

doi:10.3788/gzxb20184703.0304002

In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 雪崩光电二极管响应及电学特性

袁正兵^{1,2}, 肖清泉¹, 杨文献², 肖梦², 吴渊渊², 谭明², 代盼², 李雪飞², 谢泉¹, 陆书龙²

(1 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

(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)

摘 要:通过分子束外延生长和开管式 Zn 扩散方法, 制备了低暗电流、宽响应范围的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 雪崩光电二极管. 在 0.95 倍雪崩击穿电压下, 器件暗电流小于 10 nA; -5 V 偏压下电容密度低至 1.43×10^{-8} F/cm². 在 1 310 nm 红外光照及 30 V 反向偏置电压下, 雪崩光电二极管器件的响应范围为 50 nW ~ 20 mW, 响应度达到 1.13 A/W. 得到了电荷层掺杂浓度、倍增区厚度结构参数与击穿电压和贯穿电压的关系: 随着电荷层电荷密度的增加, 器件贯穿电压线性增加, 而击穿电压线性降低; 电荷层电荷面密度为 4.8×10^{12} cm⁻² 时, 随着倍增层厚度的增加, 贯穿电压线性增加, 击穿电压增加. 通过对器件结构优化, 雪崩光电二极管探测器实现 25 V 的贯穿电压和 57 V 的击穿电压, 且具有低暗电流和宽响应范围等特性.

关键词:雪崩光电二极管; 低暗电流; 宽响应范围; 分子束外延; Zn 扩散

中图分类号: TN364

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0304002-6

Response and Electrical Characteristics of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Avalanche Photodiode

YUAN Zheng-bing^{1,2}, XIAO Qing-quan¹, YANG Wen-xian², XIAO Meng², WU Yuan-yuan²,
TAN Ming², DAI Pan², LI Xue-fei², XIE Quan¹, LU Shu-long²

(1 College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, 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)

Abstract: In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Avalanche Photodiode (APD) with low dark current, wide-range response is prepared by molecular beam epitaxy and open-tube zinc diffusion method. The dark current is less than 10 nA at $0.95V_b$ (V_b is the avalanche breakdown voltage), and the capacitance density is as low as 1.43×10^{-8} F/cm² when the bias voltage is -5 V. The response range of APD is 50 nW ~ 20 mW and the responsibility is up to 1.13 A/W under 1 310 nm infrared laser at 30 V reverse bias voltage. The breakdown voltage and punch-through voltage are investigated by changing concentration of the charge layer and thickness of the multiplication layer. The result shows that the punch-through voltage increases linearly, conversely, the breakdown voltage decreases linearly with increasing concentration of the charge layer. Further, the punch-through voltage increases linearly and breakdown voltage also increases with increasing thickness of the multiplication layer, while the surface density of charge layer is 4.8×10^{12} cm⁻². Through optimizing SAGCM-APD device structure, the APD device achieves a 25 V punch-through voltage and a 57 V breakdown voltage, with low dark current, and wide-range response

基金项目:江苏省科技支撑计划(No.BE2016085), 中国科学院重点前沿科学研究项目(No.QYZDB-SSW-JSC014)资助

第一作者:袁正兵(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体光电器件. Email: zbyuan2016@sinano.ac.cn

导师(通讯作者):肖清泉(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体材料与器件. Email: qqxiao@gzu.edu.cn

陆书龙(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为半导体材料与器件. Email: sllu2008@sinano.ac.cn

收稿日期:2017-08-31; **录用日期:**2017-11-22

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

characteristics.

Key words: Avalanche photodiode; Low dark current; Wide-range response; Molecular beam epitaxy; Zn diffusion

OCIS Codes: 040.1345; 040.0040; 040.5160; 040.3060; 250.1345

0 引言

随着光电技术的发展,高频率、低噪声和高灵敏度的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)越来越多地被应用于高比特率、长距离传输的光纤通信系统^[1-3].硅雪崩光电二极管^[4-5]由于材料自身的局限性,不适用于光纤通信.相比较之下,In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP吸收、渐变、电荷、倍增(Separate Absorption, Grading, Charge and Multiplication, SAGCM)结构的APD探测器^[6-8],其组成材料In_{0.53}Ga_{0.47}As禁带宽度为0.75 eV,在波长为1~1.7 μm范围内吸收系数达到10⁴ cm⁻¹,适用于1 310 nm/1 550 nm红外通信波段.带系可调的四元化合物InGaAsP材料作为过渡层,可减小InGaAs吸收层和InP倍增层之间的带阶差.In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP SAGCM-APD探测器逐渐应用于光纤通信、激光测距^[9]、APD阵列^[10]等领域.

