

# 崖层对单行载流子光电探测器的影响研究

陈代尧 余学才 汪平河 刘永

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 分析了崖层在单行载流子光电探测器(UTC-PD)中的作用,以及其对 UTC-PD 的 3 dB 带宽的影响。研究表明,崖层使得异质结处电场强度增加,且电场向吸收区延伸,使电子在吸收区的渡越时间和积累程度降低,从而导致 3 dB 带宽和饱和电流增加;崖层的掺杂浓度和厚度都会对 3 dB 带宽产生显著的影响;当崖层厚度与掺杂浓度的乘积一定,且收集区保持耗尽时,随着崖层厚度的增加(掺杂浓度减小),3 dB 带宽下降,但是,只要崖层的厚度不是太厚(通常为十几纳米到几十纳米),则无论是改变崖层厚度,还是改变掺杂浓度,3 dB 带宽的下降都可以忽略不计,即 3 dB 带宽基本相等。

**关键词** 探测器;崖层;单行载流子;3 dB 带宽

中图分类号 TN364<sup>+</sup>.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0317001

## Study of the Influence of Cliff Layer on Uni-Traveling-Carrier Photodetector

Chen Daiyao Yu Xuecai Wang Pinghe Liu Yong

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** Deeper researches on the impacts of a cliff layer on uni-traveling-carrier photodetector (UTC-PD) are presented, especially the influence on 3 dB bandwidth. The results show that a cliff layer enhances the intensity of the electric field which extends to the absorption region in the heterojunction, makes the electron transit time and electron accumulation level reduce in the absorber, and eventually leads to the increase in 3 dB bandwidth and saturation current. The results also reveal that, both the doping concentration and thickness of cliff layer have a significant impact on 3 dB bandwidth. For a thicker cliff layer, as the product of the thickness and doping concentration is unchanged and the collection region remains depleted, the 3 dB bandwidth drops with the increase of cliff layer thickness. However, for a thinner cliff layer, typically ten to several tens of nanometers, whether the cliff layer thickness or the doping concentration is alternated, the decreases of 3 dB bandwidth can be ignored, that is, the 3 dB bandwidth is almost invariant.

**Key words** detectors; cliff layer; uni-traveling-carrier; 3 dB bandwidth

**OCIS codes** 230.0040; 230.5160

## 1 引言

光纤通信和超高速测试系统的发展要求光电探测器能够在高速、大功率和宽动态范围的系统中工作,而传统的 PIN 探测器<sup>[1-3]</sup>由于受空间电荷效应的限制,无法同时满足这些要求。为了解决这一问

题,日本 NTT 光子实验室在 1997 年研制出了一种新的光电探测器——单行载流子光电探测器(UTC-PD),它只允许迁移率大的电子作为有源载流子通过耗尽区<sup>[4]</sup>。因此,相对于传统的 PIN 探测器而言,它具有更快的响应速度、更高的饱和电流和更宽

收稿日期: 2013-08-09; 收到修改稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61177036,60925019)

作者简介: 陈代尧(1987—),男,硕士研究生,主要从事单行载流子高速光探测器方面的研究。

E-mail: daiyao\_chen@163.com

导师简介: 余学才(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事高速大功率光电探测器方面的研究。

E-mail: yxc@uestc.edu.cn

的线性动态范围<sup>[5-9]</sup>。

但是,在 UTC-PD 中,随着入射光功率的增加,电子还是会在耗尽区积累,从而限制光电流的增加。因此,一些方法被用来改善 UTC-PD 的性能,包括采用部分耗尽的吸收层<sup>[10-11]</sup>、在收集层中进行补偿掺杂<sup>[12]</sup>以及引入高掺杂的崖层<sup>[13-15]</sup>。目前,在很多采用 UTC 结构的光探测器中都使用了崖层。Li 等<sup>[14]</sup>的仿真和实验表明,在 UTC-PD 中引入崖层会增加其饱和电流,且崖层的掺杂浓度和厚度都会对饱和电流产生影响。Srivastava<sup>[16]</sup>研究了崖层的掺杂浓度和厚度对 3 dB 带宽的影响。

本文从电场的角度研究崖层在 UTC-PD 中的作用,分别研究崖层的掺杂浓度和厚度以及崖层厚度与掺杂浓度的乘积为一定值时,对 UTC-PD 性能的影响,特别是 3 dB 带宽的影响。

