

纳秒激光辐照下 HgCdTe 光伏探测器的瞬态响应特性退化

徐作冬,张检民,林新伟,邵碧波

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

摘要: 为研究光伏探测器瞬态响应特性在短脉冲激光作用下的变化规律,以一种室温下零偏压工作的 HgCdTe 光电二极管为实验对象,测量了该器件对脉冲宽度约 16 ns 的不同强度响应波段内激光的响应信号波形。在探测器的对数线性响应区内,随着入射激光能量密度从约 7.2 nJ/cm² 增大到 75 μJ/cm²,响应波形的宽度逐渐增大,半高宽约由 55 ns 增大到 235 ns,底宽约由 170 ns 增大到 380 ns。脉冲响应波形的展宽意味着器件的瞬态响应特性发生了退化。通过分析强注入条件下光电二极管准中性区光生载流子扩散过程,以及结电场与结电容变化对过剩载流子输运过程的影响,对上述光伏探测器瞬态响应特性退化的特征进行了机理解释。

关键词: 激光辐照效应; 光伏探测器; 瞬态响应; 脉冲信号展宽; HgCdTe

中图分类号: TN215;TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0106001

Transient response degradation of HgCdTe photovoltaic detectors under irradiation of nanosecond laser

Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, Shao Bibo

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

Abstract: In order to investigate the transient response characteristics of photovoltaic detectors irradiated by short-pulse laser, the response waveforms of a HgCdTe photodiode to laser pulses with 16 ns duration and different laser intensities were measured. The photodiode worked with room temperature and zero bias, and the laser wavelength was in the response spectrum of the photodiode. In the detector's linearly logarithmic response zone, the signal waveform broadened gradually with the incident laser energy density from 7.2 nJ/cm² to 75 μJ/cm². The full width at half maximum of signal waveform rose to 235 ns from 55 ns, at the same time the bottom width rose to 380 ns from 170 ns. The pulse response broadening of the detector implied degradation of its transient response characteristics. The mechanism of the response degradation was explained via analysis on the diffusion process of photocarriers in the quasineutral region and on the changes of junction electric field and junction capacitance under high-injection condition.

Key words: laser irradiation effect; photovoltaic detector; transient response; pulse signal widening; HgCdTe

收稿日期:2017-05-10; 修订日期:2017-08-20

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基础研究基金(SKLLIM1401);西北核技术研究所所长线预研基金(12111502)

作者简介:徐作冬(1982-),男,高级工程师,硕士,主要从事光电探测器激光辐照效应方面的研究。Email: xuzuodong@nint.ac.cn

0 引言

基于半导体 pn 结的光伏探测器及其阵列器件具备较好的瞬态响应性能,在激光雷达、红外遥感、大气环境监测及光通信等领域中都具有广泛应用^[1-3]。在不同的应用场景中,探测器接收的光信号特征在强度、时域、频域及光谱等方面差异巨大。研究光伏探测器在不同激光辐照条件下的瞬态响应特性,对于深入理解器件物理、拓展器件应用均可发挥重要作用。

在大部分面向脉冲光信号的应用中,不仅需要关注光电探测器输出信号幅度对光信号参数的依赖关系,而且需要了解探测器时间响应特性的变化情况。目前关于光伏探测器在超短脉冲激光(脉宽为 ps 或 fs 量级)作用下的瞬态响应特性研究已有不少报道,涉及的材料种类包括 Si^[4-5]、Ge^[5]、GaAs^[6]、InGaAs^[7-8]、HgCdTe^[9-10]等,实验现象主要有负响应和波形展宽两种。

