

# 高速高效光电探测器的制备、测试及特性分析

刘少卿 韩勤 杨晓红 刘宇 王杰 王秀平

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要** 报道了一种垂直入射的 InP 基 InGaAs pin 光电探测器,介绍了它的制备和测试方法并对器件所展示出的高效、高速、高线性度特性进行了分析。器件的暗电流密度在 0 和 -5 V 偏压时分别为  $1.37 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> 和  $93 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>; 在 1.55  $\mu$ m 波长, -3 V 偏压下,器件的线性光响应高达 28 mW,相应的最大线性电流为 17 mA,响应度达到 0.61 A/W(无减反射膜);在 -5 V 偏压下,器件获得高达 17.5 GHz 的 3 dB 带宽。

**关键词** 光学器件; pin 探测器; InGaAs; 高速; 高效

**中图分类号** O475 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.022301

## Fabrication and Characterization of High-Speed and High-Efficiency Photodetector

Liu Shaoqing Han Qin Yang Xiaohong Liu Yu Wang Jie Wang Xiuping

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** In this paper, we demonstrate a top-illuminated InGaAs pin photodetector grown on InP substrate. The fabrication, measurement and characterization of this photodetector are discussed in this paper. Low dark current densities of  $1.37 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> at 0 and  $93 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> at a reverse bias of 5 V are achieved. At a wavelength of 1.55  $\mu$ m, the photodetectors have a responsivity of 0.61 A/W without antireflection coating, a linear photoresponse up to 28 mW optical power and a maximum linear photocurrent of 17 mA at -3 V. The measured 3 dB bandwidth of a 22  $\mu$ m-diameter photodetector is 17.5 GHz.

**Key words** optical devices; pin photodetector, InGaAs, high speed, high-efficiency

**OCIS codes** 230.0040; 040.5160

## 1 引言

光电子器件是光纤通信系统的核心器件,光纤通信系统的性能水平、可靠性和成本很大程度上是由光电子器件的水平决定的。从探测器的材料选择方面来看,InP 基 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As pin 光电探测器具有良好的电子传输特性并且能够有效地吸收 1.0~1.7  $\mu$ m 波长的光<sup>[1]</sup>,被普遍应用于长波长(1.10~1.65  $\mu$ m)光纤通信网络。而且,由于 InP 和 InGaAs 晶格匹配,生长出的外延片质量很高,探测器可以得到较低的暗电流以及较高的稳定性和可靠性<sup>[2,3]</sup>。

从探测器的整体结构来看,垂直入射光电探测器(VPD)被认为是标准的探测器类型,也是一种最简单的探测器结构。虽然边入射的波导型探测器凭借其能够解决速度和效率之间相互制约的问题,全面提升器件的速度和效率特性而倍受研究者的青睐<sup>[4~7]</sup>。但是,和垂直入射光电探测器相比,边入射波导型探测器制作工艺复杂、难度较大、光纤耦合复杂、耦合效率低。另一方面,用 VPD 能够获得二维的探测器阵列,因而使得 VPD 拥有更广泛的应用空间<sup>[8,9]</sup>。

如何利用简单的结构和制作工艺制作出高性能的探测器,是进一步优化探测器的基础,也是向更实用化

收稿日期: 2011-08-22; 收到修改稿日期: 2011-09-29; 网络出版日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(60876039,61176053)和国家 863 计划(2009AA03Z404)资助课题。

作者简介: 刘少卿(1983-),女,博士研究生,主要从事高速光电探测器方面的研究。E-mail: sqliu@semi.ac.cn

导师简介: 韩勤(1965-),男,博士,研究员,主要从事光电探测器方面的研究。E-mail: hanqin@semi.ac.cn

发展的要求。鉴于以上考虑,本文制备了一种垂直入射的 InP 基 InGaAs 探测器并获得了 17.5 GHz 的带宽,介绍了它的制备和测试方法,且对测试结果进行了分析讨论。

## 2 器件结构及制备

图 1 为 InP 基  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  pin 光电探测器的器件结构简图。光电探测器的外延片是利用金属有机气相沉积 (MOCVD) 系统在半绝缘的 InP 衬底上进行生长的,自下而上依次为  $1.0\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{N}^+$  掺杂的 InP 缓冲层、厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$  的非故意掺杂的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收层、 $1.0\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{P}^+$  掺杂的 InP 层和  $0.05\ \mu\text{m}$  厚的 P 型重掺杂的 InGaAs 接触层。