## 2 单行载流子光电探测器模型及结构

首先,采用漂移-扩散模型<sup>[17]</sup>来描述载流子的运动,通过 ATLAS 器件仿真软件对 UTC-PD 进行二维仿真,仿真过程中用到浓度依赖迁移率模型 ANALYTIC 和 CONMOB,负微分饱和速度效应的平行场迁移率模型 FLDMOB,以及载流子复合模型 SRH 和 CONSRH。表 1 所示为仿真中采用的 InP/InGaAs UTC-PD 外延结构,其他参数由文献<sup>[16]</sup>给出。

在仿真中,取探测器光敏面为  $14\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ ,入射光波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,反向偏置电压为 2 V,负载电阻为  $50\ \Omega$ ,忽略寄生阻抗的影响,且结电容为 UTC-PD 的总电容。利用 UTC-PD 对光脉冲响应的傅里叶变换来得到带宽<sup>[17]</sup>。输入光脉冲为三角形尖峰脉冲,其半峰全宽为 400 fs,除非特别指明,其能量均为  $0.056\ \text{pJ}$ 。

表 1 仿真中所采用的 UTC-PD 外延结构<sup>[5]</sup>

Table 1 Epitaxial layer structure for UTC-PD used in simulation

Layer	Thickness / Doping /		Band-gap /eV
	nm	$\text{cm}^{-3}$	
$\text{p}^+$ -InGaAs cap	50	$3.0 \times 10^{19}$	0.734
$\text{p}^+$ -InGaAsP diff. barrier	20	$2.0 \times 10^{19}$	0.85
p-InGaAs absorber	220	$1.0 \times 10^{18}$	0.734
i-InGaAs spacer	8	$1.0 \times 10^{15}$	0.734
i-InGaAsP spacer	16	$1.0 \times 10^{15}$	1.0
i-InP spacer	6	$1.0 \times 10^{15}$	1.35
$\text{n}^+$ -InP cliff	7	$1.0 \times 10^{18}$	1.35
n-InP collector	263	$1.0 \times 10^{16}$	1.35
$\text{n}^+$ -InP subcollec. -2	50	$5.0 \times 10^{18}$	1.35
$\text{n}^+$ -InGaAs etch stop	10	$1.5 \times 10^{19}$	0.734
$\text{n}^+$ -InP subcollec. -1	500	$1.5 \times 10^{19}$	1.35

## 3 崖层在单行载流子光电探测器中的作用

图 1(a)所示为有无崖层时电场的分布。从图中可以看出,崖层的存在使得异质结结面处的电场强度增加,这有利于电子通过异质结处的势垒,减少电子在该处的积累,进而降低电子在吸收区的积累,使 UTC-PD 的饱和电流增加。同时,崖层使电场向光吸收区延伸,使电子的运动方式由扩散运动转变为漂移运动,这必然导致电子的渡越时间减少和在吸收区的积累程度的降低,使 UTC-PD 的带宽和饱和电流增加。但是,有崖层时收集区的电场比没有崖层时要低,这是因为给 UTC-PD 施加的反向偏置电压都为 2 V,则电场强度在 UTC-PD 某一部分增加的同时,在其他部分就必然要减小,这意味着崖层的选择必须要合适,否则会使收集区的电场过低,使得电子在该区的速度降低以及在该区积累。

