

皮秒激光辐照硅基 PIN 光电二极管的瞬态响应信号分析

姚 猛, 叶继飞*, 李 兰, 高贺岩

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 实验研究了超短脉冲皮秒激光辐照硅基 PIN 光电二极管的瞬态响应的规律特性, 测量了在不同激光能量密度辐照下的脉冲响应信号。分析实验结果表明, 随着激光能量密度的增大, 器件出现了非线性饱和状态, 半高宽从 37.2 μs 到 113 μs , 底宽从 181 μs 到 322 μs , 脉冲响应信号出现展宽现象, 信号的展宽意味着器件的瞬态响应发生了退化, 同时对于饱和前后的信号特征量的半高宽和底宽进行了分析, 发现无论是绝对增幅还是相对增幅, 可以看出饱和后有更为显著的展宽现象, 并且主要由于器件饱和后的下降沿出现速度的衰减所致。通过理论分析发现, 由于注入的光生载流子浓度变化对双极输运过程造成影响, 从而改变其载流子输运过程中的速度, 导致器件响应出现退化现象。

关键词: PIN 光电二极管; 超短脉冲; 瞬态响应; 非线性饱和; 展宽现象; 双极输运

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210305

Analysis of the transient response signal of a silicon-based PIN photodiode irradiated by picosecond laser

Yao Meng, Ye Jifei*, Li Lan, Gao Heyan

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: The regular characteristics of the transient response of a silicon-based PIN photodiode were studied experimentally, which irradiated by an ultrashort pulse picosecond laser, and the pulse response signals under different laser energy densities were measured. The analysis and experiment results show that with the increase of laser energy density, the device appears a non-linear saturation state. The FWHM is from 37.2 μs to 113 μs , and the bottom width is from 181 μs to 322 μs . The impulse response signal has a broadening phenomenon, and the signal broadening means that the transient response of the device is degraded. At the same time, the analysis of the half-height width and the bottom width of the signal characteristics before and after saturation shows that whether it is an absolute increase or a relative increase, it can be seen that there is a more significant broadening phenomenon after saturation. It is caused by the attenuation of the speed on the falling edge after the device is saturated. Through theoretical analysis, the change in the concentration of injected photogenerated carriers affects the bipolar transport process, thereby changing the speed of the carrier transport process, resulting in degradation of the device response.

Key words: PIN photodiode; ultrashort pulse; transient response; nonlinear saturation; broadening phenomenon; bipolar transport

收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-06-22

作者简介: 姚猛, 男, 硕士生, 主要从事激光辐照光电二极管方面的研究工作。

通讯作者: 叶继飞, 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事优选航天推进技术及流场可视化技术方面的研究。

0 引言

随着激光技术的不断发展,超短脉冲激光技术日趋成熟,同时 PIN 光电二极管作为光电探测器的敏感部件,在激光通信、雷达、环境监测上得到广泛的应用,结合超短脉冲激光技术在光电探测领域的重大影响^[1-3]。因此,研究超短脉冲激光辐照光电二极管有着重大的意义。目前对于光电二极管在超短脉冲激光辐照后的瞬态响应特性研究中,关于飞秒激光的研究较多,其中涉及光电二极管的材料,主要有 Si^[4-5]、GaAs^[6]、InGaAs^[7-8]、HgCdTe^[9-10] 等。

2006 年,马丽芹等人对激光辐照光伏型探测器软损伤提出一种新机制,当激光辐照功率超过探测器的饱和阈值以后,在半导体内产生热载流子且热载流子的温度高于晶格的温度,从而导致了光伏探测器的信号下降直至零压输出的现象^[11]。2011 年,董志伟等人利用不同重复频率的飞秒脉冲激光辐照硅基光电探测器的输出特性,发现对带有外部反向偏置电压的 PIN 光电探测器的线性响应影响非常大^[12]。2012 年,豆贤安等人通过实验研究了不同脉冲能量下飞秒激光诱发硅 PIN 光电二极管瞬态响应信号的特性,发现探测器的瞬态信号响应特性相继出现了三个相位^[13]。2013 年,初宁等人研究了光强对响应速度的影响,提出了内部 PIN 结等效电场模型,并搭建了实验电路对 PIN 光电二极管在不同光照下的响应速度进行检测^[14]。2018 年,徐作冬等人以碲镉汞光电二极管为研究对象,测量了该器件的在不同激光强度下的脉冲响应波形,发现瞬态响应波形展宽导致器件性能发生退化^[15]。

