

# 激光与光电子学进展

## 皮秒激光辐照硅基光电二极管的饱和特性分析

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** 为了进一步研究超短脉冲激光辐照光电探测器的饱和特性,以硅基PN型光电二极管作为实验器件,实验测量了不同激光能量密度的皮秒激光辐照器件的瞬态响应时间。实验结果表明,当皮秒激光能量密度达到 $97\text{ nJ/cm}^2$ 时,器件的瞬态响应信号出现了非线性饱和,同时对器件饱和后的信号特征量的信号半峰全宽和信号底宽进行了分析,其绝对增幅和相对增幅分别为 $154\text{ }\mu\text{s}$ 、 $157.00\%$ 和 $157\text{ }\mu\text{s}$ 、 $47.87\%$ ,可以看出随着激光能量密度的增加,响应时间逐渐增加,信号的时间展宽意味着器件的瞬态响应发生了退化。对激光注入载流子进行分析,发现激光辐照结束后产生大量的光生载流子,满足半导体的大注入条件,导致初始的载流子双极输运过程中双极迁移率趋近于0,对应的信号下降沿初始速度出现衰减,从而导致器件响应信号出现退化现象。

**关键词** 探测器; 硅基光电二极管; 超短脉冲; 饱和特性; 双极输运

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1304003

### Analysis of Saturation Characteristics of Silicon-Based Photodiodes 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, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** To further study the saturation characteristics of photodetectors irradiated using ultrashort pulse lasers, silicon-based PN-type photodiodes were used as experimental devices to measure the transient response time of picosecond laser irradiated devices with different laser energy densities. The experimental results show that the transient response signal of the device is nonlinearly saturated when the picosecond laser energy density reaches  $97\text{ nJ/cm}^2$ . Furthermore, we analyze the signal's full widths at half maximum and signal's bottom widths of the signal characteristic quantity after the device saturation. The absolute and relative increases are obtained as  $154\text{ }\mu\text{s}$ ,  $157.00\%$  and  $157\text{ }\mu\text{s}$ ,  $47.87\%$ , respectively. Observe that as the laser energy density increases, the response time gradually increases. The time extension of the signal indicates the occurrence of the transient response degeneration of the device. Through the analysis of laser injection carriers, a large number of photogenerated carriers are generated after the laser irradiation, satisfying large injection conditions of semiconductors. This leads to bipolar mobility approaching zero during the initial carrier bipolar transport process. The initial speed of the corresponding signal falling edge attenuates, leading to the degrading response signal of the device.

**Key words** detectors; silicon-based photodiode; ultrashort pulse; saturation characteristics; bipolar transport

## 1 引言

基于半导体硅材料的PN结光电二极管有着较好的灵敏度以及响应功能,在激光雷达、激光通信以及深空探测等领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在不同的应用中,激光直接作用于光电探测器的接收系统,会造成一定的干扰或损伤,因此,研究超短脉冲激光辐照光电二极

管的饱和效应具有一定的意义,目前关于超短脉冲飞秒激光辐照光电探测器的效应研究较多,主要的半导体材料有InSb<sup>[4]</sup>、InSi<sup>[5-6]</sup>、InGaAs<sup>[7-8]</sup>、HgCdTe<sup>[9-10]</sup>等。

2011年董志伟等<sup>[11]</sup>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,发现对于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。2012年豆贤安等<sup>[12]</sup>在瞬态光谱吸收的基

收稿日期: 2021-07-17; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-09-03

通信作者: \*yjf1981@163.com

基础上,结合超快载流子动力学,建立了能够描述飞秒激光诱发带隙半导体瞬态漂白机制的理论模型,并进行了数值仿真,结果表明,飞秒激光不仅可以诱发直接带隙半导体的瞬态漂白,还可以导致激发波长到半导体波限的宽光谱范围的瞬态漂白。2018年徐作冬等<sup>[13]</sup>研究了短脉冲激光辐照光伏探测器的瞬态响应特性,测量了不同激光能量密度辐照 HgCdTe 光电二极管的脉冲响应信号。提出器件的响应波形的展宽,说明器件在工作中的性能发生了退化。他们通过分析激光辐照后,光电二极管准中性区的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,对激光辐照器件后的瞬态响应信号展宽进行了分析。

