

文章编号: 0258-7025(2003)12-1070-05

波段外 CW CO₂ 激光辐照 HgCdTe 探测器 热效应研究

李修乾, 程湘爱, 王 睿, 马丽芹, 陆启生

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 报道了用波段外连续波 CO₂ 激光辐照 HgCdTe 探测器(PC,PV)时,观察到的一些与波段内激光辐照探测器时大不相同的实验现象。研究表明,波段内激光辐照探测器时,探测器的主要响应机制是光效应,而波段外激光辐照探测器时,热效应起主要作用。

关键词 激光技术;CW CO₂ 激光;波段外;波段内;HgCdTe 探测器

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Investigation of Thermal Effect of HgCdTe Detector with Irradiation by Off-band CW CO₂ Laser

LI Xiu-qian, CHENG Xiang-ai, WANG Rui, MA Li-qin, LU Qi-sheng

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Some phenomena were observed when the HgCdTe (PC,PV) detectors were irradiated by off-band CW CO₂ laser which are much different from that when irradiated by in-band light. It is shown that the detectors' major response to the irradiation of in-band light is optical effect while that to the irradiation of off-band light is thermal effect.

Key words laser technique; CW CO₂ laser; off-band; in-band; HgCdTe detector

1 引 言

碲镉汞探测器有许多优点^[1]:如本征激发、高吸收系数、高量子效率(可超过 80%)、高探测率和宽响应波段等,因而被广泛地应用于许多军事和民用领域。但是红外探测器极易受到强激光的干扰和损伤,研究激光辐照红外探测器而带来的各种效应具有十分重要的意义。对于利用波段内激光辐照 HgCdTe 探测器所引起的激光破坏效应,我们已经展开了一定的研究^[2~5]。而波段外 CW CO₂ 激光对 HgCdTe 探测器的辐照效应研究在国内外文献中尚未见报道。

实验中所用的两个 HgCdTe 探测器的光谱响应曲线如图 1 所示,其中(a)为光伏型(PV)HgCdTe 探测器的光谱响应曲线,(b)为光导型(PC)HgCdTe

探测器的光谱响应曲线。从图 1 可以看出,这两个探测器对 10.6 μm 的 CO₂ 激光不响应。

2 实验内容

实验装置如图 2 所示,用 10.6 μm CW CO₂ 激光对 HgCdTe 探测器(工作温度 77 K)进行辐照实验。激光光斑的大小为 φ2.4 mm,出光功率最大为 3 W 左右,功率大小连续可调。实验分两组进行,一组为 PC 型器件,一组为 PV 型器件。光照响应曲线(图 3,4)中无激光辐照时的输出电压是背景光照引起的光生电压。

2.1 CW CO₂ 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器

PC 型 Hg_{1-x}Cd_xTe(x = 0.27) 探测器的工作电流为 5 mA,光敏元大小为 0.26 mm×0.26 mm,

收稿日期:2002-07-09;收到修改稿日期:2002-09-09

作者简介:李修乾(1977.2—),男,山东泰安人,在读硕士生,目前主要从事激光与物质相互作用方面的研究工作。E-mail:lixuqian@163.net

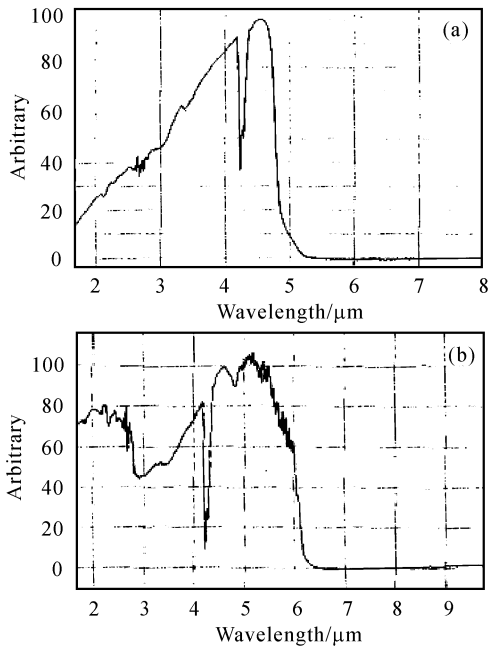


图 1 探测器的光谱响应曲线

Fig. 1 Spectral response of the detectors

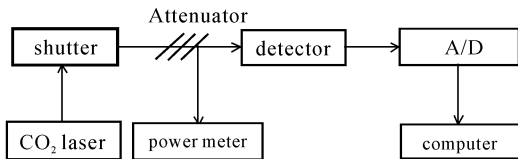


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic of experiment setup

禁带宽度 $E_g = 0.21 \text{ eV}$ 。光垂直均匀辐照在探测器上,依次增加辐照激光的功率密度,得到了 PC 型 HgCdTe 探测器的输出响应随光功率密度的变化情况如图 3(a), (b) 所示。