SAGCM-APD探测器工作区域处于线性模式和盖革模式两种状态^[11].在线性模式下,载流子在电场作用下碰撞产生空穴、电子对数量相对较少,使得器件需要通过较长的积分时间换取较高的信噪比^[12].在盖革模式下,由于载流子在高电场下产生雪崩碰撞的自持性行为,器件需要采取外围抑制电路来扑灭和产生雪崩效应.SAGCM-APD探测器结构中的电荷层,可以调节器件倍增区和吸收区的电场分布,使得器件贯穿电压和击穿电压随之改变.另外,倍增区厚度变化对器件性能影响较大.电荷层电荷密度较大时,较高的贯穿电压和较低的击穿电压使得APD探测器工作线性区域较窄;相反地,过高的击穿电压与贯穿电压会使得外围偏置电路设计难度增大,系统噪声增加^[13].为提高APD探测器性能和使用效率,可对器件线性区域的大小进行合理优化.

本文采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长技术及开管式锌(Zinc, Zn)扩散方法,制备了In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP SAGCM-APD探测器.同时,研究了器件暗电流大小和光信号探测响应范围,以及电荷层掺杂浓度、倍增区厚度与器件击穿电压和贯穿电压之间的关系.

1 实验

通过MBE生长技术,制备的In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD探测器采用SAGCM结构,如图1.在N型高掺杂InP衬底上生长500 nm高掺杂(1×10^{18} cm⁻³)N型InP缓冲层,2 μm本征In_{0.53}Ga_{0.47}As作为吸收层.厚度分别为40 nm的三层InGaAsP作为过渡层,降低In_{0.53}Ga_{0.47}As吸收层与InP倍增层之间带阶不连续性,减少空穴在InP/InGaAs界面处积累,以便空穴快速穿过过渡层,从而提高器件性能.不同样品InP电荷层掺杂浓度分别为 8×10^{16} cm⁻³和 1.2×10^{17} cm⁻³,以调节倍增区和吸收区电场分布.InP倍增层和接触层采用开管式Zn扩散方式形成.双保护环设计可防止器件高偏置反向工作电压下产生边缘击穿现象.其中100 nm重掺杂P-InGaAs作为接触层.

Zn扩散过程是在扩散炉中实施,以Zn₃P₂作为扩散源,通过600 °C高温扩散,实现弱N型InP帽

层向P型InP反型,完成P-I-N平面型外延层的制备;其次,采用等离子体增强化学气相沉积方法在APD器件表面沉积180 nm Si₃N₄增透膜,以增强器件表面入射光透射率;最后,通过电子束蒸发的方法在APD器件上下表面分别制备Ti/Pt/Au金属层,经快速退火处理后完成正面电极和背面电极的制备,最终实现APD

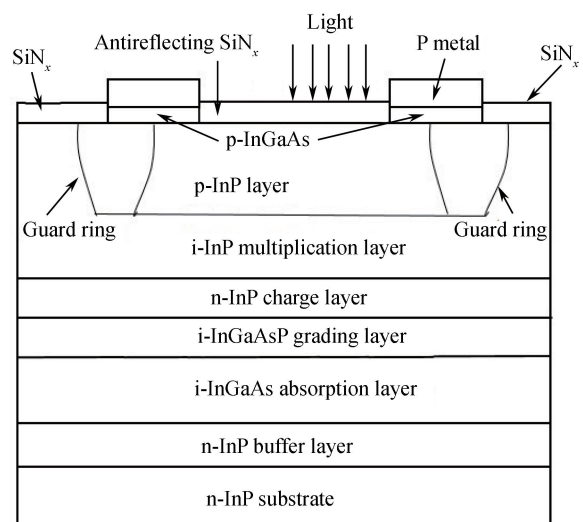


图1 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD结构剖面图

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

器件的制备.