综上所述,关于激光辐照光电二极管的研究已有很多,涉及到不同脉宽的激光以及不同的半导体材料,对于超短脉冲激光辐照光电二极管的研究,主要集中在飞秒激光的损伤特性,对于皮秒激光的研究工作较少,皮秒激光相对飞秒激光有较高的脉冲能量,硅基 PN 型光电二极管又是典型的光电探测元件,因此,开展皮秒激光辐照硅基 PN 型光电二极管的饱和特性研究具有重要意义。本文通过设计皮秒激光辐照硅基 PN 型光电二极管的实验,测量了不同激光能量密度辐照后的单脉冲电压响应信号,对数据进行处理和分析,讨论了皮秒激光辐照器件后的饱和特性,并通过载流子双极输运动力学原理分析了皮秒激光辐照后的非线性饱和机制以及影响因素。

## 2 理论分析

PN 型光电二极管是典型的光电探测器件,具有暗电流小、量子噪声低、工艺简单等特点,应用于光电探测系统的核心部位<sup>[14-16]</sup>。光电二极管的工作原理如图 1 所示,光电二极管和普通二极管一样,也是由一个 PN 结组成,当光入射时,携带能量的光子进入 PN 结,将能量输送到共价键上的束缚电子,使束缚电子挣脱共价键的束缚,在反向偏置电压的作用下发生偏移,从而使反向电流迅速增大。

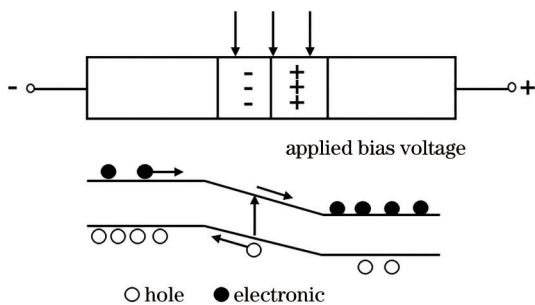


图 1 PN 型光电二极管工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of PN-type photodiode

影响光电二极管响应时间的因素主要有 3 个<sup>[17]</sup>:

- 1) 光电二极管以及与其相关电路的电阻与电容(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。

当注入载流子满足大注入条件也即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  $D'$ <sup>[18]</sup> 为

$$D' = \frac{D_n D_p (n + p)}{D_n n + D_p p} \xrightarrow{\text{high}} \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}, \quad (3)$$

双极迁移率  $\mu'$  为

$$\mu' = \frac{\mu_n \mu_p (p - n)}{\mu_n n + \mu_p p} \xrightarrow{\text{high}} 0, \quad (4)$$

式中:  $n$  为电子浓度;  $p$  为空穴浓度;  $D_n$  为电子扩散系数;  $D_p$  为空穴扩散系数;  $\mu_n$  为电子迁移率;  $\mu_p$  为空穴迁移率。

在载流子双极输运动力学基础上,当皮秒激光辐照器件时,等同于在器件的半导体材料某一点施加一个外部的脉冲激励,会在器件的半导体空间位置内产生内建电场,器件在外加电场和内建电场的共同作用下,载流子输运满足双极输运过程的条件,激光能量密度达到一定值时,满足半导体的光生载流子的大注入条件,此时,双极迁移率趋近于 0,同时器件在外加反向偏置电压时,载流子的输运由漂移运动占主导,器件的响应信号下降沿初始速度会发生衰减,导致器件的响应时间会出现一定的延长,随着时间推移注入载流子浓度减少,器件恢复正常的输运情况。同时瞬态脉冲光生载流子的注入,也会导致器件内部的等效电容和 RC 时间常数增大,并会使整器件的响应信号出现展宽现象,从而使得器件在不同激光能量密度辐照下出现非线性饱和情况,影响高速光电探测器的响应速度。

