

doi:10.3788/gzxb20154406.0604002

# 低暗电流 InGaAs-MSM 光电探测器

闫欣<sup>1,3</sup>, 汪韬<sup>1</sup>, 尹飞<sup>1</sup>, 倪海桥<sup>2</sup>, 牛智川<sup>2</sup>, 辛丽伟<sup>1</sup>, 田进寿<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** MSM(金属-半导体-金属)型光电探测器的较低寄生电容和高带宽的特点使得其应用广泛, 可用于空间通信、遥感等多方面, 但暗电流偏大仍是制约其发展的重要因素。为此, 本文研制了  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  面积的 InGaAs-MSM 光电探测器, 通过设计 InAlGaAs/InGaAs 短周期超晶格和 InAlAs 肖特基势垒增强结构, 将器件暗电流密度降至  $0.6 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$  ( $5 \text{ V}$  偏置), 改善了目前同类器件的信噪比。对器件光电参数进行了表征:  $3\text{dB}$  带宽  $6.8 \text{ GHz}$ , 上升沿  $58.8 \text{ ps}$ ,  $1550 \text{ nm}$  波段响应度  $0.55 \text{ A/W}$ , 光吸收区域外量子效率  $88\%$ 。分析了短周期超晶格和肖特基势垒增强层对暗电流的抑制机理。

**关键词:** 半导体器件; 光电探测器; MOCVD; 暗电流; MSM; InGaAs; 超晶格; 肖特基势垒

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0604002-5

## InGaAs-MSM Photodetector with Low Dark Current

YAN Xin<sup>1,3</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, YIN Fei<sup>1</sup>, NI Hai-qiao<sup>2</sup>, NIU Zhi-chuan<sup>2</sup>, XIN Li-wei<sup>1</sup>, TIAN Jin-shou<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(2 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** MSM (Metal-Semiconductor-Metal) photodetector has been widely used for its low capacitance and high bandwidth. For example, it can be used for space communication, remote sense and so on. But the development of MSM devices is still hindered by the dark current. In this paper, the  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  InGaAs-MSM photodetector is successfully fabricated. The dark current density is reduced to  $0.6 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$  ( $5 \text{ V}$ ) by designing InAlGaAs/InGaAs short period superlattices and InAlAs Schottky barrier enhancement and this improves the SNR. Parameters of the device are characterized as follows: the  $3\text{dB}$  bandwidth is  $6.8 \text{ GHz}$ , the rise time is  $58.8 \text{ ps}$ , the responsibility is  $0.55 \text{ A/W}$  at  $1550 \text{ nm}$  and the external quantum efficiency of the absorption region is  $88\%$ . Inhibition mechanisms of the short period superlattices and Schottky barrier enhancement are analyzed.

**Key words:** Semiconductor devices; Photodetectors; MOCVD; Dark current; MSM; InGaAs; Superlattices; Schottky barrier

**OCIS Codes:** 040.3060; 040.5160; 160.2100; 160.6000

## 0 引言

金属-半导体-金属 (Metal-Semiconductor-Metal, MSM) 型光电探测器背靠背肖特基二极管的

对称简洁结构使得其具有较低的寄生电容, 同时与高速 FET 工艺兼容, 探测器易于集成<sup>[1]</sup>。相比于 APD 和 PIN 结构, MSM 结构更容易制得高带宽、大面积器件, 但是暗电流特性一直是制约 MSM 光电探测器 (MSM-

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61176006, 11274377) 资助

第一作者: 闫欣 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外探测器和光电器件。Email: yanxin@opt.ac.cn

导师 (通讯作者): 汪韬 (1974—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光电探测器、红外灵敏器件、光电器件、光伏器件、超快诊断技术等。