图 3(a) 所示的光照响应曲线所对应的光功率密度为 2.4 W/cm^2 , 激光辐照时间为 1 s , 当辐照激光的功率密度为 38 W/cm^2 , 辐照时间为 2 s 时, 探测器的光响应曲线如图 3(b) 所示。从图中可以看出光照使探测器的输出电压增大。

2.2 CW CO₂ 激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器

实验中所用的 PV 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.31$) 探测器的光敏元大小为 $\phi 2 \text{ mm}$, 禁带宽度 $E_g = 0.26 \text{ eV}$ 。光垂直均匀辐照在探测器的光敏元上。图 4(a), (b) 所示的探测器的光照响应曲线所对应的辐照激光功率密度分别为 3.8 W/cm^2 和 35 W/cm^2 , 辐照时间均为 1 s 。其中在图 4(a) 中用两条虚线表明了出光时间段, 在图 4(b) 中用两条虚线标出了热恢复时间段。

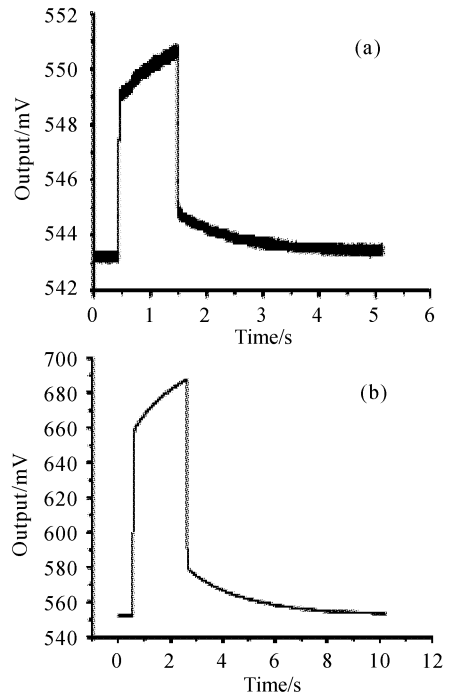


图 3 PC 型探测器在光功率密度为 2.4 W/cm^2 (a) 和 38 W/cm^2 (b) 时的响应曲线

Fig. 3 Response of the PC-type detector at the laser power density of 2.4 W/cm^2 (a) and 38 W/cm^2 (b)

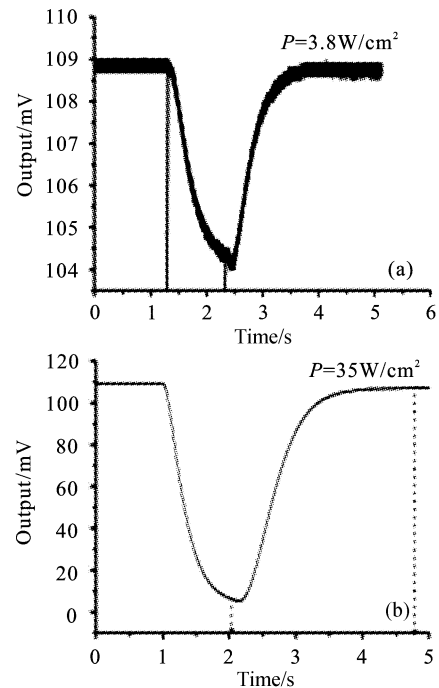


图 4 PV 型探测器在光功率密度为 3.8 W/cm^2 (a) 和 35 W/cm^2 (b) 时的响应曲线

Fig. 4 Response of the PV-type detector at the laser power density of 3.8 W/cm^2 (a) and 35 W/cm^2 (b)

3 分析与讨论

3.1 光导型探测器的工作模式

3.1.1 光导型探测器对波段内激光辐照的响应机制
文献[6]详细讲述了光导型探测器的工作原理,给出了光导型探测器输出信号光电压的解析表达式

$$\Delta V_L \approx \frac{\eta P_\lambda \lambda \tau}{\sigma h c n_e (\omega d)^2} \cdot \frac{V}{R_L} \quad (1)$$

其中, R_L 为偏置电阻的阻值; σ 为探测器的电导率; τ 为多数载流子寿命; n_e 为电子密度; ω, d 分别为探测器的宽度和厚度; V 为直流电源所提供的偏压; λ 为辐照激光的光波长; P_λ 为辐照激光的光功率; η 为量子效率, 即每吸收一个光子产生的过剩载流子数; h, c 分别为普朗克常数和真空中的光速。