## 3 实验方法

本实验研究采用的研究对象的光谱响应范围为 190~1100 nm, 响应速度小于 10 ns, 光敏面面积为 3 mm×3 mm, 外接电阻为 50 Ω, 反向偏置电压为 5 V。激光器选用型号为 FAST30F 的 Nd:YAG 皮秒脉冲激光器, 激光波长为 1064 nm, 可调重复频率范围为 1~1000 Hz, 脉冲宽度小于 15 ps, 可单脉冲输出。激光能量空间分布为高斯分布, 光斑直径  $\Phi$  为 2.5 mm。

如图 2 所示为实验装置示意图, 激光器设置为单脉冲触发模式, 通过能量衰减器控制激光的入射能量大小, 输出激光光斑大小不变, 激光光束空间分布为高

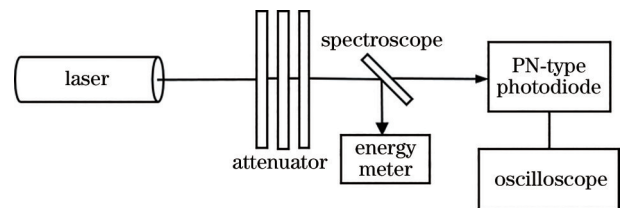


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

斯分布,激光束通过分光比为 3:7 的分光镜,入射到能量计实时测量每次入射的能量大小,防止激光能量大小的起伏对实验造成的实验误差,利用高速示波器测量器件的响应信号,记录不同激光能量密度辐照下器件的瞬态响应信号数据,对数据进行处理与分析。

### 4 实验结果与分析

如图 3 所示是不同皮秒激光能量密度辐照二极管的脉冲响应信号波形。根据公式:  $I = E / (\pi \cdot r^2)$ , 求出激光能量密度范围为 17 nJ/cm<sup>2</sup> 到 2609 nJ/cm<sup>2</sup>, 可以看出响应时间随着激光能量密度的增加而增加, 整体最主要还是由脉冲响波形的下降沿展宽为主, 也就是皮秒激光辐照后, 脉冲信号的恢复时间增加。并且在激光能量密度大于 97 nJ/cm<sup>2</sup> 时, 器件的脉冲响应信号的下降沿初始出现明显的速度衰减, 整体的展宽明显。以激光能量密度为 97 nJ/cm<sup>2</sup> 为节点, 对脉冲响应信号的数据进行详细分析。