Email: wangtao@opt.ac.cn

收稿日期: 2015-01-20; 录用日期: 2015-04-03

<http://www.photon.ac.cn>

PD)发展的重要因素. 虽然采用 ITO 和 InP 等作为势垒增强层以及镍/多孔硅系统等方法降低了 MSM 器件的暗电流, 但目前百  $\mu\text{m}$  尺寸光敏面的 MSM-PD 暗电流密度仍普遍较大, 例如日本滨松生产的  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  InGaAs-MSM 光电探测器, 偏压 5 V 时暗电流密度  $25 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$  左右. 因此如何降低大面积器件的暗电流, 提高信噪比成为 MSM-PD 的研究热点. 通常可以通过以下几种方法提高 MSM-PD 的信噪比: 使用共振腔结构, 制作透明电极, 采用背照射方式, 借助亚波长光栅, 设计肖特基势垒增强层等. 为了降低器件的暗电流, 提高信噪比, 本文探讨了 InAlGaAs/InGaAs 短周期超晶格和 InAlAs 肖特基势垒增强结构对暗电流的抑制机理, 研制了大面积的 InGaAs-MSM 光电探测器, 并对其光电参数进行了表征, 成功将器件的暗电流密度降至  $0.6 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$  (5 V), 改善了信噪比.

## 1 外延结构和电极结构

采用 LP-MOCVD<sup>[2]</sup> (低压金属有机化学汽相沉积) 在 InP(100) 衬底材料上生长 50 nm 的  $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  作为缓冲层来减小材料之间的晶格失配<sup>[3-4]</sup>; 由于短周期超晶格的微带结构可以进一步降低外延材料的晶格失配, 减小电荷堆积和能带尖峰问题, 因此在  $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  缓冲层上生长  $(\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As})_n$  短周期超晶格 (SPSL,  $\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}$  5 nm,  $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  5 nm,  $n=30$ ); 采用 1000 nm  $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  材料作为响应层, 电子浓度  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 响应层之上生长 300 nm  $\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}$  缓冲层; 由于 InGaAs 与金属接触的势垒高度仅为 0.2 eV, 会引起较大的暗电流<sup>[5]</sup>, 因此缓冲层之上生长 80 nm  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  材料作为肖特基势垒增强层; 完成电极的制备后, 在表面做 600 nm  $\text{SiO}_2$  钝化层. 外延扫描电镜图 (SEM) 如图 1.

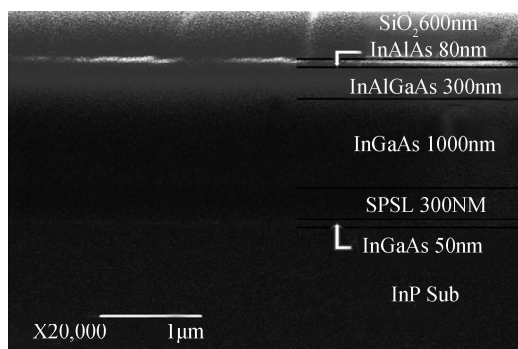


图 1 器件外延结构扫描电镜图  
Fig. 1 SEM of the epitaxial layer

电极采用 Ti/Au, 厚度 50 nm/500 nm, 插指电极的指宽和指间距均为  $3 \mu\text{m}$ ; 插指部分面积为  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ , 如图 2.

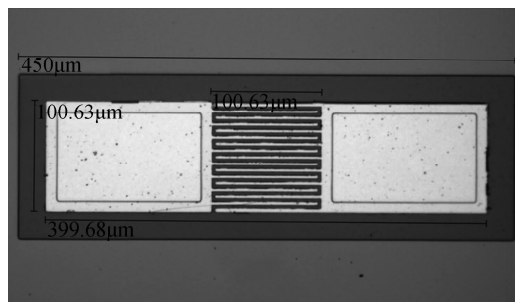


图 2 器件 MSM 电极  
Fig. 2 The MSM electrodes

感光面被钝化层覆盖, 对器件有一定的保护作用, 也可以降低器件表面态密度以抑制暗电流<sup>[6]</sup>. 另外, 600 nm 的钝化层对入射光增透, 可以提高探测器的信噪比.

## 2 光电参数表征

### 2.1 3dB 带宽

采用 8703A 光波元件分析仪在 5 V 偏压下对器件的频率响应测试, 测得器件的 3dB 带宽为 6.8 GHz, 如图 3.

