

光导型碲镉汞探测器在波段外连续激光辐照下的载流子输运

江天^{1,2}, 郑鑫¹, 程湘爱^{1,2*}, 许中杰¹, 江厚满¹, 陆启生¹

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要:利用连续波段外激光辐照光导型碲镉汞探测器. 实验表明, 探测器对波段外激光有响应, 且存在一个特定拐点温度 T_0 . 当探测器温度 $T < T_0$ 时, 响应电压随温度升高而增大; 当 $T > T_0$ 时, 响应电压随温度的升高而减小. 研究表明, 探测器胶层的热瓶颈作用会导致响应电压存在两个响应时间尺度, 拐点温度由芯片掺杂浓度决定. 当 $T < T_0$ 时, 响应电压主要由随温度变化的载流子迁移率决定; 当 $T > T_0$ 时, 响应电压主要受热激发载流子的影响.

关键词:波段外激光; 光导型碲镉汞探测器; 热激发载流子; 迁移率

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

The carrier transportation of photoconductive HgCdTe detector irradiated by CW band-off laser

JIANG Tian^{1,2}, ZHENG Xin¹, CHENG Xiang-Ai^{1,2*}, XU Zhong-Jie¹,
JIANG Hou-Man¹, LU Qi-Sheng¹

(1. College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: The response of photoconductive HgCdTe detectors to the irradiation of CW band-off laser was studied. It was found that there is a point of inflexion, T_0 , on the temperature dependence of the voltage response of the detector. The voltage response increases with temperature for temperature of the detector $T < T_0$, and decreases with temperature for $T > T_0$. Two time scales are found to be due to the two thermally resistive bonding layers. The inflection temperature is determined by the impurity concentration. For temperature $T < T_0$, the temperature dependence of the voltage response depends on the variation of mobility of the carrier, whereas $T > T_0$, thermally generated carriers contribute to the voltage response.

Key words: band-off laser; photoconductive HgCdTe detector; thermally generated carriers; mobility

PACS: 73.40.Lq, 73.50.Lw, 73.50.Pz

引言

2003年波段外激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的实验现象(输出信号增大)就被报道^[1-3], 随后大量学者开展了该现象的解释研究工作^[4-7]. 2009年一维双温能量平衡模型(晶格、电子非等温)被用于研究组合激光辐照下光导型器件的响应机制^[8]. 由于在激光开启和关闭的瞬间明显有两个时间响应尺

度, 为了进一步研究瞬态变化响应信号的产生机理, 2010年建立了一维三温能量平衡模型(电子、空穴、晶格非等温)^[9]. 能量平衡模型从计算结果上看很好的符合了2003年的实验现象, 并提出热载流子效应为信号瞬态变化的响应主要机制. 2011年, 波段外激光辐照光导型 InSb 探测器的实验报道了新的实验现象, 即当辐照激光功率高到一定程度后, 探测器的输出信号逐渐减小^[10]. 光导型 HgCdTe 探测器

收稿日期: 2011-07-25, 修回日期: 2011-09-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(1030110)

Foundation item: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (1030110)

作者简介: 江天(1986-), 男, 天津人, 博士研究生, 主要研究领域为激光与物质相互作用. E-mail: jiangtian198611@163.com.

* 通讯作者: E-mail: xiang_ai_cheng@126.com.

Received date: 2011-07-25, revised date: 2011-09-15

是否也存在该现象,该现象能否被合理解释为本文工作的重点.

1 实验

本文所使用的探测器是由上海技术物理研究所提供,探测器的结构如图 1 所示.激光均匀垂直辐照在探测器的光敏面上,电极位于探测器芯片的两端,芯片用环氧树脂胶粘于 Al_2O_3 基底上, Al_2O_3 用低温清漆胶固定在紫铜块上,整个探测器封装在液氮制冷的杜瓦瓶内,工作温度约为 77 K.铜块上安装了测温电阻,以实时监测激光辐照过程中器件的温度变化.

