生本征吸收;多光子吸收在连续波辐照中的几率非常小,产生的电压响应与本征吸收相同,应该是正常的电压响应,无法产生上述的反向偏压现象;激子是受激电子和空穴的一种束缚状态,激子吸收不伴有光电导;杂质吸收比较微弱,一般只能在低温下,大部分杂质中心未被电离时才能观测得到,而室温下本征半导体一般可认为杂质完全电离;晶格吸收谱一般在远红外。经简单分析,波段外光吸收应该主要为自由载流子吸收。

因此波段外激光辐照现象可描述为:在波段外激光辐照下,半导体内自由载流子吸收激光能量,向带内高能态跃迁,或者(主要是电子)向较高的非直接导带跃迁(能谷间散射),同时吸收或发射一个声子,电子温度瞬间升高,形成电子与晶格不同温的瞬间非稳态,电子碰撞加剧,迁移率降低,可称之为光激发热载流子效应。

光激发热载流子效应不只在波段外激光辐照下产生,当波段内激光光子能量大于半导体探测器的禁带宽度时,多余的能量也会激发热载流子。从简化的电流密度公式 $J = (n\mu_n + p\mu_p)qE$ 来看,自由载流子吸收对电子和空穴浓度 n 、 p 没有影响,只是载流子温度瞬间升高,迁移率 μ_n 、 μ_p 减小,电流密度改变;而在波段内激光辐照下,载流子浓度 n 、 p 的瞬间变化占主导地位,宏观上不能区分出热载流子效应。

3.2 探测器对不同功率波段外 1319 nm 激光的响应

对实验 1 中数据进行处理,可以得到波段外 1319 nm 激光开始和停止辐照瞬间,探测器端压变化的幅值随波段外激光功率变化的曲线,如图 4。

由图 4 可以看出,随波段外 1319 nm 激光功率的升高,探测器对 1319 nm 激光的响应幅值也随之增大,但是并不是线性增大。为更清楚说明,对图 4 数据再进行处理,得到波段外激光开启瞬间探测器

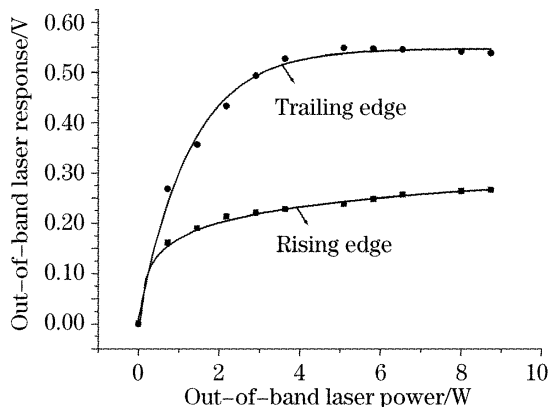


图 4 波段外激光开始和停止辐照瞬间探测器的电压响应幅值随波段外激光辐照功率变化曲线

Fig. 4 Voltage response at the moment out-of-band laser on and off versus out-of-band laser power