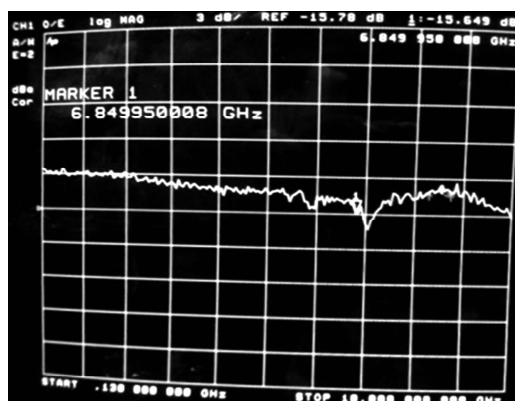


图 3 3dB 带宽测试  
Fig. 3 The 3dB bandwidth

### 2.2 脉冲响应

用示波器在 5 V 偏压下对器件进行脉冲响应测试 (1550 nm), 如图 4.

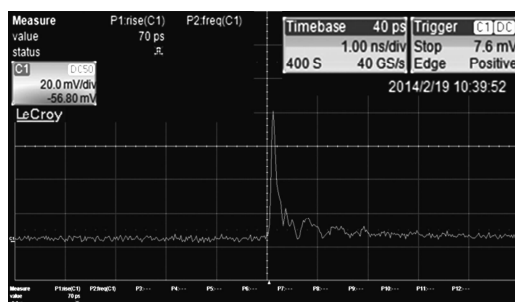


图 4 脉冲响应测试  
Fig. 4 The impulse response

测得上升沿 (10%-90%) 为 70 ps, 此上升沿除器件自身响应时间外, 还包括示波器和电路板响应时间以及脉冲上升沿. 上升沿不仅可以表征器件的响应速

度,还可以通过经验公式表征 3dB 带宽,通常两者的关系为

$$f_{3dB带宽} = \frac{0.35}{t_{上升沿时间}} \quad (1)$$

示波器响应时间 14 ps(测试带宽 25 GHz),电路板脉宽 35 ps(设计带宽 10 GHz),脉冲上升沿 5ps,计算得器件的上升沿 58.8 ps,此时其 3dB 带宽计算为 6.0 GHz,与 8703A 光波元件分析仪测试结果符合.

### 2.3 响应度和量子效率

采用对比测试的方法,依据《JJF 1150-2006 光电探测器相对光谱响应度校准规范》,分别对 Judson 公司生产的 J22-18I-R75U 探测器与 MSM 样品探测器进行测试,测得 1550 nm 波段器件的响应度为 0.55 A/W,光吸收区域外量子效率约为 88%,而不含势垒增强层光吸收区域的外量子效率约为 89%~90%,可见本文设计的肖特基势垒增强层未对载流子的产生有明显的抑制作用.

### 2.4 暗电流

依据《SJ 2354.3-1983 PIN、雪崩光电二极管暗电流的测试方法》测得器件的暗电流如图 5 所示.

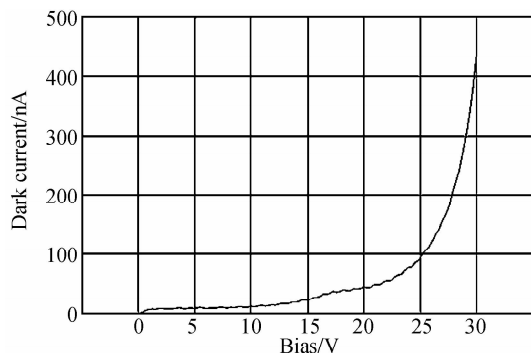


图 5 0~30 V 偏置暗电流  
Fig. 5 I-V curve at bias at 0~30 V

器件击穿电压 20 V 左右,通过公式  $V_{FB} = \frac{qN_d}{2\epsilon_s} L^2$

计算得器件的平带电压  $V_{FB}$  为 3.5 V,式中  $L$  为电极指间距,  $N_d$  为响应层掺杂浓度. 选择 5 V 偏置作为器件的工作电压,此时暗电流密度为 0.6 pA/ $\mu\text{m}^2$ ,相比目前同类器件,暗电流密度降低了两个数量级.