到目前为止,相关研究主要集中在飞秒激光辐照光电二极管的特性变化,以及其对半导体材料和光电探测器的损伤作用上,而对于皮秒激光对探测器响应的研究较少。文中主要研究了皮秒激光诱导的硅 PIN 光电二极管的瞬态特性,运用载流子双极输运动力学原理定性地讨论了其物理机制,测量了不同激光能量密度辐照后的单脉冲电压响应信号,并对数据进行处理,得出对二极管信号响应时间的影响因素。

1 理论分析

在光电探测领域中,探测器的响应速度非常重

要,为增加光电二极管的灵敏度,其耗尽区的宽度应做的尽可能大,PIN 光电二极管符合这一要求,并且已经得到广泛应用^[16-18]。PIN 光电二极管的剖面图如图 1 所示,本征区宽度 w 比普通 PN 结的空间电荷区大得多。如果加反向偏置电压,则空间电荷区会延伸整个本征区。

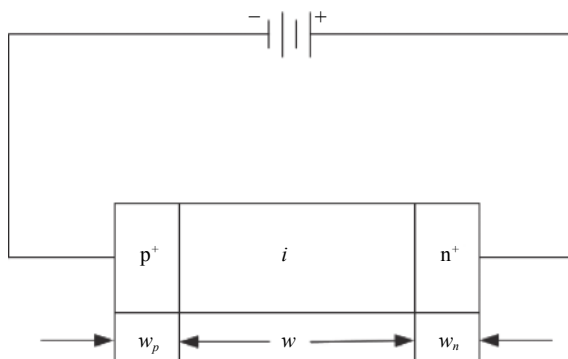


图 1 PIN 光电二极管剖面图

Fig.1 Sectional view of PIN photodiode

光电二极管的响应速度主要受三大因素影响^[19]:

- (1) 光电二极管以及与其相关电路的 RC 时间常数;
- (2) 耗尽区的光载流子的渡越时间;
- (3) 耗尽区外产生的光载流子的扩散时间导致响应的延迟。

在有外加电压的情况下,在半导体材料的表面某一点产生一个脉冲的过剩载流子,也就是激光辐照结束后的状态,这些带电载流子会产生内建电场,会使过剩载流子拥有共同的迁移率和扩散系数,称为双极输运过程。其双极输运中两个重要的参数双极扩散系数 D' 和双极迁移率 μ' 分别为:

$$D' = \frac{D_n D_p (n + p)}{D_n n + D_p p} \quad (1)$$

$$\mu' = \frac{\mu_n \mu_p (p - n)}{\mu_n n + \mu_p p} \quad (2)$$

式中: D_n 为电子扩散系数; D_p 为空穴迁移率; n 为电子浓度; p 为空穴浓度; μ_n 为电子迁移率; μ_p 为空穴迁移率。由公式可见双极扩散系数 D' 和双极迁移率 μ' 均为载流子浓度的函数,并且载流子浓度 n 、 p 包括过剩载流子浓度 δ_n 、 δ_p , 因此, D_n 和 D_p 都不是一个常数,双极输运方程是一个非线性的微分方程。