InP 基 InGaAs 探测器的制作工艺主要利用传统的光刻技术,湿法腐蚀和剥离技术。首先,在外延片上刻蚀出直径分别为  $22, 32, 42, 52\ \mu\text{m}$  的圆形台面,用  $\text{V}(\text{Br}_2):\text{V}(\text{HBr}):\text{V}(\text{H}_2\text{O})$  非选择性湿法腐蚀液刻蚀到  $\text{N}^+$  InP 层。因为  $\text{N}^+$  InP 层的厚度只有  $1.0\ \mu\text{m}$ ,所以腐蚀深度一定要能精确地控制且要保持腐蚀深度的均匀性,误差需远小于  $1.0\ \mu\text{m}$ ,即要保证腐蚀到  $\text{N}^+$  InP 层但又不能超过这一层。接着腐蚀出较大一些的长方形台面到半绝缘的 InP 衬底。继而在外延片上生长  $400\ \text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  钝化层,套刻腐蚀出窗口层和金属接触层。然后,通过热蒸发 Au/Ge/Ni 和金属剥离技术,制作出 N 型接触。再溅射一层 Ti/Au,腐蚀出 P 型接触和探测板电极图形。最后,将器件样品放入合金炉内,在  $408\ ^\circ\text{C}$  氮气环境中合金  $50\ \text{s}$ 。

## 3 器件的测试及特性分析

对探测器来说,暗电流是很重要的一个参数指标,它取决于探测器的外延片的质量和噪声特性。本文中器件的暗电流是用 HP4140B 皮安表,在没有光照的条件下进行测试的。图 2 为台面直径  $42\ \mu\text{m}$  的 pin 探测器的暗电流与反向偏压的关系曲线。此器件的暗电流密度在 0 时为  $1.37 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$ ,在  $-5\ \text{V}$  反向偏压下为  $93 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$ ,并且在器件击穿前暗电流随偏压增加缓慢,这表明器件的外延片有良好的质量且后期工艺也没有对其造成损坏。

光电流测试系统是用碘钨灯作为光源,经斩波器加载调制信号后用光栅单色仪分光,再由显微镜聚焦,探测到的光电信号经过锁相放大器放大用微机数据采集系统记录。InP 基 InGaAs pin 探测器的光电流谱如图 3 所示。探测器的响应波长范围为  $900 \sim 1700\ \text{nm}$ ,响应中心波长在  $1400\ \text{nm}$  附近且在  $1100 \sim 1650\ \text{nm}$  之间均有较强的光响应。

