

倍增层厚度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 雪崩 二极管器件特性的影响

王航^{1,2}, 袁正兵³, 谭明², 顾宇强², 吴渊渊², 肖清泉³, 陆书龙^{2*}

¹中国科学技术大学纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;

³贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 利用 Zn 扩散方法制备了倍增层厚度为 1.5, 1.0, 0.8 μm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 雪崩光电二极管 (APDs), 研究了该器件特性。随着倍增层厚度的增加, 器件的贯穿电压和击穿电压均呈现增大趋势。基于 Silvaco 模拟计算了 APD 器件的倍增层厚度对电场强度、电流特性、击穿电压与贯穿电压的影响规律, 结果表明, 随着倍增层厚度的增加, 倍增层内电场强度减小, 贯穿电压和击穿电压同时增大, 与实验结果吻合。进一步研究发现, 当倍增层的厚度小于 0.8 μm 时, 击穿电压随着倍增层厚度的增加会先减小后增大, 贯穿电压则会单调增大。

关键词 探测器; 雪崩光电二极管; 贯穿电压; 击穿电压; 分子束外延; Zn 扩散

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1804001

Effect of Multiplication Layer Thickness on Device Properties of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ Avalanche Photodiode

Wang Hang^{1,2}, Yuan Zhengbing³, Tan Ming², Gu Yuqiang²,
Wu Yuanyuan², Xiao Qingquan³, Lu Shulong^{2*}

¹*Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;*

²*Key Laboratory of Nano-devices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China;*

³*College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China*

Abstract We investigate the device properties of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ avalanche photodiodes (APDs) with different multiplication layer thicknesses of 1.5, 1.0 and 0.8 μm by the Zinc diffusion method. The punch-through voltage and the breakdown voltage increase with the increase of the multiplication layer thickness. On the basis of the simulation by the Silvaco software, the influences of the multiplication layer thickness on the electric field, current-voltage characteristics, breakdown voltages and punch-through voltages are studied. As the multiplication layer thickness increases, the electric field intensity decreases, in contrast, both of the punch-through and breakdown voltages increase, which are consistent with the experimental results. A further study shows that when the multiplication layer thickness is smaller than 0.8 μm and as the multiplication layer thickness increases, the breakdown voltage first decreases and then increases, while the punch-through voltage monotonically increases.

Key words detectors; avalanche photodiode; punch-through voltage; breakdown voltage; molecular beam epitaxy; Zn diffusion

OCIS codes 040.1345; 040.5160; 040.3060; 250.1345

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-02; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003305)、国家自然科学基金(61534008, 61774165, 61704186)、江苏省重点研发计划(BE2018005)、中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-086)、纳米所自有资金项目(Y8AAQ11003)

* E-mail: sllu2008@sinano.ac.cn

1 引 言

高灵敏度、低噪声探测器在光纤通信波段中的应用十分重要,其中基于 InGaAs/InP 材料体系的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)是应用最为广泛的一类。PIN 探测器的响应度较低且无法提供内部增益,而雪崩光电二极管通过碰撞电离引发雪崩倍增来实现电信号的内部增益放大,可以在不改变信号特征的情况下得到较高的灵敏度^[1]。为了获得更高性能的 APD,采用基于 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 的 SAGCM-APD(separate layer of absorption, grading, charge, multiplication APD)^[2],其组成材料 In_{0.53}Ga_{0.47}As 的禁带宽度为 0.75 eV,吸收波长在 1.0~1.7 μm 范围内^[3],在 1.6 μm 附近有吸收峰值,适用于光纤通信波段^[4-7]。四元化合物 InGaAsP 材料作为过渡层,可以减小 InGaAs 吸收层和 InP 倍增层之间的异质结势垒^[8]。

倍增区的厚度变化对器件性能的影响较大,在经典 SAGCM-APD 结构中,利用 APD 倍增区厚度的变化调节器件的电场分布,从而使器件的贯穿电压和击穿电压发生变化^[9]。较高的贯穿电压和较低的击穿电压使得 APD 探测器的线性工作区域较窄;相反地,增大击穿电压与贯穿电压会使外部控制电路的设计难度增大,系统噪声增加。为提高 APD 探测器的性能和使用效率,可对器件线性工作区域的大小进行合理优化。本文对 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD 探测器建立了相应的器件模型,计算了不同倍增层厚度下器件的电场强度、电流-电压(I-V)特性、贯穿电压与击穿电压,并采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长和开管式 Zn 扩散方法,对制备出的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP SAGCM-APD 探测器进行了测试分析。探究了不同倍增层厚度下器件暗电流、光电流、增益以及响应度的性能差异,并与器件仿真结果相比较,确定了倍增区厚度与器件击穿电压和贯穿电压之间的关系。