当激光辐照结束时,会有光子注入半导体的表面,当光子满足小注入也就是非平衡少数载流

子远小于非平衡多数载流子, 双极扩散系数可以表示为^[20]:

$$D' = D_n = D_p \quad (3)$$

双极迁移率可以简化为:

$$\mu' = \mu_n = -\mu_p \quad (4)$$

在大注入的条件下, 也就是非平衡少数载流子大于等于非平衡多数载流子。此时双极扩散系数^[21]:

$$D' = \frac{D_n D_p (n + p)}{D_n n + D_p p} \xrightarrow{\text{high}} \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (5)$$

双极迁移率为:

$$\mu' = \frac{\mu_n \mu_p (p - n)}{\mu_n n + \mu_p p} \xrightarrow{\text{high}} 0 \quad (6)$$

在上述理论基础上, 当激光辐照器件, 能量密度较小时, 满足小注入条件也就是器件饱和前的状态; 随着注入光子的增加, 内建电场增加会导致空间电荷区宽度增加, 因此, 会出现器件响应时间的展宽, 单次辐照结束后, 漂移速度会随着非平衡载流子的浓度减小而减小。满足大注入条件也就是器件饱和后的状态, 随着注入光子的增加, 内建电场增加会导致空间电荷区宽度增加, 光子载流子的渡越时间增加, 从而导致器件响应时间的展宽, 同时双极迁移率趋近于 0, 所以信号下降沿初始会发生速度衰减的情况, 随着时间推移恢复载流子小注入状态, 载流子恢复之前的速度。同时部分载流子还没渡越完成, 这样会使 PIN 结两端的电压信号接近饱和, 导致 PIN 光电二极管内部的等效电容增大, RC 时间常数会增大, 使得整个单脉冲信号出现展宽现象, 器件在不同激光能量密度辐照下饱和前后出现不同的瞬态响应性能退化的情况, 影响高速光电探测器的响应速度。

2 实验方法

文中实验的光谱响应范围为 400~1 100 nm, 光敏面直径为 1.2 mm, 有光学窗口, 外接电阻为 50 Ω, 反向偏置连接可调电压源。激光器选用 Nd: YAG 皮秒脉冲激光器, 波长为 1064 nm, 可调重复频率为 1 ~ 1 000 Hz, 脉宽小于 15 ps, 光斑能量成高斯函数分布, 光斑直径为 Φ2.5 mm 并且保持覆盖整个光敏面。

实验的装置示意图如图 2 所示, 利用数字延时脉冲发生器外触发输出激光, 通过衰减器来调节激光的

入射能量, 不改变激光光斑大小, 同时用能量计检测每次激光出射的能量大小, 以防止能量大小起伏带来的实验误差。利用高速示波器测量不同激光能量密度下的脉冲电压响应信号, 记录饱和前后的瞬态响应信号, 以作进一步详细分析。

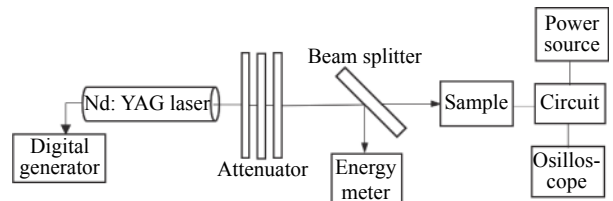


图 2 实验装置图

Fig.2 Diagram of experimental setup

3 结果分析

不同激光能量密度辐照二极管的峰值电压如图 3 所示, 激光能量密度的范围为 0.071 ~ 3.85 μJ/cm², 偏置电压为 5 V 时, 当激光能量密度小于 0.819 μJ/cm² 时, 对数据进行拟合, 发现峰值电压随着激光能量密度的增加呈对数线性增长, 属于器件的对数线性响应区^[15], 大于 0.819 μJ/cm² 时, 峰值电压已经增长平缓, 出现饱和现象。