10.6 μm 激光的光斑直径为 5 mm,最大输出功率为 50 W,激光器的输出功率可以通过调节其工作电流连续改变.实验中探测器工作在直流偏置下,与远大于探测器暗电阻(200 Ω)的负载电阻($R = 30 \text{ k}\Omega$)串联,采用恒流工作模式(偏置电流约为 1.6 mA),实验装置如图 2 所示.探测器上的端电压变化作为输出信号,可以反映出探测器电阻的变化.

1.1 实验现象

图 3 为探测器在不同功率密度 CO_2 激光辐照下的电压响应曲线,辐照时间约为 12 s,对应于图 3 中的 12 ~ 24 s.可以看出,光导型探测器对波段外激光有响应.当激光功率密度小于 200 W/cm^2 时,探测器的输出电压明显的增大如图 3(a)所示.当激光功率密度大于 260 W/cm^2 时,探测器的输出电压增大到一定值后开始减小,停光后输出电压瞬间上升到最大值后缓慢下降到背景值如图 3(b)所示.图 3

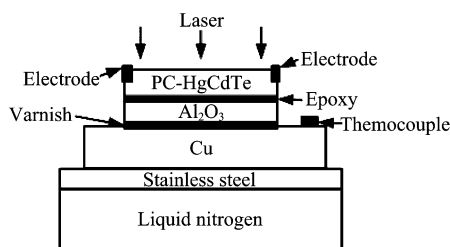


图 1 光导型 HgCdTe 探测器结构示意图
Fig. 1 Cross section of the PC-HgCdTe sample

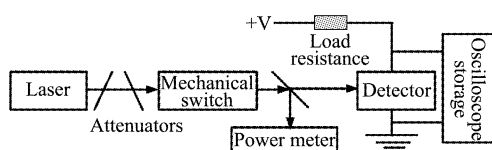


图 2 实验装置示意图
Fig. 2 Experimental setup

(c)为激光辐照过程中铜块的温度变化曲线.从两幅典型的实验数据图中可以发现,在激光辐照和停照过程中,明显有两个响应时间.图 3(a)的实验现象与以往的文献中报道的现象一致,图 3(b)为本次实验观察到的新现象.

图 4 为探测器在 230 W/cm^2 CO_2 激光不同辐照时间下的电压响应曲线.当辐照时间小于 5 s 时,激光辐照过程中的探测器输出电压只增不减,如图 4(a)所示.随着激光辐照时间的继续增大,在激光辐照过程中,探测器的输出电压增大到特定值后逐渐减小.激光停止辐照的瞬间,输出电压又很快上升,然后缓慢的减小到初始值.

1.2 实验现象讨论

以上两组实验现象说明,当激光辐照时间一定时,只有激光功率增大到一定程度后,探测器的输出

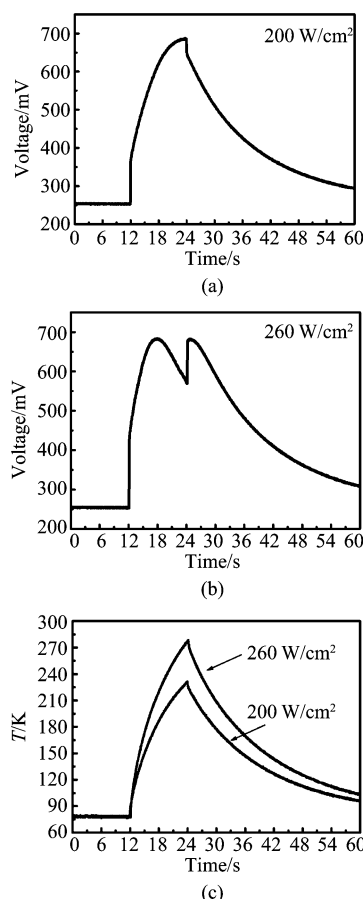


图 3 HgCdTe 探测器在不同功率密度 CO_2 激光辐照下的电压响应曲线(a)入射激光功率密度为 200 W/cm^2 , (b)入射激光功率密度为 260 W/cm^2 , (c)铜块的温度变化曲线
Fig. 3 Voltage response curves of the HgCdTe detector under different CO_2 laser power density illumination: (a) laser power density = 200 W/cm^2 , and (b) laser power density = 240 W/cm^2 , (c) Temperature variation curve of the copper

