

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0232-04

飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的效应

柳 涛¹, 袁 孝^{1*}, 张 翔¹, 刘 莉²

(¹华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)
(²武汉科技学院电子信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 在恒压偏置的条件下, 采用重复频率为 1 kHz 和 10 Hz 的飞秒激光分别对光导型室温中红外 HgCdTe 光电探测器进行辐照, 得到了该探测器在飞秒激光辐照下的输出波形和失效时间。在重复频率为 1 kHz, 能量密度为 0.024 mJ/cm² 的飞秒激光连续辐照下, 探测器输出信号表现为飞秒激光脉冲重复频率的波包, 参考信号可分辨, 但发生畸变; 当能量密度增加到 0.60 mJ/cm² 时, 参考信号消失, 探测器失效。在重复频率为 10 Hz 的飞秒激光作用下, 探测器的失效时间随飞秒激光能量密度的增加而增加, 当激光能量密度增加到 2.03 mJ/cm² 时, 探测器的失效时间达到 520 μs。探测器输出波形表明, 飞秒激光辐照过程中存在热效应, 导致探测器电阻增加, 输出信号电压上升。

关键词 超快光学; 飞秒激光; HgCdTe 探测器; 失效时间; 激光辐照

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

Response of PC Type HgCdTe Detectors Irradiated by Femtosecond Pulses Laser

LIU Tao¹, YUAN Xiao¹, ZHANG Xiang¹, LIU Li²

¹ State Key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² The Department of Electronics and Information, Wuhan University of Science and Engineering, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract The output signal and out-of-service time of the PC type HgCdTe detectors are obtained when irradiated with femtosecond laser at the repetition rate of 1 kHz, and repetition rate of 10 Hz, respectively. When irradiated with the 1 kHz repetition rate femtosecond laser at the fluence of 0.024 mJ/cm², the output signal is distorted and the reference signal can be perceived, and the reference signal vanished, the detector disabled when the laser fluence increased to 0.60 mJ/cm². While irradiated with the femtosecond laser of 10 Hz repetition rate, the out-of-service time of the detector was increasing with the irradiated fluence and the out-of-service time of 520 μs is obtained at the fluence of 2.03 mJ/cm². The output signal indicates that the temperature of the detector is ascending while irradiated with femtosecond laser pulses continuously, which results in the resistance increasing.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser pulses; HgCdTe detector; out-of-service time; laser irradiation

1 引 言

光电探测器所处的光环境对探测器的应用具有极其严重的影响, 随着红外探测器的广泛应用和超短脉冲激光技术的发展, 研究红外光电探测器在飞秒激光辐照下的工作性能显得越来越重要。光电探测器的激光辐照效应前期的研究主要集中在长脉冲和连续激光领域, 讨论探测器在激光作用下的动态响应、饱和效应、混沌效应以及损伤阈值的确定等^[1~4]。在超短飞秒激光脉冲作用下, 由于激光脉

冲超短、超强的特性, 与光电探测器作用时表现出新的效应。HgCdTe 光电探测器的响应峰值波长可以由材料的组分的改变而变化, 是红外光学中一种重要的探测器件。本文主要对光导型室温中红外 HgCdTe 探测器在飞秒激光辐照下的失效性进行了实验研究, 并给出理论分析。

2 实验装置

飞秒激光辐照 HgCdTe 光电探测器的实验装

基金项目: 高技术 863 计划激光技术领域(2003AA005037)资助课题。

作者简介: 柳 涛(1980—), 男, 华中科技大学激光技术国家重点实验室硕士研究生, 主要从事光电探测器的飞秒激光辐照效应的研究。

* 通信联系人。E-mail: xyuan@mail.hust.edu.cn

置如图 1(a) 所示, 探测器恒压偏置, 飞秒激光垂直于探测器光敏面照射。实验采用的飞秒激光波长为 800 nm, 重复频率分别为 1 kHz 与 10 Hz, 脉宽分别为 50 fs 和 40 fs, 光束直径分别为 0.8 cm 和 2.4 cm, 光斑面积远大于探测器光敏面面积, 可以视为均匀辐照。参考光源采用频率调制的红光半导

体激光器, 调制频率为 33 kHz 或 100 kHz, 探测器对 100 kHz 参考信号的响应输出波形如图 1(b) 所示。探测器输出信号经宽带放大器放大后由数字示波器测量, 实验采用的示波器为泰克公司的 TDS430A 和 TDS3032 示波器。