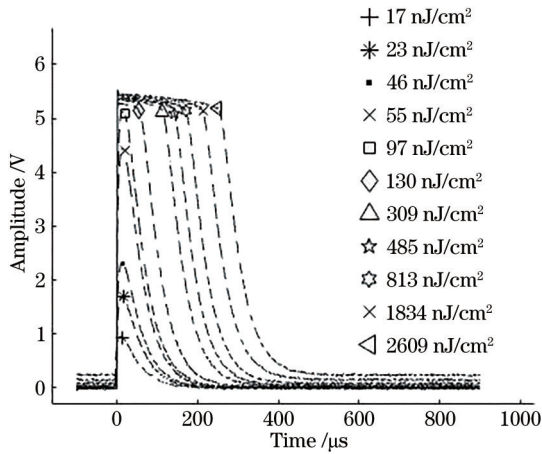


图 3 不同激光能量密度下单脉冲信号响应波形

Fig. 3 Pulse signal response waveforms under different laser energy densities

图 4 是峰值电压随着激光能量密度增大的变化关

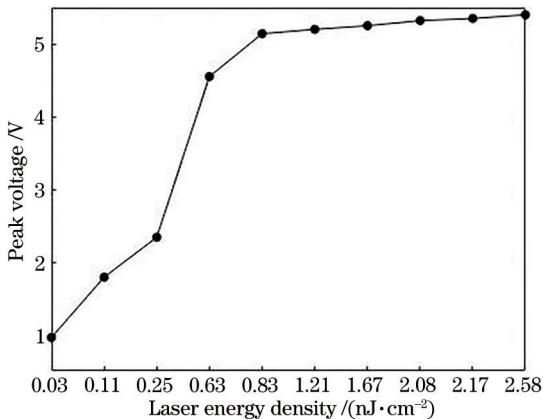


图 4 峰值电压随着激光能量密度增大的变化关系图

Fig. 4 Relationship between peak voltage and increase of laser energy density

系图,当激光能量密度小于 97 nJ/cm<sup>2</sup> 时,对激光能量密度与峰值电压数据进行拟合,满足关系公式:  $y = 0.105x \cdot \log x + 0.886$ , 由此可以看出激光能量密度小于 97 nJ/cm<sup>2</sup> 时,满足器件的线性对数响应<sup>[13]</sup>; 大于 97 nJ/cm<sup>2</sup> 时,峰值电压增长平缓,器件响应信号出现非线性饱和,并且信号整体展宽明显。下面对非线性响应信号的上升沿以及信号的特征量信号半峰全宽 (FWHM) 和信号底宽 (BW) 进行详细分析。

图 5 中给出了响应信号出现非线性饱和后的上升沿时间随着激光能量密度增大的变化关系图, 当时间从 56 ns 增大到 153 ns 时, 整体趋势随着激光能量密度的增大成线性增大, 绝对增幅和相对增幅分别是 97 ns 和 173%。图 6 是信号特征量信号的 FWHM 随激光能量密度增大的变化关系图, 通过对数据拟合发现, 信号的 FWHM 与激光能量密度满足公式:  $y = 1.363e^{-1.291x} + 113.6e^{0.011x} - 34.68$ , 可以看出信号的 FWHM 随着激光能量密度的增大呈双指数增加, 绝对增幅和相对增幅分别为 154 μs 和 157.00%。图 7 是信号特征量信号的 BW 随着激光能量密度增大的变化关系图, 通过对数据