采用二次离子质谱(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS;型号:Hidden EQS)测试样品 Zn 扩散深度,以确定 InP 倍增区不同厚度;采用高精度探针台(型号:4200C-SCS)测试器件暗电流、光电流特性和 C-V 特性;采用自组装光照响应系统测试器件响应特性.

2 结果与讨论

2.1 Zn 扩散比较

使用 Zn₃P₂ 进行开管扩散,形成 PN 结和保护环.Zn₃P₂ 中的 P 元素可抑制 InP 材料在高温下分解^[14].样品掺杂浓度和扩散深度通过 SIMS 方法测量,如图 2,样品在温度 600 °C 扩散 16 min, SIMS 测得掺杂浓度为 2.08×10^{19} 至 1×10^{15} 缓变,扩散厚度为 2.5 μm ,对应倍增区宽度为 1 μm , Zn 扩散速率为 0.17 $\mu\text{m}/\text{min}$.另外,相同条件扩散 13 min、17 min 所对应的扩散深度分别为 2 μm 、2.67 μm ,对应倍增区宽度分别约为 1.5 μm 、0.83 μm .倍增区厚度的变化对器件贯穿电压和击穿电压影响明显,合理设计器件倍增区厚度可提高器件性能.

2.2 I-V/C-V 特性分析

图 3 为 InP 电荷层电荷面密度 D_c 为 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 SAGCM-APD 探测器 I-V 特性.横坐标为器件反向偏置电压,左纵坐标为器件产生电流,右纵坐标为器件增益.器件贯穿电压为 25~27 V,击穿电压为 57 V.贯穿电压存在一定的“延时”现象,这表明,In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层产生的载流子,在电场作用下并未完全穿过 InGaAsP 过渡层和 InP 电荷控制层“壁垒层”,此时吸收层处于未完全耗尽状态.当反向偏置电压低于器件贯穿电压时,吸收层产生电子空穴对数量较少,空穴在低电场下,无法越过壁垒层达到 InP 倍增区.电压上升到 26 V 左右,器件光电流出现一个明显的台阶,表明此时器件为贯穿状态.偏置电压进一步增加(小于击穿电压 V_b),器件工作在线性模式.当偏置电压达到 57 V 后,电流急剧增加,器件达到雪崩击穿状态(定义电流达到 $10 \mu\text{A}$,为雪崩击穿 V_b ^[15]),大量空穴参与雪崩碰撞,此时器件工作在盖革模式状态.从图 3 可知,器件暗电流(定义电流低于 $0.95V_b$ 时的取值^[15])小于 10 nA;与 Smetona 等^[16]采用 MOCVD 外延技术制备的 APD 探测器相比较,该器件暗电流相对较低.器件增益 M (小于贯穿电压 V_p 时)值为 1~2;在线性模式下,器件增益 M 从 1.5 增加到 20.实际工作中,要求器件工作在线性模式下,增益 M 越大越好,不过较大的增益带来的器件噪声也大,一定程度上又降低了器件的性能.

在高量子效率情况下,为提高 APD 探测器响应速度,可通过降低器件电容的方法实现.因此,设计台面直径分别为 50 μm 、70 μm 、150 μm 三种不同的 SAGCM-APD 探测器.测得器件 C-V 特性曲线,如图 4.随着反向偏置电压从 5 V 减小到 0 V,器件电容逐渐增加.在偏置电压 -5 V 时,测得台面直径 50 μm 、70 μm 、150 μm 的器件电容分别为 1.56 pF、2.01 pF、3.87 pF.器件台面直径与电容关系如图 4 中插图所示,随着台面直径的增加,器件电容线性增加,电容密度约为 $1.43 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{cm}^2$.