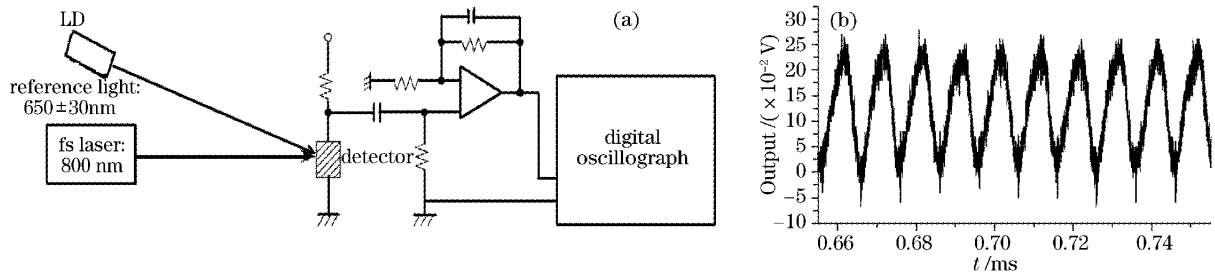


图 1 飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器实验示意图(a)和 100 kHz 参考信号响应波形(b)

Fig. 1 Schematic diagram of PC type HgCdTe detector irradiated by femtosecond laser (a) and 100 kHz reference signal waveform (b)

3 实验结果与分析

3.1 1 kHz 飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的实验结果

HgCdTe 探测器光敏面为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 当作用在探测器上的飞秒激光能量密度为 0.024 mJ/cm^2 时, 探测器输出信号发生畸变, 变形为飞秒激光重复频率的波包, 但参考信号依然可见, 如图 2(a) 所示。在飞秒激光脉冲照射到探测器光敏面时, 探测器的电阻值急剧下降, 表现为参考信号发生“断裂”, 而且信号的变化幅度随飞秒激光能量密度的升高而增

加, 如图 2 所示。当飞秒激光的能量密度为 0.60 mJ/cm^2 时, 输出信号的变化达到 0.6 V , 如图 2(b), 而在激光的能量密度为 0.024 mJ/cm^2 时, 这个变化幅度只有 0.2 V 。当飞秒激光能量密度为 2.4 mJ/cm^2 时, 这个变化幅度则增加到了 9 V , 且峰值电压高于无飞秒激光辐照时的输出信号电压, 如图 2(c), 此时探测器电阻大于其初始阻值。当飞秒激光能量密度大于 0.60 mJ/cm^2 时, 在 1 kHz 飞秒激光连续辐照下, 参考信号不可分辨, 探测器信噪比减小, 失去对参考信号的探测能力。

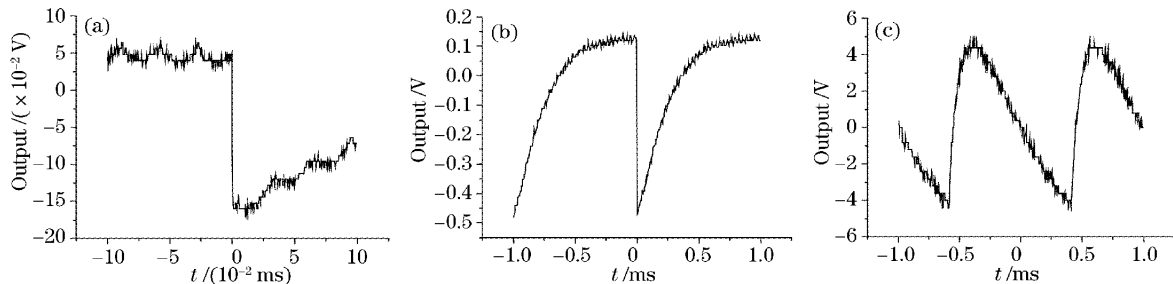


图 2 在不同激光能量密度下, 用 1 kHz , 50 fs 激光辐照 HgCdTe 探测器的输出信号(参考信号 33 kHz)

Fig. 2 Response of HgCdTe detector irradiated with a 1 kHz , 50 fs laser of different fluence (reference signal 33 kHz).