2 APD 器件的制备和性能分析

通过分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长技术和开管式 Zn 扩散方法,制备了 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP SAGCM-APD 探测器,结构如图 1 所示,其中 i 表示本征层。首先在半绝缘 InP 衬底上生长 1.0 μm 厚的 n 型重掺 InP 缓冲层;接着是作为吸收层的 2.0 μm 的本征 In_{0.53}Ga_{0.47}As,可以吸收光纤通信所需波段的近红外信号;第四层是四

元化合物 InGaAsP 过渡层,用以平滑 In_{0.53}Ga_{0.47}As 和 InP 之间的能带带隙,减少载流子在异质结界面上的积累^[10];第五层是 n 型 InP 的电荷层,用以控制调节整个器件内部的电场强度;第六层是本征 InP 的倍增层和 p 型 InP 接触层。其中,InP 倍增层和接触层以及保护环均采用开管式 Zn 扩散方法进行制备。分别制备了倍增层厚度为 1.5, 1.0, 0.8 μm 的 APD 器件,并采用半导体高精度探针台对 APD 器件的 I-V 特性进行了测试。

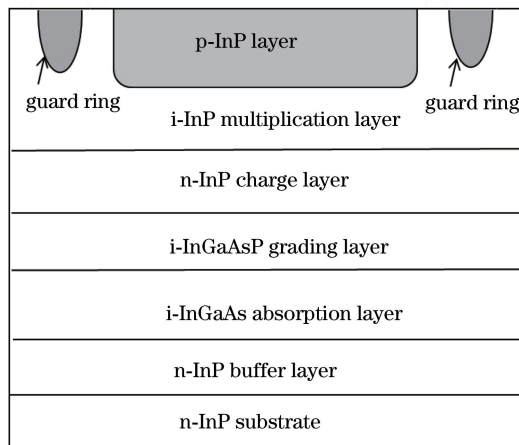


图 1 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD 的结构剖面图

Fig. 1 Structural cross-section of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD

不同光敏面直径下倍增层厚度为 1.0 μm 的 APD 探测器的 I-V 特性曲线如图 2 所示,其中电压为负值表示反向偏压。另外,器件的光电流是在入射波长为 1310 nm,辐射强度为 1 mW/cm² 的条件下得到的。从图 2 中可以看出,APD 探测器的暗电流在线性模式下小于 10 nA;随着 APD 器件光敏面直径的增大,器件的光电流和暗电流均有所增大,但探测器的贯穿电压与击穿电压(V_b)几乎不变。研究发现,在倍增层厚度为 1.0 μm 时,器件的贯穿电压在 25 V 左右,击穿电压在 55 V 左右。在器件两端施加的反向偏压达到击穿电压之前,器件工作在线性模式下,贯穿电压的出现表明器件中的光生载流子突破了壁垒到达倍增层。而随着反向偏压的继续增大,光生载流子在倍增层内不断发生碰撞电离,器件光电流缓慢增大,当器件偏压接近击穿电压时,倍增区内出现雪崩倍增现象,光电流的增益迅速增大,此时探测器工作在盖革模式下。器件增益在预贯穿点处设定为 1,当偏置电压上升至 0.95 V_b 时,计算得到器件的增益从 1 增加到 18^[16]。增益公式为

$$M = \frac{I_1 - I_d}{I_{10} - I_{d0}}, \quad (1)$$

式中： M 为倍增因子； I_1 和 I_d 分别为当前 APD 的光电流和暗电流； I_{10} 和 I_{d0} 分别为器件贯穿时的光电流和暗电流。

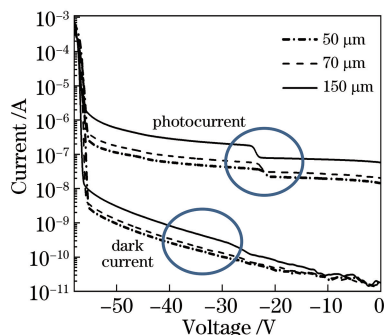


图 2 不同光敏面直径下 APD 器件的 I-V 特性

Fig. 2 I-V curves of APD device under different photosensitive diameters

图 3 给出了 InP 倍增层厚度分别为 1.5, 1.0, 0.8 μm 时器件的 I-V 曲线。当倍增层厚度为 0.8 μm 时, 器件贯穿电压为 23 V, 击穿电压为 43 V; 当倍增层厚度增加至 1.5 μm 时, 器件贯穿电压为 41 V, 击穿电压为 68 V。当器件贯穿电压从 23 V 增加至 41 V 时, 击穿电压从 43 V 增加至 68 V, 可以看出, 随着倍增区厚度的增加, 器件贯穿电压与击穿电压均表现出增大的趋势。