用波段内激光辐照红外探测器时, $h \frac{c}{\lambda} \leq E_g$, 探测器吸收光能量的机制, 一般以带间吸收(本征型半导体探测器)为主, 这种吸收机制使得探测器中的载流子浓度增大, 电导率 σ 随之增大, 从而使探测器的输出信号电压 ΔV_L 减小。

3.1.2 光导型探测器对波段外激光辐照的响应机制

从光谱响应曲线中可以看出 CW CO₂ 激光不在探测器的响应波段内, CO₂ 激光的光子能量为 0.12 eV, 小于探测器的禁带宽度(0.21 eV), 即 $h \frac{c}{\lambda} < E_g$, 不能引起材料的本征激发。但是从图 3(a), (b) 中可以明显看出, 在激光出光的一刹那, 探测器的输出信号电压突然增大, 由式(1)可知, 原因有三种可能, 一是多数载流子寿命 τ 突然增大, 二是电子密度 n_e 突然减小, 三是探测器的电导率 σ 突然减小。但是激光辐照以后会引起材料升温, Arora 和 Dawar^[7] 指出, 温度升高会引起载流子寿命的降低, 而且载流子寿命也不存在突变。那么引起输出电压突然升高的原因便集中在电导率 σ 突然减小或者电子密度 n_e 突然减小上。

激光辐照 N 型 HgCdTe 光导探测器时, 朱克学等^[8] 发现了器件的电阻突然增大的现象, 文献中指出原因可能在于激光辐照的热效应使光导器件的表面及体内均产生了一定的变化^[9]。

由于 Hg—Te 键的化学和热学不稳定性, 而且汞原子极易在材料中扩散, 激光辐照材料以后会产生一个局部高温, 这样在 HgCdTe 表面易发生 Hg 原子逃逸^[7]。可以认为, 激光辐照使器件表面的 Hg 原子逃逸, 一部分 Hg 原子从表面逸出, 进入表面钝化膜中, 一部分进入体内。当辐照光功率密度

较小时, 只有少量 Hg 原子获得足够的能量从表面逃逸, 其他的 Hg 原子主要进入体内; 当辐照光功率密度达到一定值的时候, 使 Hg 原子的能量很大, 从表面大量逃逸, 在表面产生大量的 Hg 空位, 使表面积累层中的电子浓度减小, 器件电阻增大。

此时体内的 Hg 原子也很活跃, 由于器件表面 Hg 的浓度降低了很多, 体内会有 Hg 原子向表面扩散, 到达表面以后的 Hg 原子还会从表面逃逸, 这样就使体内的 Hg 浓度降低, N 型探测器的 CdTe 组份 x 变大, 体内电子密度减小。并且由于 Hg 原子的迁移, 使晶格能量提高, 振动加剧, 阻碍了载流子的运动, 加大了载流子被散射的几率, 减小了载流子的迁移率, 也使器件的电阻增大^[6]。

激光辐照的热效应使器件的表面以及体内产生了一定的变化, 从而使器件的电阻也即电导率产生了一个突变, 还使得电子浓度变小, 反映在实验现象上便是输出信号电压的突然升高。

下面再对器件的电导率 σ 与温度的关系做一计算。

首先对于材料的温升做一个估算, 根据激光辐照材料的温度估算方程^[10]

$$T_s = T_0 + \frac{2F_0(1-R)}{K} \cdot \left(\frac{kt}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2)$$

其中, T_s 为激光辐照以后靶材的表面温度, T_0 为初始温度, F_0 为入射到材料上的激光功率密度, R 为材料的反射率, k 为材料的热扩散率, K 为材料的热导率, t 为激光辐照时间。

对于实验中所用的 PC 型 HgCdTe 探测器, $T_0 = 77$ K, $R = 0.31$ ^[11], $k = 0.18$ cm²/s^[11], $K = 0.2$ W/(cm·K)^[11], $F_0 = 35$ W/cm², $t = 2$ s。

将以上参数代入(2)式(实验中最大辐照光功率密度为 35 W/cm²), 得出激光辐照后探测器的温度升高到 166 K。

实验中探测器为 N 型(杂质浓度为 $n_d \approx 5 \times 10^{14}$ cm⁻³), 因为空穴的迁移率比电子迁移率小得多, 可只考虑电子对电导率的贡献。电导率 σ 可由下式表示

$$\sigma = n_e e \mu \quad (3)$$

式中 n_e 为电子浓度, e 为电子电荷, μ 为电子迁移率。对非简并半导体

$$n = \frac{n_d + \sqrt{n_d^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (4)$$