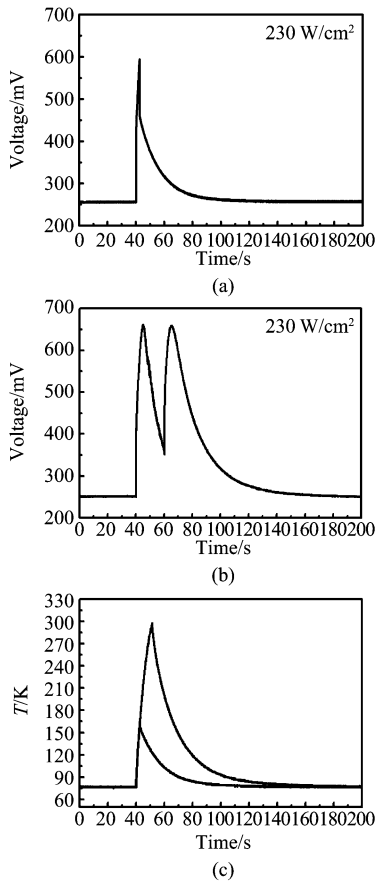


图4 HgCdTe 探测器在 230 W/cm^2 CO_2 激光不同辐照时间下的电压响应曲线(a)辐照时间 2.5 s, (b)辐照时间 20 s, (c)铜块的温度变化曲线

Fig.4 Voltage response curves of the HgCdTe detector and temperature variation curves of copper under different laser irradiation time: (a) laser irradiation time = 2.5 s, and (b) laser irradiation time = 20 s, (c) Temperature variation curve of the copper

电压才会减小;当激光功率一定时,只有激光辐照时间足够长后,探测器输出电压才会减小.激光辐照过程中出现输出电压减小现象后,在激光停照后,输出电压先回弹到最大输出电压值,然后才缓慢降为初始值.且激光辐照过程中的响应电压最大值等于停止辐照后输出电压回弹电压的最大值.并且在激光辐照过程中和停照后,存在这两个电压响应时间尺度.从以上两组实验现象分析可看出,探测器的输出电压与温度存在某种联系,即存在一个特定的温度 T_0 ,当温度 $T > T_0$ 后,电压开始减小.

2 物理模型

2.1 实验现象

由图3和图4的可知,波段外激光辐照时,探测器已明显的升温.器件的导电性随温度强烈的变化,

所以波段外激光辐照光导型器件必须考虑温度的影响,输出信号的表达式为^[11]

$$V_{oc} = \frac{l}{\int q(n(T)\mu_n(T) + p(T)\mu_p(T)) ds} I, \quad (1)$$

其中, l 为芯片水平方向的长度, I 为电流, q 为电荷电量, n, p 分别为电子和空穴的浓度, $\mu_{n(p)}(T)$ 分别为电子和空穴的迁移率, s 为探测器芯片的截面积.由式(1)可知,输出信号主要受载流子迁移率和载流子浓度随温度变化决定.实验中所使用的探测器为 N 型(杂质浓度 $N_D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$).在热平衡状态,可由电中性条件 $n(T) = N_D + p(T)$ 和质量作用定理 $n_i^2(T) = n(T)p(T)$ 确定电子和空穴的浓度:

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

$$p(T) = \frac{-N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2(T)}}{2}$$

其中, n_i 为本征载流子浓度,表达式为^[12]:

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

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, E_g 为材料禁带宽度, $E_g = -0.298 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4$ (eV), 当 $x = 0.31$, T 在 77 K 至 300 K 之间时,电子和空穴的迁移率近似为^[13]: $\mu_{n(p)}(T) = 2.64 \times 10^9 T^{-2.2} (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$. 由式(1) ~ (3) 计算得到输出信号与温度的关系如图5所示. T_0 即对应于图5中输出电压为最大时的温度,约为 260 K.