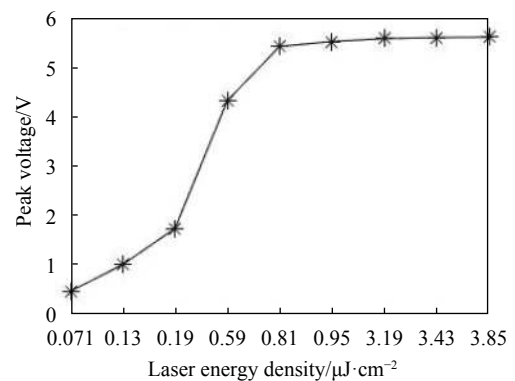


图 3 不同激光能量密度辐照二极管的峰值电压

Fig.3 Peak voltage of irradiated diodes with different laser energy densities

不同激光能量密度下辐照硅基 PIN 光电二极管的脉冲响应信号波形如图 4 所示。随着激光能量密度的增大, 整个脉冲信号响应时间宽度也随之增大, 出现了展宽的现象, 意味着器件发生了响应退化现象。信号在饱和后对比饱和前展宽明显增大, 在不同的阶段有着不同的展宽形式, 文中对于激光辐照器件

饱和前后的上升沿、半高宽以及底宽分别进行详细地比较分析,分析激光辐照器件后的展宽规律。

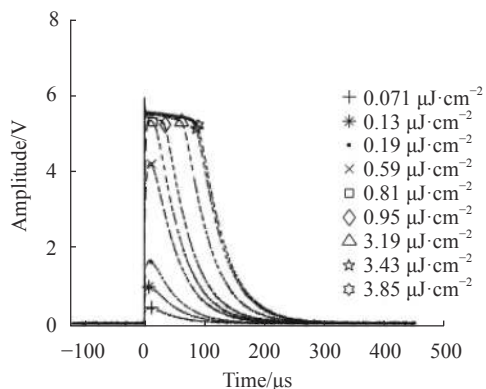


图 4 不同激光能量密度下单脉冲信号响应波形

Fig.4 Single pulse signal response waveform under different laser energy densities

图 5 中给出饱和前后脉冲响应信号上升沿时间随着激光能量密度的变化情况,整体时间范围变化为 69.7~17 ns,饱和前绝对上升和相对上升分别为 50.3 ns, 72.17%,饱和后的绝对下降和相对下降为 4 ns, 19%。因为外接电路的 RC 常数较小以及整个器件吸收层较薄,整体的上升沿变化时间对信号展宽作用较小。

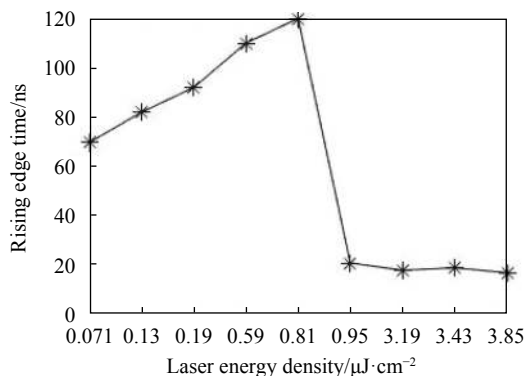


图 5 不同激光能量密度辐照二极管的上升沿时间

Fig.5 Rising edge time of the diode irradiated by different laser energy densities

图 6 给出的是代表响应信号特征量的信号半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 随着激光能量密度的变化情况,由图中可以看出变化范围为 37.2~113 μs ,随着激光能量密度的增加,信号半高宽增大,饱和前的绝对增幅和相对增幅分别为 14.3 μs , 38.44%,饱和后的绝对增幅和相对增幅分别为 61.5 μs , 119.42%。图 7 给出的是代表信号特征量的底宽

(Bottom Width, BW) 随着激光能量密度的增加而增大,变化范围为 181 ~ 322 μs ,饱和前的相对增幅和绝对增幅为 38 μs , 21%,饱和后的绝对增幅和相对增幅分别为 103 μs , 47.03%,在外加电场存在的情况下,产生出一个脉冲过剩载流子,产生的内建电场、外部电路与设备一起存在 RC 时间常数和瞬态电容共同引起饱和前后展宽现象。