(a) 0.024 mJ/cm^2 ; (b) 0.60 mJ/cm^2 ; (c) 2.4 mJ/cm^2

3.2 10 Hz 飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的实验结果

在飞秒激光能量密度为 0.48 mJ/cm^2 的情况下, 辐照时间不同, 探测器输出信号波形会存在一定的变化, 如图 3 所示。在图 3(a) 中, 飞秒激光辐照探测器的时间短于 1 s , 在激光脉冲到达光敏面时探

测器输出信号急剧下降至饱和波谷, 并持续 $4 \mu\text{s}$ 后开始上升, 上升过程中经过一次轻微振荡 (quiver) 后, 信号波形上升到比初始信号波形更高的水平, 然后再逐渐恢复到正常电压水平; 在图 3(b) 中, 飞秒激光辐照时间大于 1 s , 探测器输出信号波形在上升阶段的振荡现象变得更加明显, 并出现饱和波峰。

当飞秒激光能量密度超过 1.01 mJ/cm^2 后,探测器输出信号波形因受辐照时间长短变化而产生的区别不再明显。这表明,在重复频率为 10 Hz 的飞秒激光作用下,当激光能量密度小于 1.01 mJ/cm^2 时,

飞秒激光连续辐照 HgCdTe 探测器的积累效应作用显著,当激光能量密度超过此值后多脉冲连续作用的积累效应不再明显,可以忽略不计。

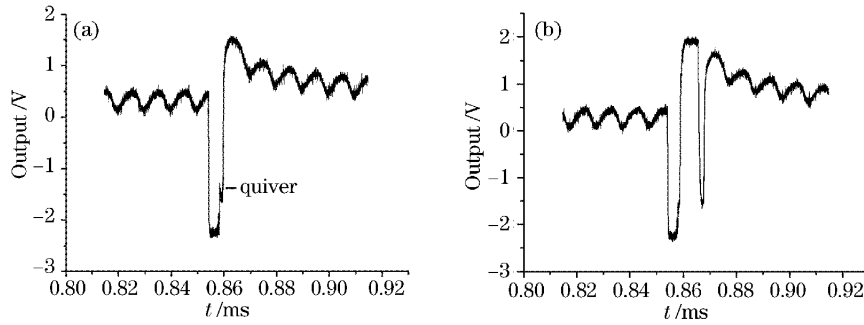


图 3 用能量密度为 0.48 mJ/cm^2 的重复频率 10 Hz ,脉冲宽度 40 fs 的激光辐照 HgCdTe 探测器的输出信号(参考信号 100 kHz)。(a) 辐照时间 $t < 1 \text{ s}$, (b) 辐照时间 $t > 1 \text{ s}$

Fig. 3 Response of HgCdTe detector irradiated with a 10 Hz repetition rate, 40 fs laser at the fluence of 0.48 mJ/cm^2 (Reference signal 100 kHz). (a) Irradiated time $t < 1 \text{ s}$, (b) irradiated time $t > 1 \text{ s}$

进一步增加飞秒激光的能量密度,探测器输出信号的饱和波峰持续的时间随激光能量密度的增加而增加,而且振荡现象也更加明显,但饱和波谷持续的时间一直保持在 $4 \mu\text{s}$ 不变。当激光能量密度为 2.03 mJ/cm^2 时,探测器输出波形饱和波峰持续时间为 $450 \mu\text{s}$,同时振荡也达到 6 次,探测器的失效时间增加到了 $520 \mu\text{s}$,如图 4(a)所示;而在相同重复频率的纳秒激光辐照下,当能量密度为 3.82 mJ/cm^2

时,探测器的失效时间只有 $6 \mu\text{s}$,且无饱和振荡现象出现,如图 4(b)所示,可见,超短脉冲激光更容易导致 HgCdTe 探测器较长时间的失效。不同能量密度的飞秒激光辐照下,探测器输出信号的饱和波峰持续时间和波形恢复过程中振荡的次数如表 1 所示,表中 I 为飞秒激光能量密度, t 为飞秒激光连续辐照的时间, τ_s 为饱和波峰持续时间,Number 为振荡次数。

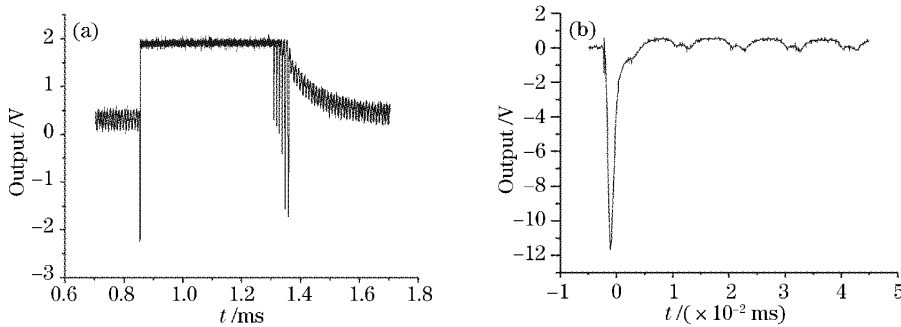


图 4 不同脉冲宽度的激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的输出信号波形,参考信号: 100 kHz 。(a) 脉冲宽度 40 fs , 重复频率 10 Hz ,能量密度 2.03 mJ/cm^2 ; (b) 脉冲宽度 10 ns ,重复频率 10 Hz ,能量密度 3.82 mJ/cm^2