端压的响应幅值与激光功率的比值随激光功率的变化曲线如图 5,此曲线呈明显的下降趋势,且曲线最后趋平,可见探测器对波段外激光的响应也存在饱和效应。

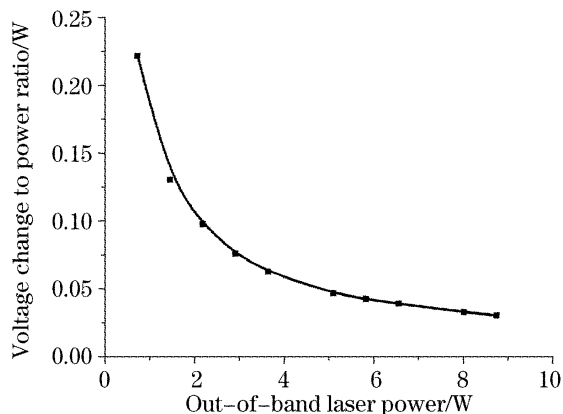


图 5 探测器对波段外激光的电压响应幅值与激光功率的比值随波段外激光辐照功率变化曲线

Fig. 5 Voltage response to power ratio versus out-of-band laser power

由图 4 还可以看出,在波段外激光开始和停止辐照的瞬间,探测器端压响应的幅值并不相同:波段外激光停止辐照瞬间探测器的端压下降幅度,大于开始辐照瞬间的上升幅度。分析认为这与晶格温升有关,波段外激光辐照过程中晶格升温幅度较大,自由载流子浓度增加,激光停止辐照瞬间参与热碰撞的电子包含了热激发产生的附加自由载流子,宏观上表现为电压响应幅值的增大。

3.3 波段内 532 nm 激光功率改变对波段外 1319 nm 响应的影响

对实验 2 中数据进行处理,可以得到波段内 532 nm 激光开始辐照瞬间探测器端压响应幅值和波段外 1319 nm 激光开始和停止辐照瞬间探测器端

压响应幅值,随波段内 532 nm 激光功率变化的关系曲线。

图 6 中 A 曲线是探测器对波段内 532 nm 激光的响应曲线,在激光功率比较低时,呈线性变化,随激光功率的升高逐渐达到饱和;B 为波段外 1319 nm 激光开始辐照瞬间探测器的响应曲线。当波段内激光功率为 0 时,对波段外的响应幅值很小几乎为 0,随波段内激光功率的升高,响应幅值迅速增大,当波段内激光功率增大到一定程度,响应幅值不是继续增大,也不是趋向饱和,而是近似指数级下降。与波段内的响应曲线对比可以看出,探测器对波段外激光响应的最大值在探测器对波段内激光的线性响应部分,当探测器对波段内激光的响应逐渐趋于饱和时,对波段外激光的响应逐渐呈指数趋势减小。

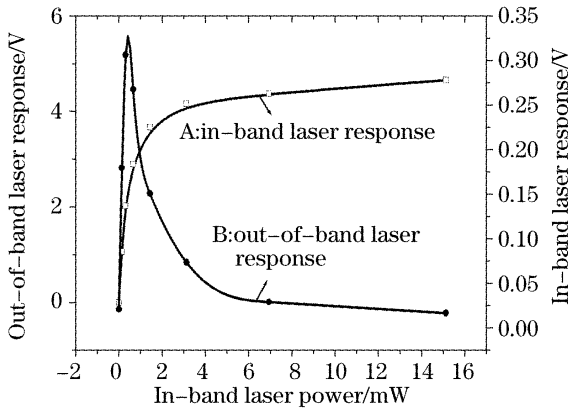


图 6 探测器对波段外和波段内激光的电压响应幅值随波段内激光辐照功率变化曲线

Fig. 6 Voltage response to out-of-band laser and in-band laser versus in-band laser power

分析认为,探测器对波段外激光的电压响应随波段内激光辐照功率改变而不同,这与自由载流子吸收系数有关。由半经典理论得到的自由载流子吸收系数^[11]正比于自由载流子浓度,且与自由载流子平均寿命有关,两者共同起作用。当波段内 532 nm 激光功率较低时,自由载流子浓度随波段内激光功率升高线性增大,此时自由载流子浓度的变化是主要因素,对波段外激光的吸收增大,随波段内激光功率升高,自由载流子温度也随之升高,载流子寿命迅速降低,使自由载流子吸收光子向更高能态跃迁几率降低,因此在两者的共同作用下,探测器对波段外激光的响应降低了。

与实验 1 中波段外激光功率改变的情况类似,在波段内激光功率改变的情况下,波段外激光停止辐照瞬间探测器端压的下降幅度大于开始辐照瞬间端压的上升幅度,两者的差值随波段内激光功率的