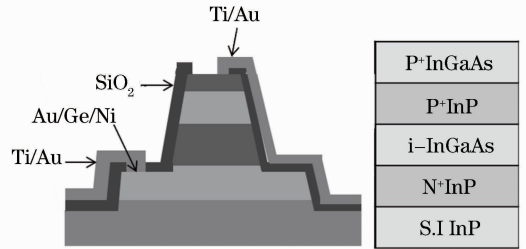


图 1 InP 基 InGaAs pin 光电探测器的结构

Fig. 1 Schematic diagram of the InGaAs pin photodetector

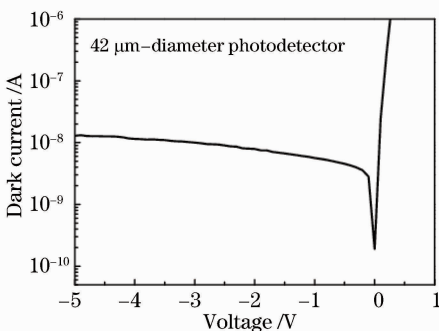


图 2 pin 探测器的暗电流随反向偏压的变化曲线

Fig. 2 Dark current-voltage curves of a photodetector

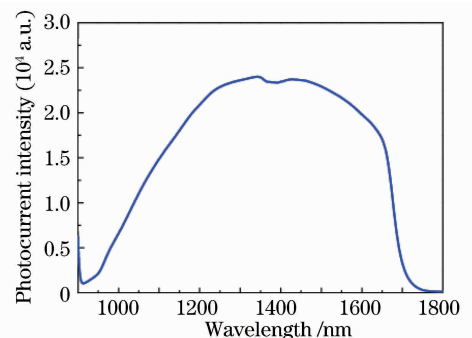


图 3 InP 基 InGaAs pin 探测器的光电流谱

Fig. 3 Measured Photoresponses of the InP-based InGaAs pin photodetector

探测器的响应度及线性度测试是用一个中心波长在  $1550\ \text{nm}$  的激光器作为光源。在不同反向偏压下,光电流随入射光功率的变化曲线如图 4 所示。在特定光功率下,光电流随着反向偏压的增大而逐渐增大直

到器件的耗尽区完全耗尽。在 3 V 反向偏压下,器件的线性响应范围达到 28 mW,饱和电流为 17 mA,对应的响应度达到 0.61 A/W(无抗反射膜)。如果在器件上加一层  $\text{SiN}_x$  抗反射膜,响应度会有明显的提高。根据垂直入射探测器的响应度表达式  $R=R_{\text{ideal}}(1-R_0)[1-\exp(-\alpha d_{\text{abs}})]$ ,其中  $R_{\text{ideal}}$  为理想响应度,在波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时, $R_{\text{ideal}}=1.25 \text{ A/W}$ ;  $R_0$  为器件表面的反射率; $\alpha$  和  $d_{\text{abs}}$  分别为吸收系数和吸收层的厚度。对器件的响应度进行理论模拟如图 5 所示,加上能够使得器件表面反射率接近于零的抗反射膜时,器件的响应度可以超过 1.0 A/W。由于电荷屏蔽效应<sup>[10,11]</sup>,当光功率大于 28 mW 时,光电流出现饱和现象不再随着光功率的增加而增加,饱和电流为 17 mA。

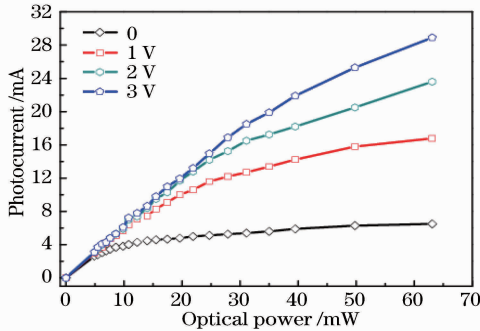


图 4 在不同反向偏压下,光电流随光功率的变化曲线  
Fig. 4 Optical input power versus photocurrent of the photodetector under various reverse biases

器件的高频特性测试基于微波矢量网络分析仪 8720D, 1550 nm 的分布反馈激光器和 40 GHz 的  $\text{LiNbO}_3$  调制器。直径为  $22 \mu\text{m}$  的 InGaAs 探测器使用一个  $50 \Omega$  负载电阻在不同反向偏压下的高频特性如图 6 所示。器件的 3 dB 带宽在  $-5 \text{ V}$  偏压下达达到 17.5 GHz。影响探测器高频特性的因素有两个,即渡越时间和电阻-电容 (RC) 时间常数。渡越时间限制带宽可以表示为  $f_{\text{tr}}=0.45v/L$ ,其中  $L$  为耗尽区的宽度, $v$  为载流子的漂移速度 ( $v=6 \times 10^6 \text{ cm/s}$ )。理论计算得到的渡越时间带宽为 18 GHz。RC 限制带宽可以表示为  $f_{\text{RC}}=1/(2\pi RC)$ ,其中  $R$  为器件的串联电阻和负载电阻之和; $C$  为器件的电容。基于测量的直径为  $22 \mu\text{m}$  的探测器的串联电阻值和电容值,计算得到 RC 限制带宽 26 GHz。器件的 3 dB 带宽可近似表示为  $f_{3\text{dB}} \approx \sqrt{1/(1/f_{\text{tr}}^2 + 1/f_{\text{RC}}^2)}$ ,它同时受到两种因素的限制。可以看到器件的实际测试值和渡越时间带宽相近,可知此器件主要受到载流子渡越时间常数的限制,减小吸收区的厚度可以进一步提高器件的响应速度。