本征载流子浓度 n_i 与温度 T 及组份 x 有如下关系^[12]

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

式中 $k_b = 8.625 \times 10^{-5}$ eV/K 是 Boltzmann 常数, $E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4$ (eV), 当 $x = 0.27$, T 在 77 K 至 300 K 之间时, 电子的迁移率 μ 近似为^[13]

$$\mu = 2.84 \times 10^9 T^{-2.02} (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$$

由(3)~(6)式计算出的电导率与温度的关系如图 5 所示。

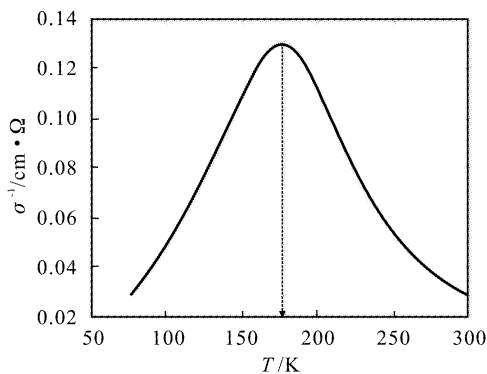


图 5 电导率与温度的关系

Fig. 5 σ^{-1} vs T

因为在低温时 n_i 很小, $n \approx n_d$, 基本上与温度无关, 电导率 σ 主要取决于电子的迁移率 μ , 当温度上升时电子迁移率变小, 故温度上升时电导率减小。在高温时 n_i 随温度升高而升高, 比 μ 随温度升高而下降更快, 总的使电导率随温度升高而升高, 即在激光加热过程中暗电导率(不含光生载流子对电导率的贡献)有一个极小值, 从图 5 中可以看出此极小值大约出现在 176 K。而根据估算, 探测器的温度只有 166 K。在辐照激光功率密度的范围内, 探测器的电导率随着温度的升高而减小。

如图 3(a), (b) 所示, 激光开启的一刹那, 由于辐照激光热效应而带来的器件表面以及体内的变化引起了电导率的突变, 从而使输出电压信号迅速上升。在激光辐照期间(辐照激光的功率密度小于器件的破坏阈值), 探测器吸收激光能量温度升高, 所以激光停照时 ΔV_L 没有立即恢复至激光照射前的值, 而是迅速下降某一值后进入一个相对缓慢的下降阶段, 这是热效应引起的。

3.2 光伏型探测器的工作原理

3.2.1 光伏型探测器对波段内激光辐照的响应机制

文献[6]指出, PV 型光电探测器的开路电压 V_0 由光生电动势 V_p , 温差电动势 ΔV 和 Dember 电动

势 V_D 三部分组成。也即

$$V_0 = V_p + V_D + \Delta V \quad (7)$$

对于非简并的 P 型半导体(实验中所用器件为 P 型), 其温差电动势 ΔV 可表示成^[6]

$$\Delta V = \frac{k_b}{e} \left(\ln \frac{N_v}{p} + 2 \right) \Delta T \quad (8)$$

式中 $N_v = 2(2\pi m_p k_b T/h^2)^{3/2}$, 为价带的等效态密度, m_p 为空穴的有效质量, p 为空穴载流子密度。

由于实验中不可能将温差电动势和 Dember 电动势与光生电动势分开, 所测量的电压是开路电压, 而不是光生电动势。

波段内激光辐照光伏型探测器时, 探测器的响应以光效应为主, 所测得的开路电压中, 光生电动势是主要的。随着辐照激光功率密度的加大, 探测器的输出电压随之增大^[6], 不考虑饱和效应。

3.2.2 光伏型探测器对波段外激光辐照的响应机制

波段外激光辐照探测器时, 光波长已经超过了其长波限, 不能引起材料的本征激发, 辐照激光使材料的温度升高, 从而影响其电学、光学性质, 开路电压表达式中, 温差电动势一项是最主要的。光伏型探测器对波段外辐照激光的响应同样以热效应为主。

用 CW CO₂ 激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器时, 探测器对光的响应比较缓慢, 作者认为, 这是明显的热效应。因为 10.6 μm 的 CW CO₂ 激光不在探测器的响应波段内, 光子的能量(0.12 eV)小于材料的禁带宽度(0.26 eV), 不能引起材料的本征激发, 所以无光效应出现。因此我们所测得的探测器的开路电压只包含温差电动势和 Dember 电动势, Dember 电动势一般很小, 可以忽略, 因此所测的开路电压可认为只是温差电动势的贡献。由于材料吸收辐照激光的能量以后升温, 从而引起载流子密度的变化, 由式(8)中的对数关系可以看出, 空穴载流子密度 p 以及价带的等效态密度 N_v 的变化可以使温差电动势的方向与光生电动势的方向相反, 从而使探测器的开路电压变小, 作者认为实验中所观察到的现象可能是这种效应。