变化曲线如图 7,其变化趋势与波段外激光响应的趋势相同,即下降与上升幅度的差值在波段内激光线性区间内达到最大,随波段内激光功率增大,差值也指数级减小。

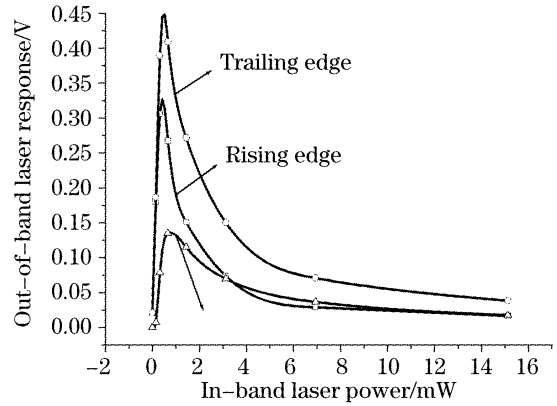


图 7 波段外激光开始和停止辐照瞬间探测器的电压响应幅值随波段内激光辐照功率变化曲线

Fig. 7 Voltage response at the moment out-of-band laser on and off versus in-band laser power

3.4 热效应分析

在图 2、3 中可以看到,在波段内和波段外激光同时辐照的过程中,探测器的端压与激光开始和停止辐照瞬间的突变不同,探测器的端压相对平缓上升。此过程中自由载流子不断吸收光能,产生带内跃迁,由于载流子能量升高,运动加速,晶格碰撞加剧,激光能量通过电子晶格碰撞弛豫,转化为晶格升温,电阻率增加,因此探测器端压缓慢上升。图 8、图 9 中 thermal 曲线分别为实验 1 和实验 2 中波段内和波段外激光同时辐照过程中,探测器端压缓慢上升的幅值随波段内和波段外激光变化的曲线。

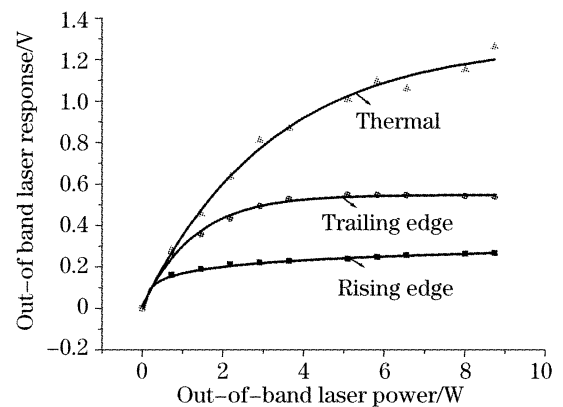


图 8 波段外激光开始、停止和辐照过程中探测器的电压响应幅值随波段外激光辐照功率变化曲线

Fig. 8 Voltage response to out-of-band laser versus out-of-band laser power changes

由图 8、图 9 可以看出,探测器的热响应幅值随激光功率的变化与光响应的变化趋势相同,但热效

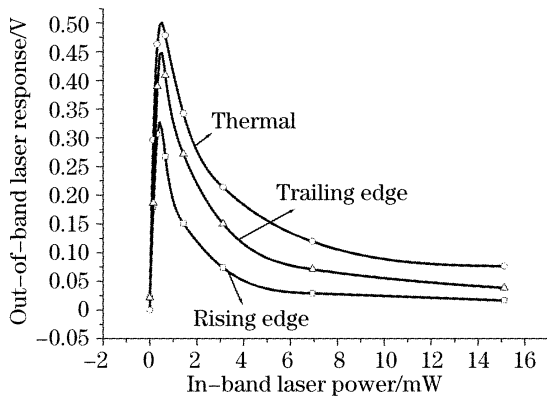


图 9 波段外激光开始、停止和辐照过程中探测器的电压响应幅值随波段内激光辐照功率变化曲线

Fig. 9 Voltage response to in-of-band laser when out-band laser power changes

应的电压响应幅值远大于探测器对波段外激光的光响应幅值,热效应非常显著,这是由探测器对波段外激光的吸收决定的。

图 2、图 3 中,在波段外激光停止辐照后,只有波段内激光辐照过程中,探测器端压并没有直接恢复为波段外激光辐照前的值,而是呈缓慢下降趋势,这也是热效应引起。由于此时晶格已处于很高的温度,探测器通过热弛豫降温需要一段时间。在此过程中探测器逐渐降温,端压缓慢下降。