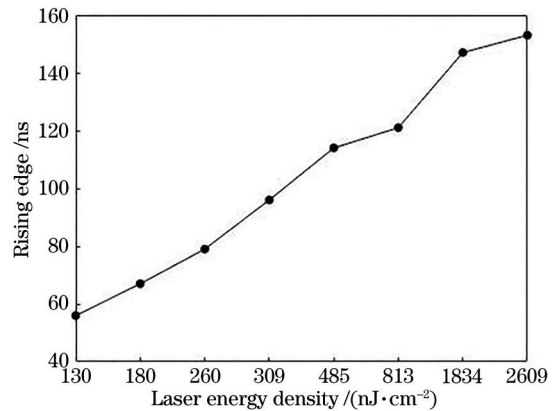


图 5 不同激光能量密度辐照二极管的上升沿时间

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

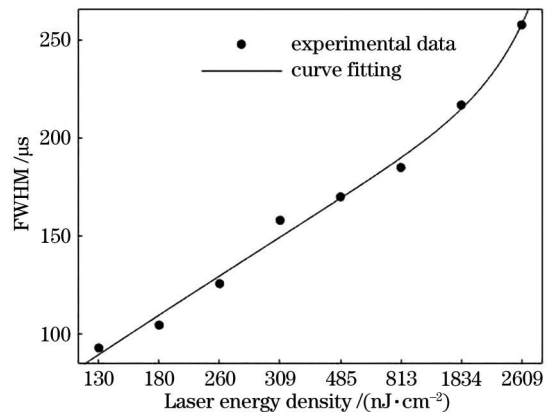


图 6 信号的 FWHM 随激光能量密度增大的变化关系图

Fig. 6 Relationship between FWHM of signal and increase of laser energy density

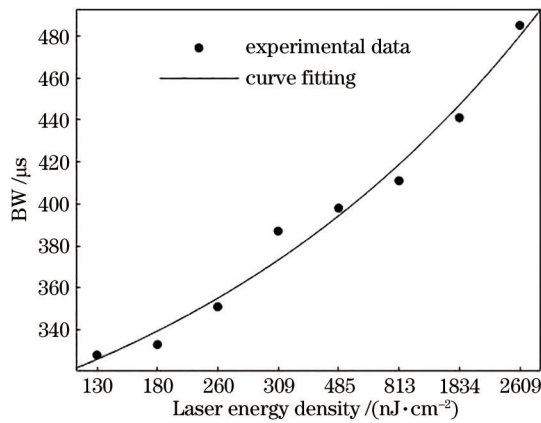


图7 信号的BW随激光能量密度增大的变化关系图

Fig. 7 Relationship between BW of signal and increase of laser energy density

进行拟合,信号的BW与激光能量密度满足关系式: $y = 8.188e^{-2.534x} + 72.59.6e^{0.014x} + 241.7$ ,说明信号的BW随着激光能量密度的增加呈双指数递增,绝对增幅和相对增幅分别为157 μs和47.87%。这意味着器件响应信号的恢复时间增大了,也即器件的脉冲响应功能发生了退化,这对于高速光电探测器的性能是非常不利的。

通过分析器件脉冲信号的上升沿、信号的FWHM以及信号的BW随着激光能量密度增加的变化关系,可以看出其中上升沿时间的增大,对响应信号的展宽作用较小,时间的增加主要是由于激光能量密度的增加产生一定的瞬态电容以及电路中存在RC时间常数所致。对信号特征量中信号的FWHM和信号的BW进行分析发现,两个特征量随激光能量密度的增长呈双指数增长,符合信号的指数衰减特征,同时对特征量的绝对增幅和相对增幅进行分析看出,信号的下降沿时间的增加在器件响应信号的展宽中占主要作用,下降沿的恢复速度出现衰减并且出现两次变化,这与文献[5]中研究的飞秒激光辐照PIN光电二极管的饱和特性有着相似性,也是下降沿出现速度的变化,但是文献[5]中速度是3次变化,这是由于皮秒激光脉冲激励未到达电荷屏蔽的效应。本文中器件的半导体材料受到激光脉冲激励,由式(4)可知达到入射半导体光子的大注入条件,使得器件信号恢复时,载流子的双极输运过程中,双极迁移率趋近于0,导致期间出现非线性饱和现象。

## 5 结 论

使用脉冲宽度小于15 ps的皮秒激光辐照典型的光电探测器件硅基PN型光电二极管,测量了不同激光能量密度辐照器件下的脉冲响应信号,分析了皮秒激光辐照器件后的瞬态响应特性。通过对数据进行分析,发现随着激光能量密度的增加,器件的响应时间出现了展宽现象,并且当激光能量密度为97 nJ/cm<sup>2</sup>时,