文献[6]中指出 P 型层作为受光面的光伏器件中, 温差电动势的方向与光生电动势的方向相同, 本实验中所用的光伏型探测器是以 N 型层作为受光面的 P 型 HgCdTe, 从实验现象来看, 以 N 型层作为受光面的光伏器件, 其温差电动势的方向可能与光生电动势的方向相反。

参 考 文 献

- 1 Zhu Xichen. A review on infrared detectors [J]. *Infrared Technology* (红外技术), 1999, **21**(6):12~15 (in Chinese)
- 2 Jiang Zhiping, Liang Tianjiao, Lu Qisheng *et al.*. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detectors when irradiated by laser [J]. *Applied Laser* (应用激光), 1995, **15**(4):155~156 (in Chinese)
- 3 Lu Qisheng, Jiang Zhiping, Liu Zejin *et al.*. The memory effect of PC type HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (红外与毫米波学报), 1998, **17**(4):317~320 (in Chinese)
- 4 Xu Xiaojun, Zeng Jiaolong, Lu Qisheng *et al.*. Research of damage thresholds of PC-type HgCdTe detector under CW-YAG laser [J]. *High Power Lasers and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1998, **10**(4):552~556 (in Chinese)
- 5 Zeng Xiongwen, Lu Qisheng, Zhao Yijun *et al.*. The dynamic response of a PV-type detector under laser illumination [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1998, **9**(6):461~464 (in Chinese)
- 6 Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, Chen Yuze *et al.*. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 341~343, 370 (in Chinese)
- 7 V. K. Arora, A. L. Dawar. Effect of laser irradiation on the responsivity of mercury cadmium telluride detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1996, **37**:245~249
- 8 Zhu Kexue, Zhang Yun, Li Xiangyang *et al.*. Effect of laser irradiation for the performance of LWIR HgCdTe PC detector [J]. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2001, **31**(4):234~235 (in Chinese)
- 9 A. L. Dawar, Savita Roy, Tirlok Nath *et al.*. Effect of laser annealing on electrical and optical properties of n-mercury cadmium telluride [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(7):3849~3852
- 10 John F. Ready. Material Processing—An overview [J]. *Proc. IEEE*, 1982, **70**(6):533~544
- 11 Sun Liguang, Li Yongzheng, Shen Ke. Thermal analysis of laser damage in photoelectric detector [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 1991, **12**(2):72~76 (in Chinese)
- 12 Chu Junhao, Wang Rongxing, Tang Dingyuan. Intrinsic carrier concentration in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ semiconductors with nonparabolic band [J]. *Chin. J. IR Res.* (红外研究), 1983, **2**(4):241~249 (in Chinese)
- 13 W. Scott. Electron mobility in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(3):1055~1062



第六届全国光学前沿问题讨论会在福建省武夷山市召开

由中国光学学会基础光学专业委员会和中国物理学会光物理专业委员会主办,中国科学院物理研究所光物理实验室承办的第六届全国光学前沿问题讨论会于2003年11月16~20日在福建省武夷山市召开,来自全国17所高校,7个研究所及其他单位的70多名代表参加了会议。

会上,天津大学王清月教授作了“飞秒激光在光子晶体光纤中传输特性的研究”的特邀报告,介绍了光子晶体光纤中强烈的非线性效应、双折射效应和超长距离传输特性,并在非均匀微结构光纤中观察到了双折射现象、拍频现象和光谱展宽、光谱变窄的温度效应;北京大学龚旗煌教授作了“时空高分辨飞秒近场光谱学”的特邀报告,对其提供的极端实验条

件——高分辨测量、强场物理等作了介绍,并展望了它的应用前景:测量化学反应基本过程、空间高分辨测量、时空小尺度测量等;上海交通大学夏宇兴教授作了“光学超晶格中的Solc滤波特性”的特邀报告,对非线性光学现象,电光效应导致光轴畸变,Solc滤波器等作了详细描述。

会议期间,复旦大学钱士雄等44位学者作了学术报告,交流了光学前沿的一些基本问题,如光子晶体、量子保密通信、飞秒脉冲技术、新型生物胶片——细菌视紫红质、非线性光学、图像处理等。另外,《中国激光》、《光学学报》、《量子电子学报》的负责人也在会上分别介绍了各自杂志的特色。

(吉 禾)