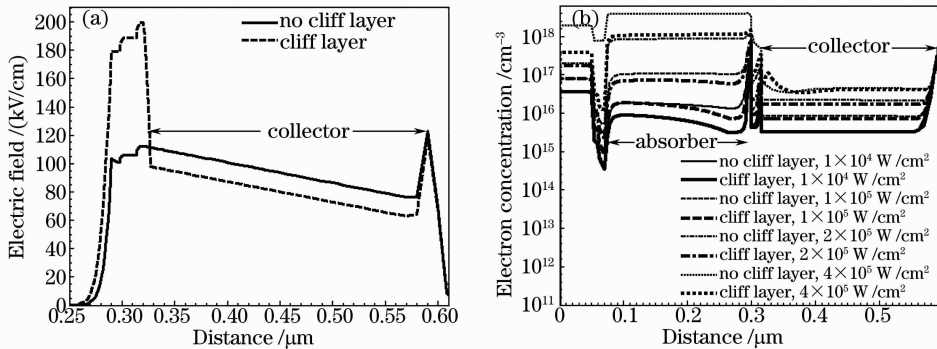


图 1 (a) 有无崖层时电场的分布;(b) 在不同光强下,有无崖层时电子浓度的分布

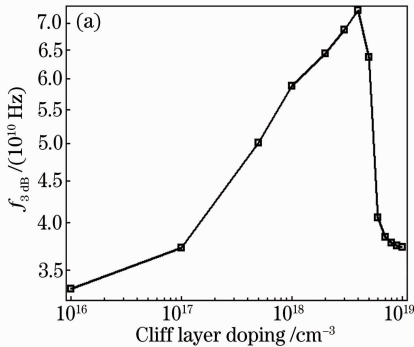
Fig. 1 (a) Electric field profiles with or without cliff layer; (b) electron concentration profiles for several light intensities with or without cliff layer

在不同光强下无崖层时电子浓度的分布如图1(b)所示。在吸收区,光强为  $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 、有崖层时的电子浓度比光强为  $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、无崖层时还要低,光强为  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 、有崖层时的电子浓度要小于光强为  $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 、无崖层时的电子浓度,这说明崖层的存在使得吸收层电子积累降低。同时还可以看到,当有崖层、光强为  $4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,电子在吸收区的浓度略大于该区的掺杂浓度,即在该光照强度下浓度开始饱和。而当没有崖层、光强为  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,电子在吸收区的浓度就达到了该区的掺杂浓度,即崖层使得饱和点向高光强处移动。在收集区,在同等光强下,有崖层时电子的浓度比没有崖层时要略低。

## 4 崖层对 UTC-PD 性能的影响

### 4.1 崖层掺杂浓度的影响

崖层厚度为 7 nm 时,3 dB 带宽随掺杂浓度的变化如图 2(a)所示。当崖层掺杂浓度在  $1 \times 10^{16} \sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  之间时,3 dB 带宽随掺杂浓度的增加而增大,且这个增加非常明显, $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时的带



宽是  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时的 2 倍之多。当崖层掺杂浓度大于  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,3 dB 带宽随掺杂浓度的增加先迅速下降,然后再缓慢下降。

图 2(b)所示为无光照时电场在不同崖层掺杂浓度下的分布。从图中可以看出,随着崖层掺杂浓度的增加,异质结处电场增加,且电场向吸收区内延伸,这使得 3 dB 带宽增加。同时,收集区的电场则随着掺杂浓度的升高而下降。在掺杂浓度达到  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,原本耗尽的收集区不再完全耗尽,导致结电容增加,3 dB 带宽应该下降,但是在该掺杂浓度下,3 dB 带宽却达到了最大值,这是由负微分饱和速度效应引起的,此时的电场使得电子在收集区中的速度达到最大值,导致电子的漂移时间降低,使由电子渡越时间与 RC 时间常数共同决定的 3 dB 带宽具有最大值。当崖层掺杂浓度大于  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,收集区的电场过低,使得电子的漂移时间增加,且收集区部分耗尽,直接导致了 3 dB 带宽的下降。在掺杂浓度大于  $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,收集区部分电场变为负数,这说明收集区已经不再是耗尽区,此时的带宽完全由 RC 时间常数限制。

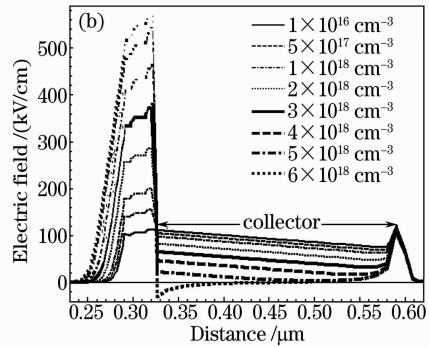


图 2 (a) 3 dB 带宽随崖层掺杂浓度的变化;(b) 无光照时,电场在不同崖层掺杂浓度下的分布

Fig. 2 (a) Change of 3 dB bandwidth as the cliff layer doping changes; (b) electric field profiles for various doping levels in the cliff layer without light

### 4.2 崖层厚度的影响

当崖层掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,3 dB 带宽随厚度的变化如图 3(a)所示。与崖层掺杂浓度对 3 dB 带宽的影响一样,带宽随崖层厚度的增加有一个先增加后下降的过程。在厚度为 27 nm 时,3 dB 带宽达到最大值。图 3(b)所示为无光照时电场在不同崖层厚度下的分布。随着崖层厚度的增加,异质结处电场增加,且电场向吸收区扩展,收集区电场降低,这与增加崖层掺杂浓度一样。唯一的区别在于,大电场区同时也向收集区延伸。当厚度为 27 nm 时,收集区部分耗尽,但在该厚度下,3 dB 带宽取最大值,这同样是由负微分饱和速度效应引起