## 3 暗电流特性分析

MSM 结构易制成大面积器件,但暗电流特性较差,且大的光敏面会使得器件制备过程更容易引入缺陷和杂质,使得外延材料的质量变差,同时表面会吸附更多带电粒子,这些都会导致大面积探测器的暗电流密度增大. 为了降低 InGaAs-MSM 探测器的暗电流密度,本文设计了  $\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  短周期超晶格和  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  肖特基势垒增强结构的探测器.

### 3.1 InAlGaAs/InGaAs SPSL 的抑制作用

探测器外延结构中设计  $(\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As})_n$  短周期超晶格 (SPSL, InAlGaAs 5 nm, InGaAs 5 nm,  $n=30$ ),与未引入超晶格的器件对比,显示超晶格的引入大大降低了器件的暗电流,如图 6.

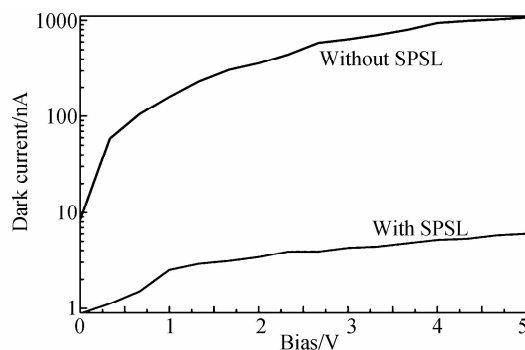


图 6 短周期超晶格的影响  
Fig. 6 Effects of short period superlattices

对比两种器件的暗电流,短周期超晶格的引入使得暗电流密度降低两个数量级,提高了器件的信噪比. 对于 InAlGaAs/InGaAs 短周期超晶格而言,其垒层厚度较薄,阱中量子化的孤立能级将相互耦合而形成微带<sup>[7]</sup>,即具有一定能量范围的能带. 这种展宽的周期性能带结构可以减小外延各层材料由于晶格失配引起的失配位错以及异质界面的电荷堆积和能带尖峰问题,还可以减少器件的非辐射复合中心,提高外延材料的质量,有效提高器件的信噪比<sup>[8-9]</sup>.

### 3.2 InAlAs 肖特基势垒增强层的作用

外延中设计不同结构的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  材料作为肖特基势垒增强层(30 nm 和 80 nm),通过与未使用势垒增强层的探测器比较,结果显示 InAlAs 的引入降低了 InGaAs-MSM 探测器的暗电流.

探测器正常工作时反偏结势垒高度是影响热电子发射电流的主要因素<sup>[10]</sup>,为了获得较低的暗电流,一般选择势垒较高的材料或势垒增强层<sup>[11]</sup>. 通过对比晶格匹配型材料 InGaAs 和 InAlAs 的禁带宽度

(InGaAs 为 0.2 eV, InAlAs 为 1.47 eV)<sup>[12-13]</sup>,本文设计了  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  结构作为势垒增强层,并对器件暗电流进行测试比较,如图 7 所示.

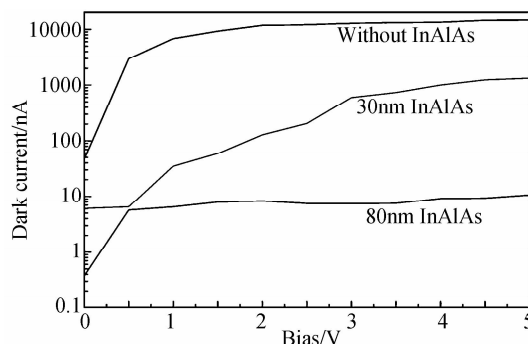


图 7 肖特基势垒增强层的影响  
Fig. 7 Effects of Schottky barrier enhancement

运用热电子发射模型,没有势垒增强层的 MSM-PD 正常工作时的暗电流密度为<sup>[14]</sup>

$$J = J_{ns} e^{\beta\varphi_1} + J_{ps} e^{\beta\varphi_2} \quad (2)$$

式中  $J_{ns}$  和  $J_{ps}$  分别为饱和电子电流和空穴电流;  $\beta = q/kT$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$  分别为偏压  $V$  下器件两肖特基结的势垒降低,即

$$\Delta\varphi_1 = \sqrt{\frac{q(V+V_{FB})}{4\pi\epsilon}}, \Delta\varphi_2 = \sqrt{\frac{q(V-V_{FB})}{4\pi\epsilon}}$$