2.3 响应特性分析

采用自组装光照响应测试系统,在温度为 25 °C、波长为 1310 nm 的红外单色光照下进行 APD 探测器

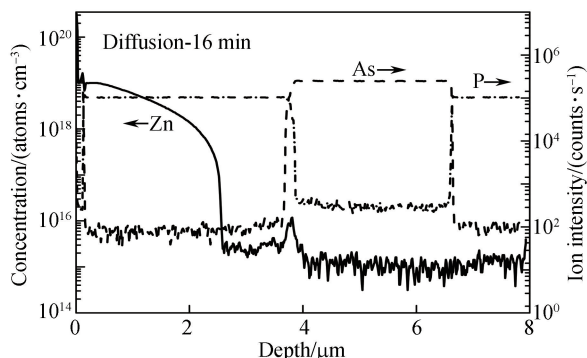


图 2 SIMS 测试 Zn 扩散浓度分布
Fig.2 SIMS profiles of the Zn diffusion concentration

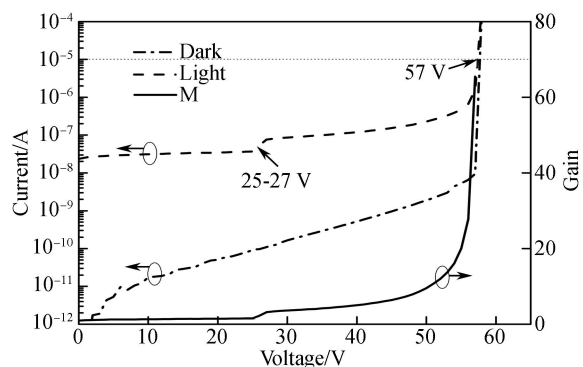


图 3 APD 器件 I-V 特性
Fig.3 Current-voltage characteristics of the APD device

响应特性研究.选取 InP 电荷层电荷密度 D_c 为 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, InP 倍增层厚度为 $1 \mu\text{m}$ 以及台面直径为 $150 \mu\text{m}$ 的 SAGCM-APD 探测器,测得器件响应特性结果,如图 5.激光功率从 50 nW 增加至 20 mW ,器件反向偏置电压从 30 V 增加至 40 V (器件处于线性工作模式区域).测得器件响应度从 1.13 A/W 增加至 1.68 A/W .在 30 V 偏压下,激光功率大于 10 mW 后,电流缓慢增加至饱和状态,器件响应逐渐降低(激光功率为 20 mW ,响应度降低至 0.5 A/W),此时,器件产生、复合载流子逐渐达到平衡状态.在低偏压下,载流子产生雪崩碰撞的概率较低,电子空穴离化率比值 K 较小,从而导致雪崩倍增因子 M 较小^[17].随着偏压增加至 40 V ,载流子在高电场下参与雪崩碰撞过程的概率增加,产生载流子数量增加,器件电流增大,使得器件响应度增加;另外,随着激光功率的增加,在高电场、高功率状态下,载流子产生雪崩效应的几率更大,电子空穴离化比值 K 的增加,使得倍增因子 M 增大^[17].当偏置电压低于器件贯穿电压($V < V_p$)时,如图 5 中插图所示,偏置电压分别为 10 V 和 20 V .激光功率增加到 50 mW ,器件产生电流仅达到 $1.5 \mu\text{A}$,器件响应很微弱.这是由于 SAGCM 结构的 APD 探测器中 InP 电荷层、InGaAsP 过渡层的存在,使得载流子在低电场情况下无法越过“壁垒层”到达较高电场的 InP 倍增区域,此时,载流子产生数量很少,器件电流很低.在激光功率 50 nW 微弱信号下,测得器件产生的电流,与较大功率激光下产生的电流比较,呈现良好的线性关系,这表明在小信号下,器件响应较好.测试结果表明,APD 器件具有较宽范围($50 \text{ nW} \sim 20 \text{ mW}$)和较高响应度($1.13 \sim 1.68 \text{ A/W}$)的响应特性.