豆贤安等^[4]在反偏压工作的 Si p-i-n 探测器上实验发现飞秒激光作用下探测器的响应波形随激光增强而展宽,波形下降沿呈现三个阶段,分析认为主要原因是:飞秒激光产生的过量光生载流子引起空间电荷屏蔽效应造成探测器外加偏置电压作用减弱甚至消失,内建电场崩塌,探测器主要依靠光生载流子的双极扩散过程产生响应信号。Zakharova 等人^[5]报道了超短脉冲激光作用下 Si 与 Ge 光电二极管出现的负响应现象,并以光学漂白(Optical Bleaching)机制进行了定性解释。豆贤安等^[6]对飞秒激光诱发直接带隙半导体的瞬态漂白特性进行了数值仿真研究,发现飞秒激光能够导致激发波长到材料长波限的宽光谱范围的瞬态漂白,且波长越长漂白现象越明显,甚至会引发能带底部出现负吸收现象。胡伟等^[7-8]研究了 InGaAs p-i-n 探测器对不同能量皮秒激光的瞬态响应特性,认为响应脉宽展宽的主要原因是高入射功率条件下两种光生载流子漂移速度不同引起的空间电荷屏蔽效应,另外,在实验上观察到探测器出现了负响应成分,分析认为负响应产生原因主要是二极管表现出了电感特性。崔昊杨等^[9-10]发现在皮秒激光辐照下,

HgCdTe 阵列探测器电极的肖特基接触特性将会造成在正常光信号响应之前先出现一个快速的负脉冲响应。

综上所述,关于光伏探测器在超短脉冲激光作用下的瞬态响应已开展较多研究,但是对于激光作用时间为 ns 量级的情况,相关研究工作很少。很多实际应用中光脉冲信号宽度为 ns 量级,而半导体材料载流子寿命、探测器响应时间等参数一般处于 ns~ μ s 量级,纳秒激光诱导的探测器瞬态响应特性变化及其机理都可能不同于超短脉冲激光作用的情形。因此,开展光伏探测器对纳秒激光瞬态响应特性的研究具有十分重要的理论与实际意义。

文中以一种室温条件下零偏压工作的 HgCdTe 光电二极管商业产品为研究对象,测量了它对不同强度 16 ns 脉宽激光的响应特性。发现随着脉冲激光能量密度的增大,探测器的瞬态响应特性逐渐退化,具体表现为在不同激光强度区间内响应波形呈现出不同特点的展宽。通过分析强注入条件下光电二极管内部光生载流子输运过程的变化,对实验样品脉冲信号展宽现象的特征进行了解释。

1 实验与结果

1.1 实验方法

作为实验对象的光伏型 HgCdTe 单元探测器为成熟商业产品,光谱响应范围约为 2~6 μ m,结构为背照式,光敏元尺寸为 0.1 mm \times 0.1 mm,无光学窗口,工作条件为室温、零偏压,响应时间优于 30 ns。

按照图 1 建立实验系统,以研究不同强度脉冲激光辐照下光伏型 HgCdTe 单元探测器时间响应特性的变化。使用 2 μ m 波段脉宽 16 ns 的单脉冲激光

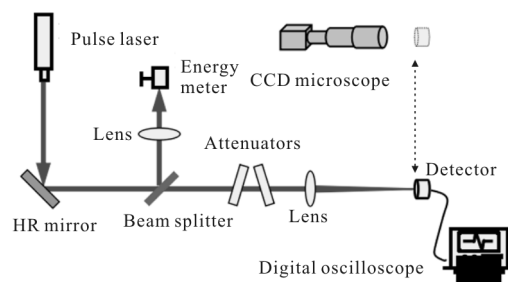


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental system

进行辐照。脉冲激光穿过 ZnSe 分束片后,经 CaF₂ 透镜聚焦,入射到探测器的光敏面上。保持光敏面上的激光光斑面积不变,调节中性密度衰减片使入射激光能量密度约从 7.2 nJ/cm² 逐渐增加到 75 μJ/cm²,并通过分束监测光路和激光能量计对每一次激光辐照的能量进行监测。利用数字示波器记录实验样品对不同强度脉冲激光的响应信号波形,示波器参数设置为 100 ns/div、采样率为 5 Gs/s、输入阻抗为 50 Ω。

利用 CCD 显微镜和精密电控位移台实现了一种准原位靶面光斑测量的方法,兼有光斑测量与样品定位功能。首先,利用相纸通过烧蚀法获得靶面处的聚焦光斑图像,再将相纸平移至显微镜下,调节显微镜位置使烧蚀光斑成像清晰,然后保持显微镜位置不变,将相纸替换为辐照样品,调节样品位置,使光敏面在显微镜下成像清晰并且同烧蚀光斑中心重合。最后,将实验样品平移至辐照光路上,则此时探测器光敏面将位于聚焦光斑处,而光斑面积可从 CCD 显微镜拍摄的烧蚀光斑图像中获取。按此方法测得辐照光斑面积约为 1.32 mm²。