4 结 论

实验不仅明显区分出光导型光电探测器对波段内激光和波段外激光辐照的不同响应,证实了波段外激光辐照的反向电压响应现象的客观性,而且由实验数据处理可以看出光电探测器对波段外激光的响应也存在饱和效应,另外,实验得到一个重要结论:波段外激光的吸收受波段内激光辐照影响——线性工作区间内的波段内激光对探测器的辐照使光电探测器对波段外激光的吸收明显增强,波段外激光吸收的增强可以产生明显的热效应,有助于降低波段外激光对光电探测器的破坏阈值。

当然,对波段外激光的辐照现象中的一些新的问题,如波段内激光接近和超过饱和阈值时,对波段外激光的响应随波段内激光功率升高而近指数级下降、波段外激光开始和停止辐照的瞬间探测器的电压响应幅度不同等,只进行了理论上的初步分析,对这些问题的物理本质的理解还有待在实验和数值模

拟方面进行深入的研究。

参 考 文 献

- 1 M. Krueer, L. Esterowitz, R. Allen *et al.*. Thermal models for laser damage in InSb photovoltaic and photoconductive detectors [J]. *Infrared Physics*, 1976, **16**(3): 375~384
- 2 M. Lax. Temperature rise induced by a laser beam II. The nonlinear case[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(8): 786~788
- 3 Dae M. Kim, D. L. Kwong. Pulsed laser annealing of single-crystal and ion-implanted semiconductors[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(2): 224~232
- 4 Zhiping Jiang, Liang Tianjiao, Lu Qisheng *et al.*. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detector irradiated by CW 1.319 μm laser[J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(4): 155~156 (in Chinese)
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
- 5 Qiang Xiwen, Liu Feng, Zhang Jianquan *et al.*. An numerical simulation of the melt-threshold of InSb induced by CW laser beams[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(4): 372~376 (in Chinese)
强希文, 刘峰, 张健泉等. 连续波激光辐照半导体 InSb 材料的熔融破坏[J]. *中国激光*, 2000, **27**(4): 372~376
- 6 Cheng Xiangai, 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 (in Chinese)
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
- 7 Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun *et al.*. Imitation of the instantaneous change behaviors of photoconductive detectors[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 342~346 (in Chinese)
马丽芹, 陆启生, 杜少军等. 光导型光电探测器瞬变行为的方针[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 342~346
- 8 Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1057~1061 (in Chinese)
段晓锋, 牛燕雄, 张雏. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1057~1061
- 9 Wang Rui, Si Lei, Lu Qisheng *et al.*. The experiment study on HgCdTe(PC type) detector system irradiated by laser out of response waveband[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(5): 335~338 (in Chinese)
王睿, 司磊, 陆启生等. 响应波段外激光辐照 PC HgCdTe 探测器系统实验研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(5): 335~338
- 10 Li Xiuqian, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Investigation of thermal effect of HgCdTe detector with irradiation by off-band CW CO₂ laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1070~1074 (in Chinese)
李修乾, 程湘爱, 王睿等. 波段外 CW CO₂ 激光辐照 HgCdTe 探测器热效应研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1070~1074
- 11 Sun Cengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxu *et al.*. *Effect of Laser Irradiation* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 341~360 (in Chinese)
孙承伟, 陆启生, 范正修等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 341~360