2.4 贯穿电压-击穿电压关系

图 6 为 InP 电荷层电荷面密度 D_c 对器件贯穿电压和击穿电压的影响.电荷面密度为 $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,器件贯穿电压为 $15 \sim 17 \text{ V}$,击穿电压为 63 V ,电荷面密度增加至 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,器件贯穿电压为 $25 \sim 27 \text{ V}$,击穿电压为 57 V .贯穿电压变化率为 $6.25 \text{ V}/1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,击穿电压变化率为 $4.38 \text{ V}/1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,贯穿电压比击穿电压变化明显.随着 InP 电荷层电荷密度增加,器件贯穿电压线性增加,击穿电压减小.电荷面密度为 $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,在较低反向偏压下,电流曲线产生两个“台阶”,器件在小偏压下出现“贯穿”假象.这可能是电荷层电荷密度较低导致吸收层的电场较高,高电场情况下,吸收层产生隧穿电流,从而使得器件电流“漏电”增大^[18].在雪崩击穿附近,器件电流曲线上升较缓,说明吸收区产生载流子越过“壁垒层”后参与碰撞的载流子数量较少,这可能是工艺原因导致.

如图 7,当 InP 电荷层电荷面密度为 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,Zn 扩散时间分别为 13 min 、 16 min 、 17 min ,对应 InP 倍增区宽度分别为 $0.83 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$,器件贯穿电压从 20.2 V 增加至 37 V ,击穿电压从 55.3 V 增加至 61 V ,贯穿电压变化率为 $24.3 \text{ V}/1 \mu\text{m}$,击穿电压变化率为 $8.6 \text{ V}/1 \mu\text{m}$.器件贯穿电压变化率高于击穿电压变化率.随着倍增区厚度增加,器件贯穿电压线性增加,击穿电压也增加,表现出正相关特性^[19].对于倍增层的设计,可适当增加倍增区厚度,减小器件雪崩效应“死空间”^[20]的产生,同时载流子雪崩碰撞过程增加,从而增大了雪崩碰撞的概率,使得器件的倍增因子 M 增加.采用 InP 电荷层掺杂电荷面密度为 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,InP 倍增区厚度为 $1 \mu\text{m}$ (扩散 16 min),所得器件贯穿电压为 25 V ,击穿电压为 57 V .

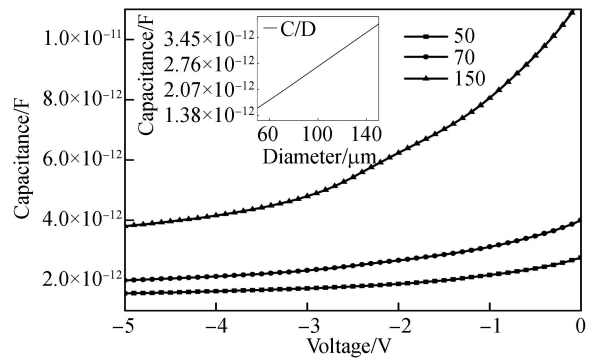


图 4 APD 器件 C-V 特性,插图为台面直径和电容关系
Fig.4 Capacitance as a function of reverse voltage bias of the APD device. The inset shows the correlation of the capacitance and the mesa diameter

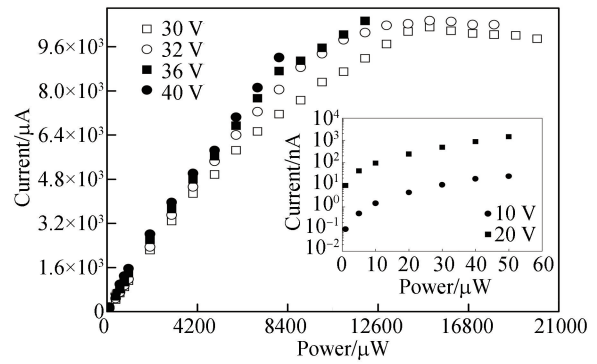


图 5 APD 器件响应特性,插图为低偏压下器件响应特性
Fig.5 Response characteristics of the APD device. The inset shows response characteristics of the device at low bias voltage