由图5可知,当温度 $T < T_0$ 时,载流子浓度主要来源于杂质电离,即 N_D 远大于 n_i . 在初始温度 77 K 时,本征载流子浓度 n_i 远小于杂质电离所提供的载流子浓度,在一定温度范围内可认为载流子浓

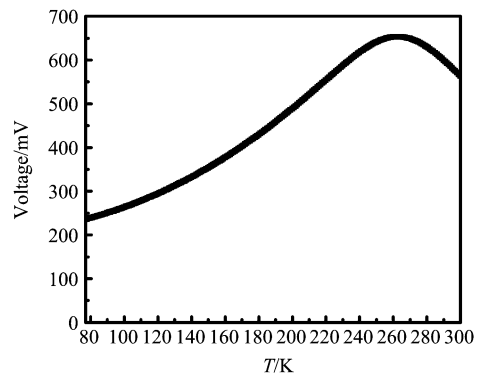


图5 输出电压随温度变化的计算曲线

Fig.5 Calculated curve of temperature dependence of the output voltage

度基本保持不变. 此时,探测器的输出信号主要受载流子迁移率的影响,而电子和空穴的迁移率随温度的升高而减小,引起探测器电阻的增大,响应电压增大;当 $T > T_0$ 时,热激发载流子导致的本征载流子浓度将大于杂质电离所提供的载流子浓度,且热激发产生的本征载流子浓度随温度成指数增长,导致芯片电阻迅速减小,响应电压降低.

2.2 数值计算的基本方程

数值模型基于漂移扩散模型与热传导模型. 激光均匀辐照在探测器芯片上,如图 1 所示. 建立二维热传导模型,对应的二维热传导方程为:

$$c_j \rho_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + \alpha_j (1 - r) P(t) \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

式中,下标 j 分别对应 HgCdTe 芯片、环氧树脂胶层、 Al_2O_3 层、清漆胶层和 Cu 块层; c_j, ρ_j, k_j 分别为各层的定容比热容,质量密度和热导率; T_j 为各层温度; α_j 为各层的吸收系数,其中 HgCdTe 芯片、环氧树脂胶层、 Al_2O_3 层、清漆胶层和 Cu 块的吸收系数分别为 10^{-18} m^2 、 10^{-4} m^{-1} 、 10^6 m^{-1} 、 10^{-4} m^{-1} 和 10^{-2} m^{-1} ; r 为反射率; $P(t)$ 为激光的功率密度.

漂移扩散方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n - R + G \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - R + G \end{aligned} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla \varphi) = q(N_D - n + p)$$

其中, $\mathbf{J}_{n(p)}$ 为电子(空穴)的电流密度, R 为复合率, G 为产生率, φ 为电势, ε 为介电常数. 电子(空穴)的电流密度方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_n &= -q\mu_n(T)n\nabla\varphi + qD_n(T)\nabla n \\ \mathbf{J}_p &= -q\mu_p(T)p\nabla\varphi + qD_p(T)\nabla p \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $D_{n(p)}(T)$ 为电子(空穴)的扩散系数. 由于是波段外激光辐照,所以不考虑本征光激发 $G=0$. 模型考虑的最基本的复合为 Shockley-Read-Hall 型复合,表达式为:

$$R = \frac{np - n_i^2(T)}{\tau_p(n + n_i(T)) + \tau_n(p + n_i(T))} \quad (7)$$

其中, $\tau_{n(p)}$ 为电子(空穴)的寿命.

3 物理模型

3.1 器件结构对温度场分布的影响

图 6 为考虑探测器多层结构后计算得到的温度曲线,其中激光辐照时间为 12 s,激光功率密度为 210 W/cm^2 . 从 HgCdTe 芯片温度曲线和铜块温度曲

线可知,芯片的温度曲线在升温和降温过程中存在两个明显的响应时间,铜块的温度是连续变化的. 图 6 中计算得到的铜块温度与图 3(c) 中测量得到的温度变化基本一致. 为了合理解释芯片温度曲线的分段性,我们计算了不同时刻探测器各层的温度变化情况,计算结果如图 7 所示.