的。在厚度大于 33 nm 时,收集区部分电场变为负数,此时收集区已不再是耗尽区。

### 4.3 崖层厚度与掺杂浓度乘积一定时的影响

将图 2(a)和图 3(a)中掺杂浓度与崖层厚度乘积对应相等的点作图 4。当崖层厚度为 7 nm,而掺杂浓度为  $5 \times 10^{17}$ 、 $1 \times 10^{18}$ 、 $2 \times 10^{18}$ 、 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时的 3 dB 带宽,与崖层掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为 3.5、7、14、21 nm 时的 3 dB 带宽对应相等。但是,当崖层厚度为 7 nm,而掺杂浓度为  $4 \times 10^{18}$ 、 $5 \times 10^{18}$ 、 $6 \times 10^{18}$ 、 $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时的 3 dB 带宽,与崖层掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为 28、35、42、49 nm 时的 3 dB 带宽则不对应相等。在前面的分析中指出,当崖层的

厚度为 7 nm、掺杂浓度大于等于  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，与崖层掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度大于等于 27 nm 时，收集区部分耗尽。这说明，只要崖层厚度与掺杂

浓度的乘积相等，且掺杂浓度的改变(厚度一定)或厚度的改变(掺杂浓度一定)仍然使收集区保持耗尽的状态，就可以获得同样的 3 dB 带宽。

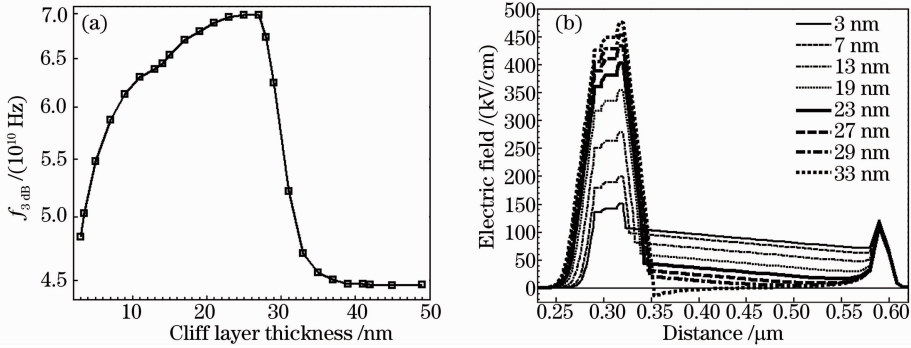


图 3 (a) 3 dB 带宽随崖层厚度的变化; (b) 无光照时, 电场在不同崖层厚度下的分布

Fig. 3 (a) Changes of 3 dB bandwidth as the cliff layer thickness changes; (b) electric field profiles for various cliff layer thicknesses without light

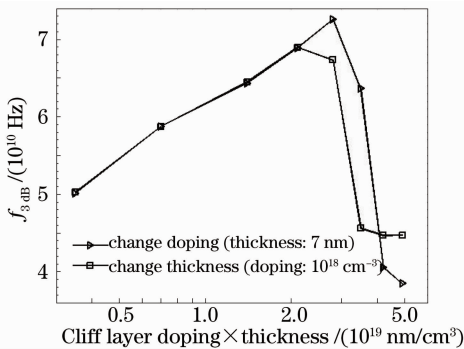


图 4 3 dB 带宽随崖层掺杂浓度(三角形)和厚度的变化(方形)

Fig. 4 Changes of 3 dB bandwidth as the cliff layer doping (triangles) and thickness (squares) change

图 5(a) 所示为当崖层的厚度与掺杂浓度的乘积为  $7 \times 10^{18} \text{ nm/cm}^3$  时, 3 dB 带宽在不同的崖层厚度和掺杂浓度下随入射光脉冲能量的变化关系。从图中可以看出, 无论崖层的厚度与掺杂浓度如何变化, 随着入射光脉冲能量的增加, 3 dB 带宽都有一个减小的趋势, 这是由空间电荷效应引起的。但是, 在同一光脉冲能量处, 随着崖层厚度的增加(掺杂浓度减小), 3 dB 带宽减小。在厚度为 35 nm 及以下时, 这个减小非常小, 完全可以忽略不计; 当厚度为 70 nm 时, 与厚度为 3.5 nm 时相比, 减少的值最小为 1.3 GHz, 最大为 3.7 GHz; 而当厚度为 175 nm 时, 减少的值最小为 4.5 GHz, 最大为 13 GHz。结合前面的分析, 可以得到这样一个结论: 当崖层厚度与掺杂浓度的乘积为一定值, 且收集层保持耗尽时, 随着崖层厚度的增加(掺杂浓度的减小), 3 dB 带宽下降。但是, 只要厚度的改变不是很大, 3 dB 带宽的下降就可以忽略不计。也就是说, 在设计 UTC-