具有势垒增强层的 MSM-PD 正常工作时暗电流密度为<sup>[15]</sup>

$$J = J_{ns} e^{\beta\varphi_1} \exp\left[-\beta\left(a\sqrt{\frac{qN_a}{2\epsilon}} - \frac{V+V_{FB}}{C_{on}}\sqrt{\frac{N_d}{N_a+N_d}}\right)^2\right] + J_{ps} e^{\beta\varphi_2} \exp\left[-\beta\left(a\sqrt{\frac{qN_a}{2\epsilon}} + \frac{V-V_{FB}}{C_{on}}\sqrt{\frac{N_d}{N_a+N_d}}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中,  $a$  为势垒增强层厚度,  $N_a$  为其掺杂浓度;  $N_d$  为有源层掺杂浓度;  $C_{on}$ ,  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$  分别为

$$C_{on} = L \sqrt{\frac{2qN_d N_a + N_d}{\epsilon}} + \left(\frac{2N_a}{N_d} a - L\right) \sqrt{\frac{2qN_d N_d}{\epsilon}} \sqrt{\frac{N_d}{N_a + N_d}}$$

$$\Delta\varphi_1 = \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon}} \left(\frac{2qN_a}{\epsilon}\right)^{1/4} \left(a\sqrt{\frac{qN_a}{2\epsilon}} - \sqrt{\frac{N_d}{N_a+N_d}} \frac{V+V_{FB}}{C_{on}}\right)^{1/2}$$

$$\Delta\varphi_2 = \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon}} \left(\frac{2qN_a}{\epsilon}\right)^{1/4} \left(a\sqrt{\frac{qN_a}{2\epsilon}} + \sqrt{\frac{N_d}{N_a+N_d}} \frac{V-V_{FB}}{C_{on}}\right)^{1/2}$$

肖特基势垒增强层的引入使得器件的暗电流密度  $J$  降低,此时暗电流密度和肖特基势垒增强层的厚度  $a$  及掺杂浓度  $N_a$  关系密切。

因此本文设计了不同厚度的 InAlAs 势垒增强层,通过对比,80 nm InAlAs 的探测器暗电流特性具有明显优势,30 nm InAlAs 的探测器暗电流特性次之,没有势垒增强层的探测器暗电流则较大。

MSM-PD 的有效势垒高度随着势垒增强层厚度  $a$  的增大而增大,因此过薄的 InAlAs 层势垒增强效果不明显,同时容易发生隧穿效应;当 InAlAs 层过厚时,平衡条件下的金属-半导体自建电势不能把自由电子完全耗尽,此时有效势垒高度将由其金-半结决定,再增厚增强层反而会影响器件的响应速度.实验发现小于 10 nm 的增强层可能发生隧穿效应,80 nm 的势垒增强层效果可能达到极限。

## 4 结论

本文通过分析短周期超晶格和肖特基势垒增强结构对暗电流的抑制机理,设计了  $\text{In}_{0.523}\text{Al}_{0.477}\text{GaAs}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$  短周期超晶格和  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  肖特基势垒增强结构,研制了大面积 ( $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ) InGaAs-MSM 光电探测器:3dB 带宽 6.8 GHz,上升沿 58.8 ps (10%-90%),1550 nm 波段响应度 0.55 A/W,光吸收

区域外量子效率 88%。通过外延设计将暗电流密度降至 0.6 pA/ $\mu\text{m}^2$  (5 V),提高了器件的信噪比,对于 MSM-PD 的实用化有重要意义。