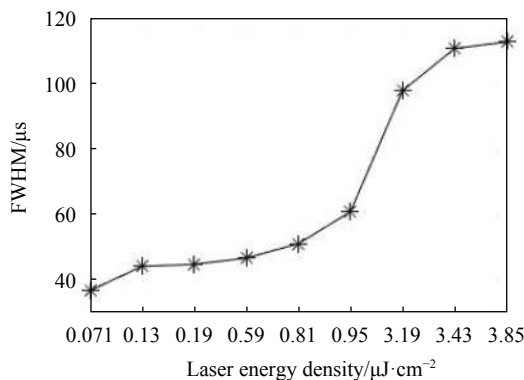


图 6 不同激光能量密度辐照二极管的半高宽

Fig.6 Half-height width of diodes irradiated by different laser energy densities

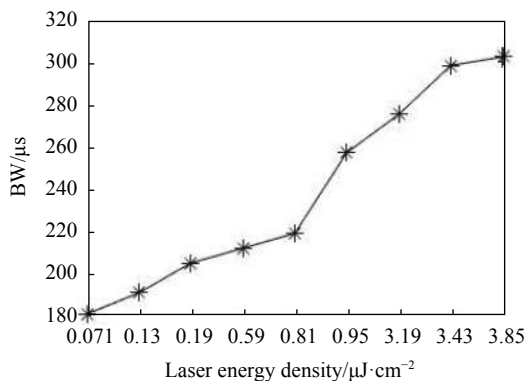


图 7 不同激光能量密度辐照二极管的底宽

Fig.7 Bottom width of diodes irradiated by different laser energy densities

通过上述的数据对比分析可知,首先从上升沿可以看出,饱和前,漂移速度随着电场增加而增大,饱和后,漂移速度达到最大,上升沿时间明显下降且变化较小,同时上升沿范围在 69.7~17 ns 之间,对信号展宽影响较小,说明响应信号的下降沿的宽度可以反应激光辐照结束后光生载流子的输运情况。由表 1 和表 2 可以看出,对于 FWHM 和 BW 来说,无论是绝对增幅还是相对增幅,都是饱和后的增幅要高,并且饱

和后下降沿速度呈两相变化,该现象与参考文献 [13] 中研究的飞秒激光辐照 PIN 光电二极管的饱和特性,下降沿速度呈三相变化有着明显的不同,在皮秒激光高注入时还未出现空间电荷的屏蔽效应。由此可以看出,饱和前后信号宽度都有增幅,饱和前满足小注入条件,双极扩散速度等于器件自身的漂移速度,由于空间电荷区随着内建电场增加增宽,信号出现展宽;饱和后满足光生载流子高注入条件,双极扩散速度趋近于 0,导致饱和后初始下降沿出现的速度衰减,当载流子浓度降低时又恢复饱和前的运输方式,因此饱和后有更加明显的增幅。

表 1 器件脉冲信号 FWHM 变化

Tab.1 Device pulse signal FWHM changes

Item	Absolute increase/ μs	Relative increase
Before saturation	14.3	38.44%
After saturation	61.5	119.42%

表 2 器件脉冲信号 BW 变化

Tab.2 Device pulse signal BW changes

Project	Absolute increase/ μs	Relative increase
Before saturation	38	21%
After saturation	103	47.03%

4 结 论

文中利用超短脉冲皮秒激光以不同的激光能量密度辐照硅基 PIN 光电二极管,测量了饱和前后的器件脉冲响应信号。通过分析响应度的影响因素,考虑注入的光生载流子的浓度大小对双极扩散和双极迁移率的影响,减缓了器件脉冲信号的响应速度。研究结果表明,随着激光能量密度的增大,单脉冲信号出现展宽现象。激光能量密度为 $0.819 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,器件脉冲响应信号出现非线性饱和现象,并且对 FWHM 和 BW 进行分析,无论是绝对增幅还是相对增幅,器件饱和后的时间展宽现象更为明显,通过理论分析,饱和前内建电场增加导致空间电荷区增宽导致信号展宽,激光能量密度大于 $0.819 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,信号出现饱和,满足光生载流子高注入条件,导致双极迁移率趋近于零,在下降沿初始产生速度衰减,信号饱和后出