PD 时, 崖层厚度的选择不宜过大, 通常以十几到几十纳米为宜。

图 5(b) 显示了无光照时, 在不同的崖层厚度和掺杂浓度(但乘积相等)下电场的分布。电场扩展至吸收区的程度基本上相同, 这点与只增加崖层的厚度或只增加掺杂浓度时不同。随着崖层厚度的增加(掺杂浓度减小), 异质结处电场强度下降, 这必然使电子在吸收区积累。图 5(c) 正好显示了光强为  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时电子浓度在吸收区的这种变化, 即在同一光照强度下, 吸收区的电子浓度随着崖层厚度的增加而增加。从该图中还可以看到, 电子浓度在收集区的变化不是很明显, 只是略有增加。电子在吸收区的积累, 会导致该区电子扩散系数的降低, 如图 5(d) 所示, 而电子在吸收区主要依靠扩散运动, 这必然导致电子的渡越时间增加, 从而使 3 dB 带宽降低。

## 5 结 论

本文着重从电场的角度分析了崖层在 UTC-PD 中的作用, 以及其对 UTC-PD 性能的影响, 尤其是对 3 dB 带宽的影响。研究表明, 崖层的存在使得异质结处电场强度增加, 且电场向吸收区延伸, 使电子在吸收区的渡越时间和积累程度降低, 从而导致 3 dB 带宽和饱和电流增加。研究结果还表明, 崖层的掺杂浓度和厚度都会对 3 dB 带宽产生显著的影响, 在只改变掺杂浓度或只改变厚度时, 3 dB 带宽分别存在一个最大值。当崖层的厚度与掺杂浓度的乘积一定, 且收集区保持耗尽时, 随着崖层厚度的增加(掺杂浓度减小), 3 dB 带宽下降。但是, 只

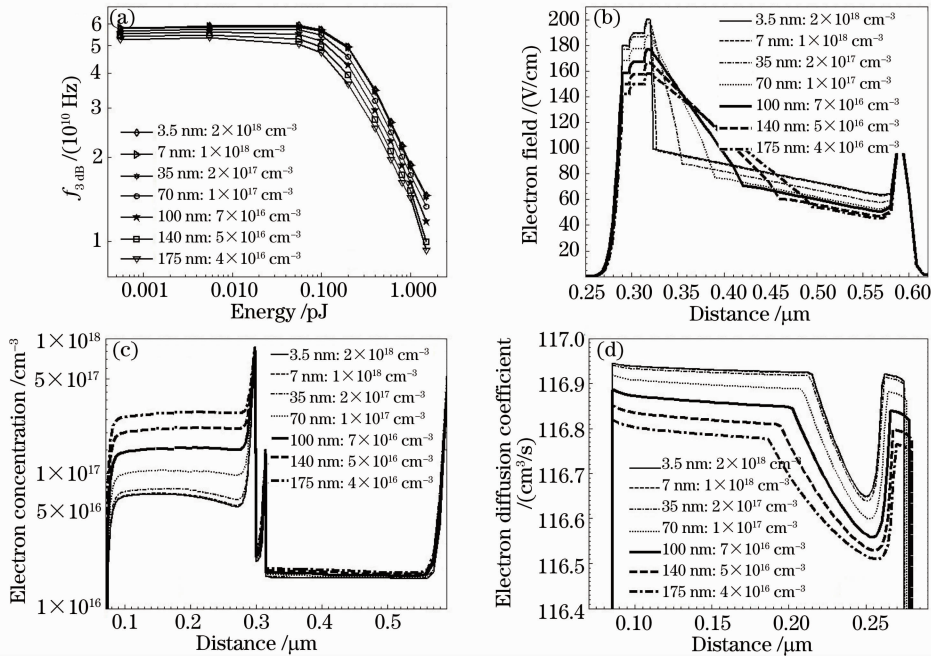


图 5 当崖层的厚度与掺杂浓度的乘积为  $7 \times 10^{18} \text{ nm/cm}^3$  时: (a) 3 dB 带宽随入射光脉冲能量的变化; (b) 无光照时电场的分布; (c) 光强为  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时, 电子浓度在吸收区和收集区的分布; (d) 光强为  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时, 电子扩散系数在吸收区的分布