器件出现了非线性饱和现象;然后对饱和后的响应信号做进一步分析,发现上升沿随着激光能量密度的增加而增加,但对于响应信号的展宽作用较小,对于信号的特征量信号的FWHM和信号的BW随激光能量密度的增加变化进行了拟合发现符合信号指数衰减规律,同时绝对增幅和相对增幅分别为154 μs、157.00%和157 μs、47.87%,信号的FWHM和BW包含下降沿时间,说明下降沿的展宽在整个信号的展宽中占主导作用;应用载流子双极输运动力学进行分析,说明由于皮秒脉冲激励满足半导体大注入条件,导致双极迁移率趋近于0,响应信号的下降沿出现速度的衰减,致使器件出现响应展宽,从而影响器件光电探测性能的现象。该研究在激光对于光电探测器件的损伤方面有着重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Krueer M, Allen R, Esterowitz L, et al. Laser damage in silicon photodiodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, 8(5): 453-458.
- [2] Shaw P S, Gupta R, Lykke K R. Stability of photodiodes under irradiation with a 157-nm pulsed excimer laser[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(2): 197-207.
- [3] Watkins S E, Zhang C Z, Walsler R M, et al. Electrical performance of laser damaged silicon photodiodes[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(6): 827-835.
- [4] 陆启生, 蒋志平, 刘泽金. 激光辐照下InSb探测器(PV型)的瞬态行为[J]. *强激光与粒子束*, 1991, 3(1): 102-108. Lu Q S, Jiang Z P, Liu Z J. The transient behavior of InSb (PV) detector irradiated by laser[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1991, 3(1): 102-108.
- [5] 豆贤安, 孙晓泉, 汪作来. 飞秒激光诱发硅PIN光电二极管饱和特性的实验研究(英文)[J]. *量子电子学报*, 2012, 29(6): 671-676. Dou X N, Sun X Q, Wang Z L. Experimental research on saturation characteristics of silicon p-i-n photodiode induced by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(6): 671-676.
- [6] Zakharova I K, Rafailov M K. Detector response to high repetition rate ultra-short laser pulses. I[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9467: 946726.
- [7] 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. Hu W, Sun X Q, Dou X N. 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.
- [8] 胡伟, 豆贤安, 孙晓泉. 强光照射下的InGaAs二极管内部光生载流子分析[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0625001. Hu W, Dou X N, Sun X Q. 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] 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.
- Cui H Y, Li Z F, Ma F J, et al. Negative photovoltaic-responses in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(3): 161-164.
- [10] Cui H Y, Zeng J D, Tang N Y, et al. Study of Schottky contact in HgCdTe infrared photovoltaic detectors[J]. Optical & Quantum Electronics, 2013, 45(7): 635-640.
- [11] Dong Z W, Su S H, Xia Y Q, et al. Output properties of photovoltaic detectors irradiated under femtosecond pulses[C]//2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, October 12-16, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 124-126.
- [12] 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.
- Dou X A, Sun X Q. Femtosecond laser-induced transient bleaching effect modeling of direct bandgap semiconductors [J]. Chinese Journal of Laser, 2012, 39(6): 0602007.
- [13] 徐作冬, 张检民, 林新伟, 等. 纳秒激光辐照下 HgCdTe 光伏探测器的瞬态响应特性退化[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0106001.
- Xu Z D, Zhang J M, Lin X W, et al. Transient response degradation of HgCdTe photovoltaic detectors under irradiation of nanosecond laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0106001.
- [14] 杨叶飞, 梁平治. PN 型硅光电二极管模型及参数优化[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(12): 1686-1689, 1705.
- Yang Y F, Liang P Z. PN silicon photodiode modeling and parameters optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(12): 1686-1689, 1705.
- [15] 罗强, 刘文涵, 张清义. 光电二极管阵列检测器在分析仪器中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2001, 29(4): 374-377, 390.
- Luo Q, Liu W H, Zhang Q Y. Application of photodiode array detector in analytical instrument[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2001, 29(4): 374-377, 390.
- [16] 付文羽, 彭世林. 硅光电二极管在光电检测电路中的应用研究[J]. 许昌师专学报(自然科学版), 2001, 20(5): 19-22.
- Fu W Y, Peng S L. Application research of silicon photodiode in photoelectric detection circuit[J]. Journal of Xuchang Teachers College (Natural Science Edition), 2001, 20(5): 19-22.
- [17] Uherek F, Hasko D, Chovan J. Optical response time of InGaAs(P)/InP photodiodes[C]//ASDAM 2000. Conference Proceedings. Third International EuroConference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (Cat. No.00EX386), October 16-18, 2000, Smolenice, Slovakia. New York: IEEE Press, 2000: 425-428.
- [18] 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.