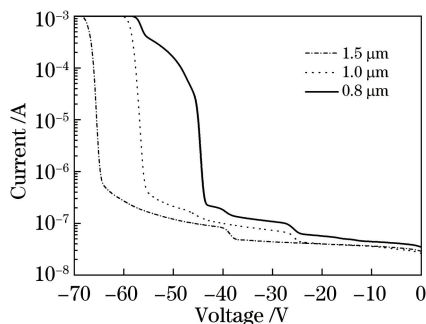


图 3 不同倍增层厚度下测得的 I-V 曲线

Fig. 3 I-V curves obtained under different multiplication layer thicknesses

3 器件性能的仿真分析

对于 SAGCM-APD 器件而言, 设计关键在于控制器件内部的电场分布, 即在倍增层电场强度足够大的情况下降低吸收层的电场强度, 减小隧穿电流^[11]。Zn 扩散工艺主要用于 P 型掺杂, 能够决定器件的接触层以及倍增层的参数, 因此本文对器件倍增层厚度进行设计。根据前期已有的器件设计制备经验, 将电荷层的层面密度确定为 $2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ^[2]。同时已有研究表明, SAGCM-APD 器

件的吸收层与缓冲层对内部电场的调节作用不大, 而倍增层参数与电场分布的相关性大^[12], 所以针对倍增层厚度对器件的影响进行了模拟计算。

图 4 给出了不同倍增层厚度下器件内部的电场分布。从图 4 中可以看出, 随着倍增层厚度的增加, 器件倍增层的电场强度不断减小, 利用倍增层电场随厚度的变化规律可以有效调控器件内部的电场。电场强度的变化会对 InP 材料的碰撞电离系数产生影响, 从而能够调控 APD 的倍增因子^[13]。从图 4 中还可以看出, 在所有倍增层厚度下, 器件倍增层内的电场强度均保持在 100 kV/cm 以上, 满足了发生雪崩倍增的条件^[14]。

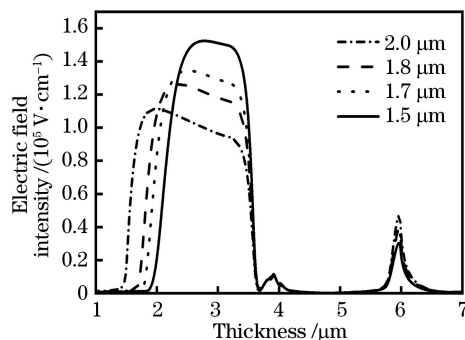


图 4 不同倍增层厚度下的内部电场强度

Fig. 4 Internal electric field intensities under different multiplication layer thicknesses

模拟了不同倍增层厚度下器件的贯穿电压和击穿电压, 结果如图 5 所示。从图 5 中可以看到, 随着倍增层厚度的增加, 贯穿电压和击穿电压的变化规律与实验结果一致。其中, 贯穿电压的模拟结果与实验测试值吻合较好, 击穿电压的实际测试值比模拟结果高。这可能是由于在仿真过程中, 针对 Zn 扩散工艺, 采用高斯分布掺杂, 该掺杂的特点是有限表面源向半导体内部进行扩散, 且没有其他杂质原子的补充, 随着扩散时间的增加, 杂质原子在表面的

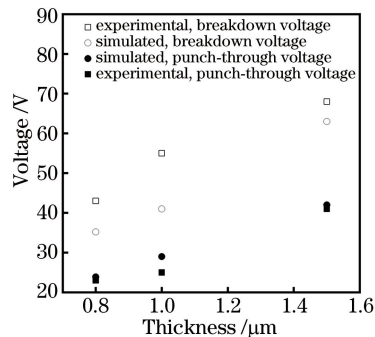


图 5 InP 倍增层厚度与击穿电压和贯穿电压的关系

Fig. 5 Breakdown voltage and punch-through voltage versus InP multiplication layer thickness

浓度不断下降,其内部扩散距离不断增加。而在实际制备器件的过程中,Zn 扩散一般会采取两步扩散法,第一步为预扩散,即采用恒定表面源扩散法,控制杂质总量,杂质为余误差函数分布;第二步为主扩散,即将预扩散的 Zn 源作为扩散源进行高温再扩散,此时杂质为高斯函数分布。仿真过程无需进行预扩散,直接对表面浓度进行定义。而在实际制备