图 7(a) 为激光辐照过程中温度变化曲线,在激光辐照 10 ms 时,铜块的温度基本保持不变, Al_2O_3 层因为吸收激光能量而升温,在低温清漆胶层和环氧树脂胶层存在两个明显的温度梯度. 这主要是因为两胶层低热导率导致的热瓶颈现象. 当时间到达 100 ms 时,芯片与 Al_2O_3 层达到相同温度,环氧树脂胶层中的温度梯度消失,铜块开始升温,低温清漆胶层中的温度梯度逐步达到稳定值. 从 100 ms 到 1 s 的时间段内,整个探测器开始以相同速度升温,且升温速度明显低于前 100 ms 的升温速度,这是因为探测器整体的热容比较大. 通过图 7(a) 可以明显看出 0~100 ms 对应图 6 中 0~1 段的变化过程,100 ms 以后的温度变化速度对应图 6 中 1~2 段的温度变化速度. 正是因为胶层的作用,导致了图 6 中芯片升温过程中存在两个时间尺度明显不同的过程.

图 7(b) 为激光辐照停止照射后探测器不同时刻各层的降温过程,在停止照射 100 ms 时,低温清漆胶层中的温度梯度消失,HgCdTe、 Al_2O_3 和铜块达到同一温度. 在 10 ms 时,环氧树脂胶层中产生温度梯度,这是因为 Al_2O_3 和铜块之间存在一个较大温差,导致热量从 Al_2O_3 层流向铜块的速度要大于热量从 HgCdTe 流向 Al_2O_3 层的速度. 10 ms 以后,随着低温清漆胶层中温差的减小和环氧树脂胶层中温差的增大,热量从 HgCdTe 流向 Al_2O_3 层的速度将大于热量从 Al_2O_3 层流向铜块的速度,并最终

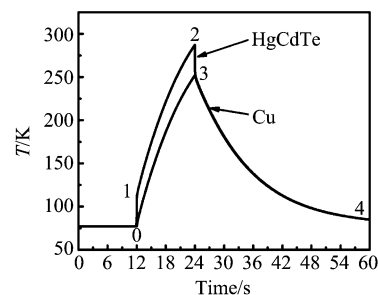


图 6 激光辐照过程中 HgCdTe 芯片和铜块的温度计算曲线
Fig. 6 Calculated temperature curves of HgCdTe and copper under laser irradiation

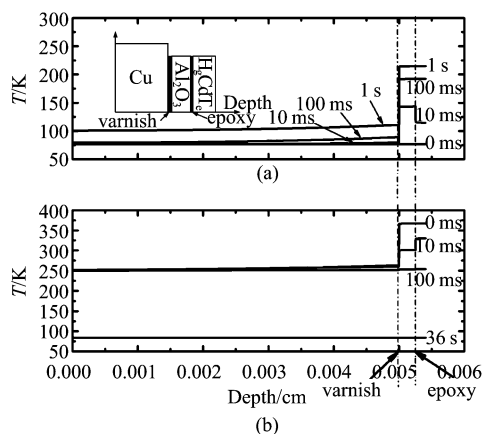


图7 260 W/cm^2 激光辐照下探测器各层不同时刻温度分布图表面 (a) 激光辐照过程中, (b) 激光停止辐照后
Fig.7 Time evolution of the thermal profile for the detector with laser power density = 260 W/cm^2 : (a) during the laser irradiation, and (b) after the laser irradiation

导致在 100 ms 时三者达到相同的温度. 图 7(b) 中的 0 ms 到 100 ms 过程, 对应图 6 中 HgCdTe 芯片 2~3 段温度变化过程. 100 ms 以后, 探测器的各层以统一速度开始降温, 由于铜块的热沉作用, 导致降温速度明显减慢, 直到 36 s 后才基本降到初始温度. 这一过程对应图 6 中的 3~4 过程. 同样, 降温过程也存在两个明显的降温速度.

3.2 波段外激光辐照下光导型器件的响应电压模拟

图 8 为不同激光功率辐照下输出电压的数值计算结果. 对比实验数据图 3 和计算结果图 8 可看出, 计算结果与实验结果基本吻合. 图 3(c) 中的温度曲线为实测的铜块温度曲线, 图 8(c) 为芯片温度曲线的计算值, 芯片温度变化表现为明显的 4 段而铜块温度连续变化, 这与图 6 中的计算结果一致. 当激光功率为 200 W/cm^2 , 辐照时间为 12 s, 芯片温度的最大值小于特定拐点温度 265 K, 所以在激光辐照过程中输出信号只增不减, 如图 8(a) 所示. 当激光功率超过 260 W/cm^2 后, 由于芯片最高温度超过拐点温度, 所以在激光辐照过程中信号出现减小趋势, 如图 8(b) 所示, 且温度越高电压下降越明显. 该计算结果也很好的说明了激光开启和关闭瞬间快速变化的信号是由于胶层热瓶颈作用导致的.