## 4 结 论

制备了一种垂直入射的 InP 基 InGaAs pin 光电探测器并对它进行了测试和特性分析。器件的暗电流密度在 0 偏压时为  $1.37 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ,在  $-5 \text{ V}$  反向偏压下为  $93 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ;在  $1.55 \mu\text{m}$  波长,器件获得高达 28 mW 的线性响应,相应的最大线性电流为 17 mA,响应度达到 0.61 A/W(无抗反射膜),3 dB 带宽为 17.5 GHz。器件不仅拥有高的量子效率和响应速度,而且具有较高的线性度和饱和电流,使得器件在光纤通信的应用中能够提升整个光纤传输链路的特性,包括提高链路的增益,减小噪声指数和增大链路的动态范围<sup>[12,13]</sup>。

## 参 考 文 献

1 Y. S. Wang, S. J. Chang, C. L. Tsai *et al.*, 10-Gb/s planar InGaAs p-i-n photodetectors[J]. *IEEE Sensors J.*, 2010,

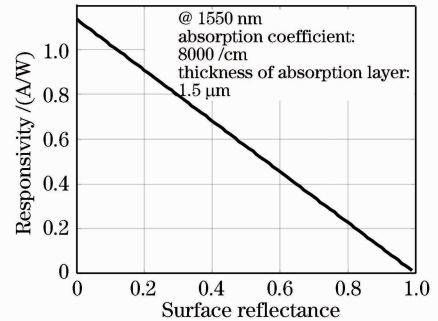


图 5 器件的响应度随表面反射率变化关系的模拟曲线  
Fig. 5 Simulation of the responsivity versus surface reflectance of the photodetector

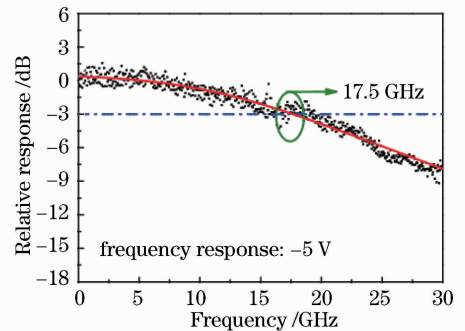


图 6 探测器的高频响应特性  
Fig. 6 Measured frequency response of a photodetector

- 10**(10): 1559~1563
- 2 Y. S. Liao, G. R. Lin, H. C. Kuo *et al.*. 10-Gb/s operation of an InGaAs pin photodiode on metamorphic InGaP buffered semi-insulating GaAs substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(17): 1822~1824
  - 3 B. Zhu, Q. Han, X. H. Yang *et al.*. Metamorphic InGaAs p-i-n photodetectors with 1.75  $\mu\text{m}$  cut-off wavelength grown on GaAs[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(3): 038504
  - 4 J. W. Park. High-responsivity and high-speed waveguide photodiode with a thin absorption region[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(13): 975~977
  - 5 L. Xu, M. Nikoufard, Xaveer J. M. Leijtens *et al.*. High-performance InP-based photodetector in an amplifier layer stack on semi-insulating substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(23): 1941~1943
  - 6 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
  - 7 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
  - 8 Duan Xiaofeng, Huang Yongqing, Wang Qi *et al.*. A wavelength selectivity monolithically integrated photodetector array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2362~2366  
段晓峰,黄永清,王 琦 等. 具有多波长处理功能的单片集成光探测器阵列[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2362~2366
  - 9 Y. S. Wang, S. J. Chang, C. L. Tsai *et al.*. High-speed InGaAs p-i-n photodetector with planar buried heterostructure [J]. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2009, **56**(6): 1347~1350
  - 10 X. Wang, N. Duan, H. Chen *et al.*. InGaAs-InP photodiodes with high responsivity and high saturation power[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(16): 1272~1274
  - 11 P. L. Liu, K. J. Williams, M. Y. Frankel *et al.*. Saturation characteristics of fast photodetectors[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1999, **47**(7): 1297~1303
  - 12 D. A. Tulchinsky, X. W. Li, N. Li *et al.*. High-saturation current wide-bandwidth photodetectors[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(4): 702~708
  - 13 X. W. Li, N. Li, X. G. Zheng *et al.*. High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(9): 1276~1278