Fig. 4 Response of HgCdTe detector irradiated by laser of different pulse width,reference signal: 100 kHz . (a) 40 fs pulse width, 10 Hz repetition rate at the fluence of 2.03 mJ/cm^2 , (b) 10 ns pulse width, 10 Hz repetition rate at the fluence of 3.82 mJ/cm^2

表 1 探测器输出信号饱和波峰持续时间和波形恢复过程中振荡的次数

Table 1 Duration of the saturated wave crest and numbers of vibration in the response of detector

$I / (\text{mJ/cm}^2)$	0.48	0.48	1.01	1.01	1.37	1.65	2.03
	$t < 1 \text{ s}$	$t > 1 \text{ s}$	$t < 1 \text{ s}$	$t > 1 \text{ s}$			
$\tau_s / \mu\text{s}$		5		111	302	346	450
Number	0	1	0	4	5	5	6

3.3 实验结果分析

在能量密度大于 0.6 mJ/cm^2 , 重复频率为 1 kHz 和能量密度大于 0.48 mJ/cm^2 , 重复频率为 10 Hz 的飞秒激光作用下, 光导型 HgCdTe 探测器电阻减小与增大现象并存, 并且在重复频率为 10 Hz 的飞秒激光作用下的输出波形存在饱和波谷、饱和波峰以及振荡效应。这是由于探测器的电阻与 HgCdTe 半导体材料内部载流子密度和输运状态相关, 当飞秒激光辐照探测器时, 探测器内部光生载流子密度的增加, 会导致探测器电阻的减小; 但同时由于半导体材料吸收激光能量, 电子和晶格的温度升高, 振动加剧, 相互碰撞的几率增加, 也可能导致探测器的电阻增加。

重复频率为 10 Hz , 能量密度大于 0.48 mJ/cm^2 的飞秒激光辐照时, HgCdTe 探测器的输出波形在饱和波谷持续时间随激光能量密度变化几乎保持恒定值, 这一现象可以通过理论模拟得到证实。振荡现象在 PV 型 HgCdTe 探测器的相关实验中也曾观察到^[5], 这种类似的响应机制还需要进一步仔细研究。

4 结 论

在室温条件下, 用重复频率分别为 1 kHz 和 10 Hz 的飞秒激光对光导型 HgCdTe 探测器进行了辐照实验。当用重复频率为 1 kHz 的飞秒激光辐照时, 在能量密度为 0.024 mJ/cm^2 情况下, 探测器输出信号发生畸变, 但参考信号依然可分辨, 而当能量密度上升到 0.6 mJ/cm^2 后, 探测器失效。在 10 Hz 重复频率的飞秒激光作用下, 探测器输出信号存在饱和效应和振荡现象, 在激光能量密度为 2.03 mJ/cm^2 时,

探测器失效时间达到 $520 \mu\text{s}$ 。飞秒激光辐照光导型 HgCdTe 探测器的输出信号振荡现象的机理以及失效的定量分析还有待进一步研究。

致谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变中心魏晓峰研究员、朱启华副研究员、曾小明和韩伟同志在实验方面的支持和有益讨论; 感谢昆明物理所赵鹏研究员在探测器方面的支持和热心帮助。

参 考 文 献

- 1 Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun. Dynamic responses of photoconductive detectors under high power laser irradiation [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(2): 155~158
马丽芹, 陆启生, 杜少军. 强激光辐照 PC 型探测器的动态响应 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(2): 155~158
- 2 Li Xiuqian, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Experimental study on the response of HgCdTe (PC) detector irradiated by laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 40~44
李修乾, 程湘爱, 王睿等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(1): 40~44
- 3 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
- 4 Liu Xiaoran, Lu Jian, Shen Zhonghua *et al.*. The excitons-model explaining on remaining effect of the PC-type HgCdTe [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(6): 450~452
刘晓然, 陆健, 沈中华等. PC 型 HgCdTe 中记忆效应的激子解释 [J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(6): 450~452
- 5 Li Xiuqian, Cheng Xiangai, Lu Qisheng *et al.*. The study on the response character of HgCdTe detectors under laser irradiation [J]. *J. Academy of Equipment Command and 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