1.2 实验结果

图 2 给出了八种不同激光能量密度条件下的探

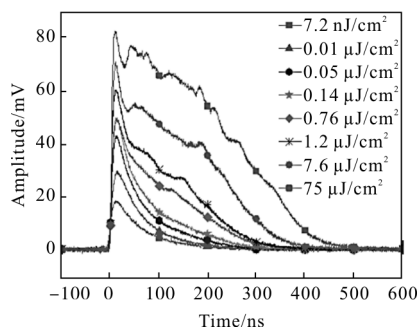
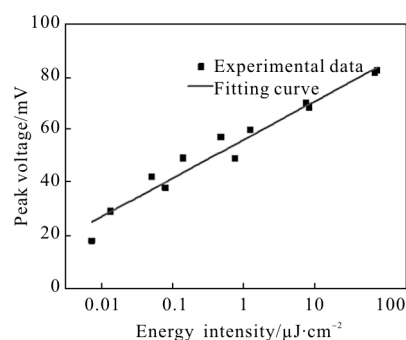


图 2 不同激光能量密度下的响应信号波形
Fig.2 Response signal waveforms under different laser energy densities

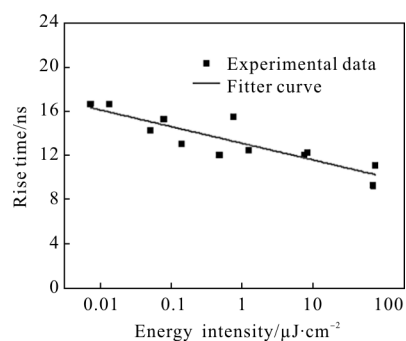
测器响应波形。随着激光辐照强度的增大,响应波形的峰值与宽度均逐渐增大,而上升沿没有明显变化。因此,波形宽度随着激光的增强而增大,其具体表现是波形下降沿的展宽,或者说信号恢复时间的增大。在实验条件范围内,探测器信号峰值处于对数线性响应区内,如图 3(a)所示。信号上升时间在 16~10 ns 变化,如图 3(b)所示。信号上升时间与辐照激光脉冲

宽度相近,这意味着信号下降沿基本上反映的是光脉冲结束之后探测器内部光生载流子的输运过程。信号半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)与底宽(Bottom Width, BW)都随着光照变强而增大,分别如图 3(c)与图 3(d)所示,半高宽从约 55 ns 增大到约 235 ns,底宽从约 170 ns 增大到约 380 ns。两者的绝对增幅与相对增幅分别约为 (180 ns, 328%)与 (210 ns, 124%)。探测器响应信号的恢复时间逐渐变大,意味着探测器的瞬态响应特性发生了退化,而这对于高速测量应用是不利的。



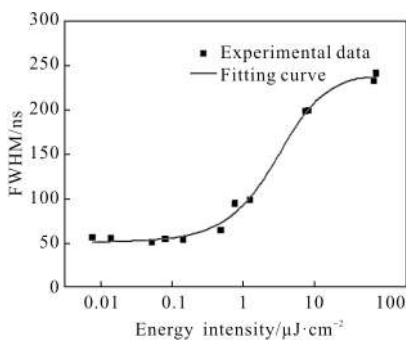
(a) 峰值

(a) Peak



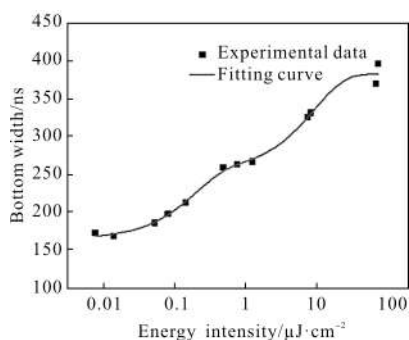
(b) 上升时间

(b) Rise time



(c) 半高宽

(c) FWHM



(d) 底宽

(d) Bottom width

图 3 探测器响应波形特征量与激光能量密度的关系

Fig.3 Relations between waveform characteristics of detector response and laser energy density