## 参考文献

- [1] YU Yi-chuan, ZOU Yong-zhuo, HE Jian-jun, *et al.* Analysis and optimization of MSM-PD's characteristics using a two dimensional numerical method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 347-351.  
于弋川, 邹勇卓, 何建军, 等. MSM 光探测器瞬态特性的二维分析及优化设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(3): 347-351.
- [2] ZHONG Shu-quan, HUANG Yong-qing, WANG Qi, *et al.* Process conditions optimization and compound semiconductor materials growth for InP-based optoelectronic devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Supplement): 41-45.  
钟树泉, 黄永清, 王琦, 等. InP 基光电器件的外延工艺优化与材料生长[J]. 光子学报, 2008, **37**(增刊): 41-45.
- [3] ZHU Ya-qi, CHEN Zhi-ming, LU Shu-long, *et al.* Characterization of the lattice mismatched  $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$  material grown on InP substrate by MOCVD [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(2): 118-121.  
朱亚旗, 陈治明, 陆书龙, 等. 基于 InP 衬底的晶格失配  $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$  的 MOCVD 生长及其特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(2): 118-121.
- [4] FANG X, GU Y, CHEN X Y, *et al.* InP-based  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  metamorphic buffers with different mismatched grading rates [J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, **34**(7): 073005-1-4.
- [5] LIN S D, LEE C P. Hole Schottky barrier height enhancement and its application to metal - semiconductor - metal photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(11): 5666-5669.
- [6] YUAN Yuan-lin, YAO Chang-sheng, WANG Guo, *et al.* The influence of  $\text{SiO}_2$  layer passivation on the leakage current of GaN-based PIN radiation detectors [J]. *Research & Progress of Solid State Electronics*, 2012, **32**(2): 110-114.  
袁愿林, 姚昌胜, 王果, 等.  $\text{SiO}_2$  钝化层对 GaN 基 PIN 结构核探测器漏电流的影响[J]. 固体电子学研究与进展, 2012, **32**(2): 110-114.
- [7] WANG Hai-xiao, ZHENG Xin-he, WEN Yu, *et al.* The design of 1 eV band-gap of GaNAs/InGaAs short-period superlattice solar cell [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, **43**(8): 930-935.  
王海啸, 郑新和, 文瑜, 等. 1 eV 带隙 GaNAs/InGaAs 短周期超晶格太阳能电池的设计[J]. 中国科学:物理学,力学和天文学, 2013, **43**(8): 930-935.
- [8] WANG Kai, ZHANG Yong-gang, GU Yi, *et al.* Improving the performance of extended wavelength InGaAs photodetectors by using digital graded hetero interfaces superlattice [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(6): 405-409.  
王凯, 张永刚, 顾溢, 等. 异质界面数字梯度超晶格对扩展波长 InGaAs 光电探测器性能的改善[J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(6): 405-409.
- [9] ZHOU Yi, CHEN Jian-xin, XU Qing-qing, *et al.* Long wavelength infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(3): 210-213.  
周易, 陈建新, 徐庆庆, 等. 长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(3): 210-213.
- [10] 洪霞, 硅基锗金属-半导体-金属光电探测器的性能优化与设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [11] CHEN Y P, YUKI I, OSAMU I, *et al.* Waveguide InGaAs

- photodetector with Schottky barrier enhancement layer on III-V CMOS photonics [C]. Indium Phosphide and Related Materials, 26th International Conference on, 2014: 1-2.
- [12] ZHANG Yong-gang, SHAN Hong-kun, ZHOU Ping, *et al.* InGaAs MSM photodetectors with InP: Fe barrier enhancement layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(3): 223-225.  
张永刚, 单宏坤, 周平, 等. 掺铁 InP 肖特基势垒增强 InGaAs MSM 光电探测器[J]. 光子学报, 1995, **24**(3): 223-225.
- [13] JOOST B, GUNTHER R, DRIES V T. Photo-spectrometer based on the integration of InP/InGaAs photodetectors onto a Silicon-on-insulator etched diffraction grating [C]. 6th UGent-FirW PhD symposium, 2005, **24**:1-2.
- [14] 杨瑾, InGaAs-MSM 半导体红外探测器阵列研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2011.
- [15] TAN Hua, SHI Chang-xin, WANG Sen-zhang. Theoretical calculation of the dark current in MSM-PD with a barrier-enhancement layer [J]. *Research & Progress of Solid State Electronics*, 1998, **18**: 176-180.  
覃化, 史常忻, 王森章. 具有势垒增强层的 MSM 光电探测器暗电流的计算[J]. 固体电子学研究进展, 1998, **18**: 176-180.