器件的过程中,由于工艺的复杂性,可能无法实现预定的掺杂浓度,因此器件的击穿电压比预计值高。

倍增层厚度小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时 APD 器件击穿电压和贯穿电压的变化如图 6 所示,其中 x_m 为倍增层的厚度。从图 6 及图 4 可以看到,随着倍增层厚度的增加,器件倍增层的电场强度不断减小,器件击穿电压先减小后增大。

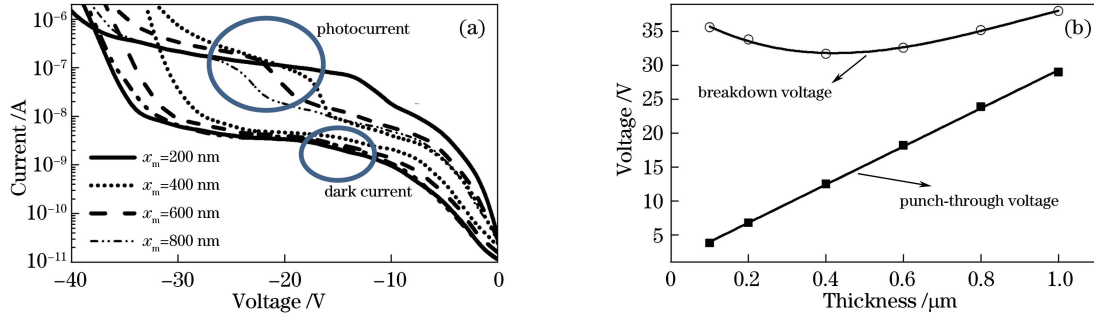


图 6 薄倍增层下 APD 器件的仿真结果图。(a)不同倍增层厚度下器件的 I-V 曲线;
(b) InP 倍增区厚度与击穿电压和贯穿电压的关系

Fig. 6 Simulation results of APD device with thin multiplication layer. (a) I-V curves under different multiplication layer thicknesses; (b) breakdown voltage and punch-through voltage versus InP multiplication layer thickness

为了解释这一现象,本文从器件倍增因子的角度出发进行研究^[15]。In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD 探测器的倍增因子可表示为

$$M = \frac{1 - k}{\exp[-\beta(1 - k)x_m] - k}, \quad (2)$$

式中: β 为空穴碰撞电离系数,是一个与电场强度相关的量; k 为倍增层材料 InP 的空穴电离系数与电子电离系数的比,为常量。对 x_m 求偏导,可得

$$\frac{\partial M}{\partial x_m} = M^2 \exp[-\beta(1 - k)x_m] (\beta + x_m \frac{\partial \beta}{\partial x_m}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial x_m} = \frac{\partial \beta}{\partial E_m} \cdot \frac{\partial E_m}{\partial x_m}, \quad (4)$$

式中: E_m 为倍增层电场强度的最大值。倍增层电场强度越大,空穴碰撞电离系数越大,所以 $\frac{\partial \beta}{\partial E_m} > 0$ 。

同时,由图 4 可知,随着倍增层厚度的增加,最大电场强度减小,即 $\frac{\partial E_m}{\partial x_m} < 0$,因此 $\frac{\partial \beta}{\partial x_m} < 0$ 。令 $x_{vmin} =$

$\beta \frac{\partial x_m}{\partial \beta}$,当 $x_m > x_{vmin}$ 时,由(3)式计算可知 $x_m < -\beta \frac{\partial x_m}{\partial \beta}$,即 $\beta + x_m \frac{\partial \beta}{\partial x_m} < 0$,因此 $\frac{\partial M}{\partial x_m} < 0$,此时需要

要通过增加偏置电压来加大电场强度,使得击穿电压 V_b 随着倍增层厚度的增加而表现出正相关的特性。

相反地,当 $x_m < x_{vmin}$ 时,计算可得 $x_m >$

$-\beta \frac{\partial x_m}{\partial \beta}$,即 $\beta + x_m \frac{\partial \beta}{\partial x_m} > 0$,此时 $\frac{\partial M}{\partial x_m} > 0$ 。倍增因子