对图 3(c)与图 3(d)中的测量数据进行函数拟合,发现半高宽、底宽与激光强度的关系均表现为双指数关系:

$$w = w_0 + w_1 \exp(-I/I_1) + w_2 \exp(-I/I_2) \quad (1)$$

式中: w 为波形宽度(半高宽或底宽); w_0 、 w_1 与 w_2 为时间量纲的常数; I 为激光能量密度; I_1 与 I_2 为能量密度量纲的常数。表 1 列出了各拟合参数。

表 1 曲线拟合参数

Tab.1 Parameters of curve fitting

Parameter	w_0/ns	w_1/ns	$I_1/\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	w_2/ns	$I_2/\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$
FWHM	237	-127	2.86	-59	11.8
BW	381	-90	0.186	-128	9.33

另外,对不同激光强度下的响应波形下降沿进行指数衰减函数拟合,发现:

(1) 当激光能量密度低于 $0.05 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,波形下降沿符合单指数衰减特性;

(2) 当激光能量密度达到 $0.05 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 后,波形下降沿表现为双指数衰减过程,而且下降沿后半段的信号衰减速度较慢,呈现拖尾现象,因此波形的底宽先于半高宽开始变大;

(3) 当激光能量密度达到 $0.76 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 后,下降沿仍然表现为两个时间常数不同的阶段,且前后两段信号衰减速度均变得更慢;随着激光强度继续增大,前半段信号衰减速度低于后半段。

2 分析与讨论

上述实验现象同参考文献[4]报道的 Si 探测器

在飞秒激光作用下的波形展宽现象具有一定程度相似性,但是存在显著区别。参考文献[4]中的信号下降沿表现为三个阶段,并且各个阶段衰减速度相对关系没有发生反转。文中的 HgCdTe 探测器信号下降沿表现为响应时间不同的两个阶段,而且前后两段的衰减速度相对关系随着 ns 脉冲激光逐步增强而发生了反转。参考文献[8]中在不同能量皮秒激光照射下的 InGaAs 探测器信号波形显示出相似的波形下降沿变化特征,但是并未得到分析和解释。

文中的探测器信号衰减时间与激光强度之间的双指数变化关系,以及信号波形下降沿表现为衰减速度不同的前后两段,均意味着存在两种机制共同引起信号下降沿的展宽。

光电二极管响应时间主要受三个因素影响:(1)与二极管结特性及外部电路参数有关的电阻、电容(RC)时间常数;(2)光生载流子从吸收区扩散至耗尽区的过程;(3)光生载流子穿过耗尽区的渡越时间。在实验条件范围内,被测样品的上升沿响应较快,说明器件与外接电路中的 RC 常数很小,吸收层的厚度也较小,器件结构应为 n-on-p 型,p 区为光吸收区。

在强注入情况下,当较强脉冲激光辐照刚停止时,由于耗尽区两侧的 p 区和 n 区还分别存在大量光生空穴和光生电子,它们产生的电场与耗尽区的结电场反向,等效于给耗尽区施加了正向偏压,而正向偏压将导致耗尽区的宽度减小。耗尽区变窄将使得准中性区光生载流子到达耗尽区边界的扩散时间增大,从而导致信号下降沿的后半段出现较慢的响应成分,形成拖尾现象^[11]。因此,在实验中观察到当脉冲激光能量密度达到 $0.05 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 后,信号下降沿后半段的衰减速度变慢,呈现拖尾现象,引起波形的底宽先于半高宽开始变大。

当激光强度继续增大,光生载流子的过高浓度对准中性区的光生少数扩散过程将产生巨大影响。光生载流子的浓度分布随着深度增加而呈指数规律减小,即光子吸收区域更靠近光敏材料表面。在光生载流子通过扩散到达耗尽区的过程中,由于 HgCdTe 材料中电子和空穴的迁移率相差约两个量级,光生空穴浓度中心将落后于光生电子浓度中心,形成空间电场,并且该电场将导致光生电子的扩散速度减慢,扩散时间变长。这一影响机制主要发生在相当一部分光生电子未穿过耗尽区之前,即光照结束不久