图 9 为相同辐照功率不同辐照时间下输出电压的计算结果, 计算结果与图 4 中的实验结果基本吻合, 进一步证实了光导型探测器对波段外激光的响

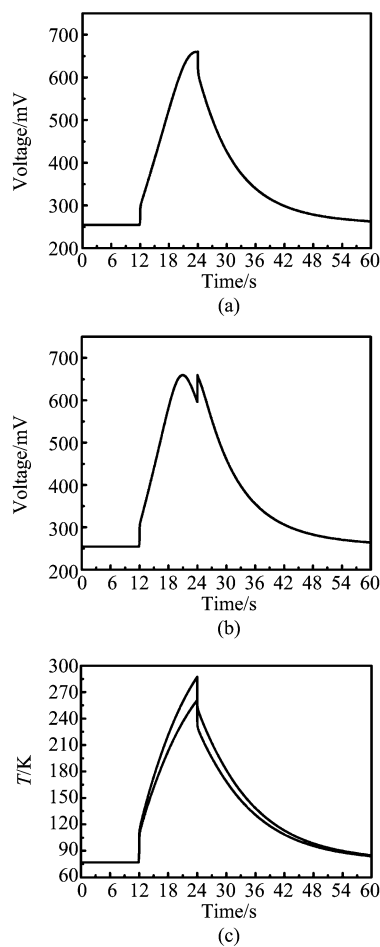


图8 HgCdTe 探测器在不同功率密度 CO_2 激光辐照下的电压响应曲线的计算结果 (a) 激光功率密度为 200 W/cm^2 , (b) 入射激光功率密度为 260 W/cm^2 , (c) HgCdTe 芯片的温度变化曲线
Fig. 8 Calculated results of HgCdTe detector voltage response under different density of CO_2 laser power illumination, (a) laser power density = 200 W/cm^2 , and (b) laser power density = 260 W/cm^2 , (c) Temperature variation curve of the HgCdTe sample

应为温度效应.

4 结论

主要研究了光导型 HgCdTe 探测器在波段外激光辐照下的载流子输运问题. 通过将漂移扩散模型与热传导方程相结合, 建立了连续波段外激光辐照光导型探测器的二维物理模型. 该模型不但考虑了探测器温度对载流子迁移率和浓度的影响, 而且细致地讨论了探测器结构对响应电压的影响, 数值计算结果与实验结果基本吻合. 该模型的建立在研究波段外激光辐照光导型探测器的载流子输运问题方面有重要的参考价值.

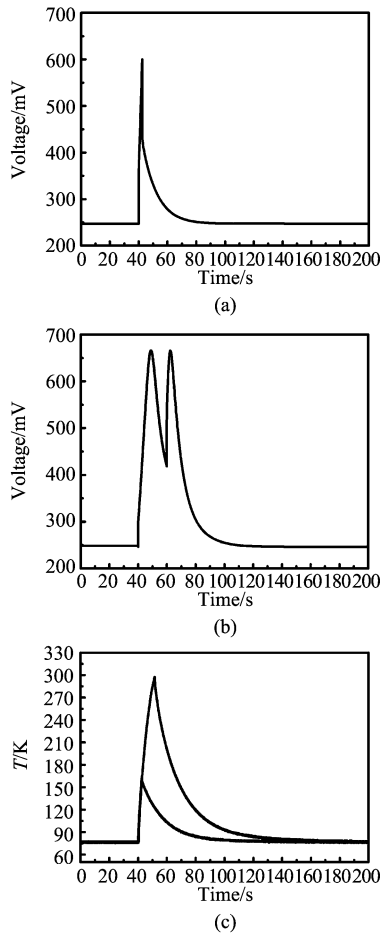


图9 HgCdTe 探测器在 230 W/cm^2 CO_2 激光不同辐照时间下的电压响应曲线的计算结果(a)辐照时间 2.5 s, (b)辐照时间 7 s, (c)辐照时间 20 s, (d)HgCdTe 芯片的温度变化曲线