现更为明显的展宽现象。在高速信号检测中,严重降低光电探测器的性能,文中研究对于激光探测领域具有一定研究价值。

参考文献:

- [1] Morgner U, Ell R, Metzler G, et al. Nonlinear optics with phase-controlled pulses in the sub-two-cycle regime [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(24): 5462.
- [2] Jia Zixi, Huang Song, Jin Xiaorong, et al. Research and development of femtosecond laser supersaturated doped silicon materials [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(12): 1146-1159. (in Chinese)
- [3] Jin Xiaorong, Wu Qiang, Huang Song, et al. Research progress of femtosecond laser supersaturated doped silicon-based photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111428. (in Chinese)
- [4] Xu Lijun, Zhang Xihe, Cai Hongxing, et al. Study on determine damage of photoelectric detector irradiated by high power laser [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(12): 1263-1266. (in Chinese)
- [5] Zakharova I K, Rafailov M K. Detector response to high repetition rate ultra-short laser pulses. I[C]//SPIE, Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, & Applications VII, 2015, 9467: 946726.
- [6] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan. Femtosecond laser-induced transient bleaching effect modeling of direct band gap semiconductors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0602007. (in Chinese)
- [7] Hu Wei, Sun Xiaoquan, Dou Xian'an. Negative voltage response mechanism of InGaAs PIN tube under mode-locked laser irradiation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 36-40. (in Chinese)
- [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. New phenomenon of negative photovoltaic response of mercury cadmium telluride photovoltaic infrared detectors under picosecond pulse laser irradiation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 161-164. (in Chinese)
- [10] Cui H, Zeng J, Tang N, et al. Study of Schottky contact in HgCdTe infrared photovoltaic detectors [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2013, 45(7): 635-640.
- [11] Ma Liqin, Lu Qisheng, Ju Bo. Laser soft damage mechanism of

- photovoltaic photodetectors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 917-921. (in Chinese)
- [12] Dong Z, Su S, Xia Y, et al. Output properties of photovoltaic detectors irradiated under femtosecond pulses[C]//Academic International Symposium on Optoelectronics & Microelectronics Technology. IEEE, 2012.
- [13] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan, Wang Zuolai. Experimental study of femtosecond laser-induced saturation characteristics of silicon PIN photodiodes [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(6): 671-676. (in Chinese)
- [14] Chu Ning, Cao Lijun, Huang Wei. Analysis of PIN photodiode response time based on light intensity [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2013, 26(1): 34-37. (in Chinese)
- [15] Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, et al. Degradation of transient response characteristics of HgCdTe photovoltaic detectors under nanosecond laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0106001. (in Chinese)
- [16] Wang Wei, Bai Chenxu, Feng Qi, et al. Influence of structure parameters on performance of silicon PIN photodetector [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 3(3): 379-382.
- [17] Kyomasu M. Development of an integrated high speed silicon PIN photodiode sensor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1995, 42(6): 1093-1099.
- [18] Fang Alexander W, Jones Richard, Park Hyundai, et al. Integrated AlGaInAs-silicon evanescent race track laser and photodetector [J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2315-2322.
- [19] Uherek F, Hasko D, Chovan J. Optical response time of InGaAs(P)/InP photodiodes[C]//International Euroconference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems. IEEE, 2000.
- [20] Neamen D A. An Introduction to Semiconductor Devices[M]. Translated by Xie Sheng. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 265-266. (in Chinese)
- [21] Laird J S, Hirao T, Onoda S, et al. High-injection carrier dynamics generated by MeV heavy ions impacting high-speed photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(1): 013530.