时,因此它是当能量密度达到 $0.76 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 后,下降沿前半段信号衰减速度变慢的主要原因。当大部分光生电子渡过耗尽区后,上文所述光生载流子的等效正向偏压效应将开始起主导作用。另外,耗尽区内大量的光生载流子由于电场减弱而不能迅速渡越,耗尽区内过高的载流子浓度反过来进一步削弱耗尽区电场,使结两侧光生电压信号趋于饱和,引起等效结电容增大,导致 RC 时间常数增大,也将使得信号衰减速度变慢。

3 结 论

使用脉宽约 16 ns 的响应波段内脉冲激光对 HgCdTe 光电二极管进行辐照实验,研究了该探测器瞬态响应特性的变化。随着激光能量密度从 $7.2 \text{ nJ}/\text{cm}^2$ 逐渐增加到 $75 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,光电二极管响应信号的上升时间略有减小,而下降沿逐渐展宽,信号波形的半高宽与底宽随着激光强度增加按照双指数关系增大,相对增大分别为 328%和 124%,信号下降沿在较强激光辐照下表现为信号衰减速度不同的前后两个阶段。从光伏探测器光电响应的微观过程出发,分析了制约响应时间的三个因素在强注入条件下的变化,认为上述信号下降沿展宽现象的产生机制主要为:当激光辐照相对较弱时,pn 结两侧大量光生载流子形成的等效正向偏压导致耗尽区变窄,耗尽区外过剩载流子的扩散时间延长,引起信号下降沿拖尾,波形底宽变大;当辐照光相对较强时,由于电子和空穴扩散速度差异,形成空间电场,导致电子向耗尽区的扩散速度变慢,另外,耗尽区内过剩载流子的极高浓度诱发结电容增大,也使得 RC 时间常数变大。研究结果有助于进一步理解强光辐照条件下的光电探测器响应过程,对某些高速应用场合中基于光伏探测器的系统参数设计也具有参考价值。

参考文献:

- [1] Yang Chenghua, Zhang Yong, Zhao Yuan. Enhancement of heterodyne efficiency of heterodyne LADAR system with APD array detector based on array lighting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3269–3275.
- [2] Liu Zhaojun, Zhou Feng, Li Yu. Demands analysis of IR detectors for space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 25–29. (in Chinese)
刘兆军,周峰,李瑜. 航天光学遥感器对红外探测器的需求分析 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 25–29.
- [3] Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110–3116. (in Chinese)
代永红,刘彦飞,周浩天,等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3110–3116.
- [4] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan, Wang Zuolai. Experimental research on saturation characteristics of silicon p-i-n photodiode induced by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2011, 29(6): 671–676.
- [5] Zakharova I K, Rafailov Michael K. Detector response to high repetition rate ultra-short laser pulses (I) [C]//SPIE, 2015, 9467: 946726.
- [6] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan. Model of transient bleaching effect of the direct bandgap semiconductor induced by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0602007. (in Chinese)
豆贤安,孙晓泉. 飞秒激光诱发直接带隙半导体瞬态漂白效应建模 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602007.
- [7] Hu Wei, Sun Xiaoquan, Dou Xian'an. Analysis of the negative voltage-response in the InGaAs p-i-n photodiode under mode-locked laser illumination [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 36–40. (in Chinese)
胡伟,孙晓泉,豆贤安. 锁模激光照射下 InGaAs p-i-n 管的负电压响应机理 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 36–40.
- [8] Hu Wei, Dou Xian'an, Sun Xiaoquan. The analysis of the photo carriers of the InGaAs p-i-n photodiode response to the high optical injection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0625001.
- [9] Cui Haoyang, Li Zhifeng, Ma Fajun, et al. Negative photovoltaic response in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 161–164. (in Chinese)
崔昊杨,李志锋,马法君,等. 皮秒脉冲激光照射下碲镉汞光伏红外探测器的负光伏响应新现象 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 161–164.
- [10] Cui Haoyang, Zeng Jundong, Tang Nanyun, et al. Study of Schottky contact in HgCdTe infrared photovoltaic detectors [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2013, 45(7): 635–640.
- [11] Rogalski Antoni. *Infrared Detectors* [M]. Florida: CRC Press, 2011: 213–214.