随着倍增层厚度的增加而增大,倍增层在更小的电场中就能引发雪崩击穿,所以击穿电压随着倍增层厚度的增加而减小。通过对不同倍增层厚度下器件性能的仿真以及 APD 倍增因子公式的推导计算,本文确定了倍增层厚度对器件电场强度以及击穿电压和贯穿电压的影响:倍增层厚度在 $0.4 \mu\text{m}$ 以下时,击穿电压随着厚度的增加而减小;倍增层厚度在 $0.4 \mu\text{m}$ 以上时,击穿电压随着厚度的增加而增加;贯穿电压在整个过程中均会随着倍增层厚度的增加而增大。

4 结 论

研究了基于 Zn 扩散方法制备的倍增层厚度为 $1.5, 1.0, 0.8 \mu\text{m}$ 的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD 的器件特性。随倍增层厚度的增加,器件的贯穿电压和击穿电压均呈现增大的趋势。基于 Silvaco 模拟计算了 APD 器件倍增层厚度对电场强度、电流、击穿电压与贯穿电压的影响。结果表明,随着倍增层厚度的增加,倍增层内的电场强度降低,贯穿电压和击穿电压同时增大。模拟结果和实验结果吻合良好。进一步的研究发现,当倍增层厚度小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时,击穿电压会随着倍增层厚度的增加出现先减小后增

大的趋势而贯穿电压则会单调增大。研究结果对未来制备具有宽工作电压范围的 APD 器件具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104003. 丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003
- [2] Yuan Z B, Xiao Q Q, Yang W X, et al. Response and electrical characteristics of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ avalanche photodiode [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(3): 0304002. 袁正兵, 肖清泉, 杨文献, 等. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 雪崩光电二极管响应及电学特性[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0304002.
- [3] van Veen D T, Houtsma V E, Gnauck A H, et al. Demonstration of 40-Gb/s TDM-PON over 42-km with 31 dB optical power budget using an APD-based receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(8): 1675-1680.
- [4] Chen J J, Cui J C, Liu J N, et al. Correction technology of HgCdTe short-wave infrared focal plane arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0204001. 陈建军, 崔继承, 刘嘉楠, 等. HgCdTe 短波红外焦平面探测器校正技术[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0204001.
- [5] Lin H Y, Xie H, Wang Y, et al. Modeling of InAsSbP blocking barrier grown by liquid-phase epitaxy in InAs-based infrared photodetector [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0504002. 林虹宇, 谢浩, 王洋, 等. 基于液相外延的 InAs 基红外探测器 InAsSbP 阻挡层的仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0504002.
- [6] Zhao Y L. Impact ionization in absorption, grading, charge, and multiplication layers of InP/InGaAs SAGCM APDs with a thick charge layer[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(10): 3493-3499.
- [7] Pitts O J, Hisko M, Benyon W, et al. Optimization of MOCVD-diffused p-InP for planar avalanche photodiodes[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 393: 85-88.
- [8] Ma Y J, Zhang Y G, Gu Y, et al. Low operating voltage and small gain slope of InGaAs APDs with p-type multiplication layer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 661-664.
- [9] Clark W R, Davis A, Roland M, et al. A 1 cm²/spl times/1 cm In/sub 0.53/Ga/sub 0.47/As-In/sub 0.52/Al/sub 0.48/As avalanche photodiode array [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 19-21.
- [10] Chen H, Xiao Q Q, Lu S L, et al. Simulation on the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ infrared detectors by silvaco-TCAD[J]. Low Temperature Physical Letters, 2018(6): 1-7. 陈豪, 肖清泉, 陆书龙, 等. 基于 silvaco-TCAD 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 红外探测器的仿真[J]. 低温物理学报, 2018(6): 1-7.
- [11] Acerbi F, Tosi A, Zappa F. Dark count rate dependence on bias voltage during gate-off in InGaAs/InP single-photon avalanche diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(18): 1832-1834.
- [12] Akiba M, Tsujino K, Sasaki M. Ultrahigh-sensitivity single-photon detection with linear-mode silicon avalanche photodiode [J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2621-2623.
- [13] Kleinow P, Rutz F, Aidam R, et al. Experimental investigation of the charge-layer doping level in InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 298-302.
- [14] van Gorp G J, van Dongen T, Fontijn G M, et al. Interstitial and substitutional Zn in InP and InGaAsP [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 65(2): 553-560.
- [15] Maruyama T, Narusawa F, Kudo M, et al. Development of a near-infrared photon-counting system using an InGaAs avalanche photodiode [J]. Optical Engineering, 2000, 41(2): 138-139.
- [16] Zhu M, Chen J, Lü J B, et al. Optimization of p-i-n InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ photodetector [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0104004. 朱敏, 陈俊, 吕加兵, 等. p-i-n InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 探测器结构优化[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0104004.