Fig. 5 When the product of the cliff layer thickness and doping concentration is  $7 \times 10^{18} \text{ nm/cm}^3$ , (a) changes of 3 dB bandwidth as the input pulse energy changes; (b) electric field distributions without light; (c) electron concentration profiles in the absorber and collector with light intensity  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ; (d) electron diffusion coefficient distributions in the absorber with light intensity  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$

要崖层厚度不是太厚, 通常为十几纳米到几十纳米, 3 dB 带宽的下降就可以忽略不计。换言之, 当崖层厚度与掺杂浓度的乘积一定, 且崖层的厚度不是太厚, 同时收集区保持耗尽时, 则无论是改变崖层厚度 (掺杂浓度一定), 还是改变掺杂浓度 (厚度一定), 3 dB 带宽基本相等。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Shaoqing, Han Qin, Yang Xiaohong, *et al.*. Fabrication and characterization of high speed and high efficiency photodetector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022301.  
刘少卿, 韩 勤, 杨晓红, 等. 高速高效光电探测器的制备、测试及特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022301.
- 2 Tang Hengjing, Li Yongfu, Li Xue, *et al.*. Experimental study on polarization dependent response of InGaAs photodetector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 040401.  
唐恒敬, 李永富, 李 雪, 等. InGaAs 探测器偏振响应特性的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 040401.
- 3 Xie Sanxian, Huang Yongqing, Liu Qing, *et al.*. Theoretical analysis of quantum efficiency of novel dual-absorption photodetector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(5): 052301.  
谢三先, 黄永清, 刘 庆, 等. 新型双吸收光电探测器量子效率的理论分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(5): 052301.
- 4 Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, *et al.*. High-speed response

- of uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36(10): 6263—6268.
- 5 Ishibashi T, Furuta T, Fushimi H, *et al.*. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *IEICE Trans Electron*, 2000, E83-C(6): 938—949.
- 6 Ito H, Kodama S, Muramoto Y, *et al.*. High-speed and high-output InP-InGaAs unitraveling-carrier photodiodes [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2004, 10(4): 709—727.
- 7 Wang X, Duan N, Chen H, *et al.*. InGaAs-InP photodiodes with high responsivity and high saturation power [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(16): 1272—1274.
- 8 Chtioui M, Enard A, Carpentier D, *et al.*. High-power high-linearity uni-traveling-carrier photodiodes for analog photonic links [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(3): 202—204.
- 9 Tuo Shi, Bing Xiong, Changzheng Sun, *et al.*. Study on the saturation characteristics of high-speed uni-travelling-carrier photodiodes based on field screening analysis [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(8): 082302.
- 10 X Li, N Li, S Demiguel, *et al.*. A partially depleted absorber photodiode with graded doping injection regions [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(10): 2326—2328.
- 11 Mourad Chtioui, Francois Lelarge, Alain Enard, *et al.*. High responsivity and high power UTC and MUTC GaInAs-InP photodiodes [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(4): 318—320.
- 12 N Li, X Li, S Demiguel, *et al.*. High-saturation-current charge-compensated InGaAs-InP uni-traveling-carrier photodiode [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(3): 864—866.
- 13 H Pan, A Beling, H Chen, *et al.*. Characterization and

- optimization of high-power InGaAs/InP photodiodes [J]. *Opt Quantum Electron*, 2008, 40(1): 41–46.
- 14 Z Li, H P Pan, H Chen, *et al.*. High-saturation-current modified uni-traveling-carrier photodiode with cliff layer [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(5): 626–632.
- 15 Zhang Lingzi, Zuo Yuhua, Cao Quan, *et al.*. High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 138501.
- 张岭梓, 左玉华, 曹 权, 等. 单载流子光电探测器的高速及高饱和功率的研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 138501.
- 16 Srivastava S. Simulation Study of InP-Based Uni-Traveling-Carrier Photodiode [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2003. 129–133.
- 17 Santa Clara. ATLAS Users Manual [M]. Santa Clara: Silvaco International, 2008.

栏目编辑:何卓铭