Fig. 9 Calculated results of HgCdTe detector voltage response and temperature variation under different laser irradiation time; (a) laser irradiation time = 2.5 s, and (b) laser irradiation time = 20 s, (c) Temperature variation curve of the HgCdTe sample

REFERENCES

- [1] CHENG Xiang-Ai, LU Qi-Sheng, MA Li-Qin, *et al.* Experimental study of HgCdTe (PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser[J]. *Acta Opt. Sin.* (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. *光学学报*), 2003, **23**: 622 - 625.
- [2] LI Xu-Qian, CHENG Xiang-Ai, WANG Rui, *et al.* Investigation of thermal effect of HgCdTe detector with irradiation by off-band CW CO_2 laser[J]. *China J. Letter.* (李修乾, 程湘爱, 王睿, 等. 波段外 CW CO_2 激光辐照 HgCdTe 探测器热效应研究. *中国激光*), 2003, **30** (12): 1070 - 1074.
- [3] LI Xu-Qian, CHENG Xiang-Ai, WANG Rui, *et al.* Experimental study on the response of HgCdTe (PC) detector irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Partial Beams* (李修乾, 程湘爱, 王睿, 等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器的实验研究. *强激光与粒子束*), 2003, **15** (1): 40 - 44.
- [4] WANG Rui, SI Lei, LU Qi-Sheng, *et al.* The experiment study on HgCdTe (PC Type) detector system irradiated by laser out of response waveband[J]. *Laser & Infrared.* (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. *激光与红外*), 2003, **33** (5): 335 - 338.
- [5] MA Li-Qin, LU Qi-Sheng, DU Shao-Jun, *et al.* An numerical simulation of the melt-threshold of InSb induced by CW laser beams[J]. *China J. Letter.* (马丽芹, 陆启生, 杜少军, 等. 光导型探测器瞬变行为的仿真. *中国激光*), 2004, **31** (3): 342 - 346.
- [6] LI Li, LU Qi-Sheng. Temperature changes in PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams[J]. *Acts Opt. Sin.* (李莉, 陆启生. PC 型 HgCdTe 光电探测器在双波段组合激光辐照下的温度计算. *光学学报*), **28** (6): 912 - 916.
- [7] HE Yuan-Xing, JIANG Hou-Man. Abnormal response of PV-type HgCdTe detector under intense laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams* (贺元兴, 江厚满. 激光辐照下 PV 型 HgCdTe 探测器反常响应机理. *强激光与粒子束*), **20** (8): 1233 - 1237.
- [8] LI Li, LU Qi-Sheng. Numerical simulation of dynamic response of PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams. *Acts Opt. Sin.* (李莉, 陆启生. 光导型 HgCdTe 光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟. *光学学报*), 2008, **28** (10): 1952 - 1958.
- [9] HE Yuan-Xing, JIANG Hou-Man. Electrical response of PC-type HgCdTe detector under out-band 10.6 μm laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams* (贺元兴, 江厚满. 波段外 10.6 μm 激光辐照下光导型 HgCdTe 探测器的电学响应. *强激光与粒子束*), 2010, **22** (12): 2829 - 2833.
- [10] ZHENG Xin, JIANG Tian, CHENG Xiang Ai, *et al.* A new phenomenon of PC-InSb detector irradiated by band-off laser. *Acta phys. Sin.* (郑鑫, 江天, 程湘爱, 等. 波段外激光辐照光导型 InSb 探测器的一种新现象. *物理学报*) to be published.
- [11] LIU En-Ke, ZHU Bing-Sheng, LUO Jin-Sheng. *physics of Semiconductor* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. *半导体物理学*. 电子工业出版社), 2009: 75.
- [12] CHU Jun-Hao. *Narrow-bandgap semiconductor physics* [M]. Beijing: Scientific Press (褚君浩. *窄禁带半导体物理学*. 科学出版社), 2005: 933.
- [13] Shen Xue-Chu. *The Spectrum and Optical Properties of Semiconductor* [M]. Beijing: Scientific Press (沈学础. *半导体光谱和光学性质*. 科学出版社), 2002: 105.