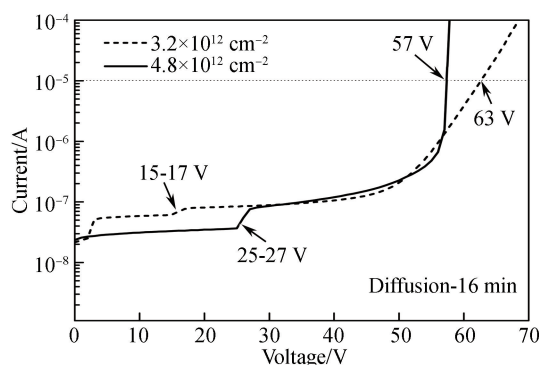


图6 InP电荷层掺杂I-V特性

Fig. 6 Current-voltage characteristics of the InP charge layer doping

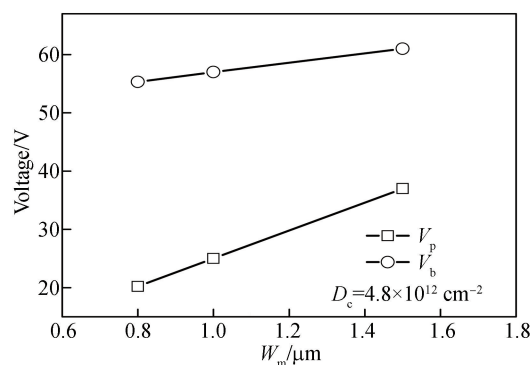


图7 InP倍增区厚度与击穿电压和贯穿电压的关系

Fig. 7 Breakdown voltage and punch-through voltage dependence on the InP multiplication layer thicknesses

3 结论

本文采用分子束外延生长和开管式 Zn 扩散方法,制备了 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP SAGCM-APD 探测器,并且研究了电荷层掺杂浓度、倍增区厚度对器件击穿电压和贯穿电压的影响.随着 InP 电荷层电荷面密度从 $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 增加至 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,器件贯穿电压线性增加,其变化率为 $6.25 \text{ V}/1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,击穿电压线性降低,其变化率为 $4.38 \text{ V}/1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.InP 电荷层电荷面密度为 $4.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,通过不同时间 Zn 扩散,倍增区宽度分别为 $0.83 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$.随着倍增区厚度增加,器件贯穿电压线性增加,其变化率为 $24.3 \text{ V}/1 \mu\text{m}$;击穿电压也增加,其变化率为 $8.6 \text{ V}/1 \mu\text{m}$.通过对电荷层和倍增层的优化,实现器件暗电流小于 10 nA ,电容密度低至 $1.43 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{cm}^2$,且器件贯穿电压、击穿电压分别为 25 V 、 57 V .另外,在 1310 nm 红外光照射下,器件反向偏置电压从 30 V 增加至 40 V ,激光功率从 50 nW 增加至 20 mW ,测得器件响应度从 $1.13 \text{ A}/\text{W}$ 增加至 $1.68 \text{ A}/\text{W}$.优化后的 APD 器件具有低暗电流和宽响应范围等特性.

参考文献

- [1] NADA M, NAKAMURA M, MATSUZAKI H. 25-Gbit/s burst-mode optical receiver using high-speed avalanche photodiode for 100-Gbit/s optical packet switching[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 443-449.
- [2] GNAUCK A H, VEEN D T V, IANNONE P, 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.
- [3] BRANDL P, ENNE R, JUKIC T, et al. OWC using a fully integrated optical receiver with large-diameter APD[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(5): 482-485.
- [4] WANG Wei, CHEN Ting, LI Jun-feng, et al. The research of high photon detection efficiency CMOS single photon avalanche diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8): 0823001.
王巍,陈婷,李俊峰,等.高光电探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件[J]. *光子学报*, 2017, **46**(8): 0823001.
- [5] WANG Wei, BAO Xiao-yuan, CHEN Li, et al. A CMOS single photon avalanche diode device with high photon detection efficiency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **45**(8): 0823001.
王巍,鲍孝圆,陈丽,等.高探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件[J]. *光子学报*, 2017, **45**(8): 0823001.
- [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**(5): 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] ITZLER M A, PATEL K, JIANG X, et al. Geiger-mode APD camera system for single-photon 3D LADAR imaging[J]. *Advanced Photon Counting Techniques VI*, 2012, **8375**: 83750D.
- [10] CLARK W R, DAVIS A, ROLAND M, et al. $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As avalanche photodiode array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **18**(1): 19-21.
- [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] GURP G J V, DONGEN T V, 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]. *Lasers & Electro-optics*, 2000, **41**(2): 138-139.
- [16] SMETONA S, MATUKAS J, PALENSKIS V, *et al.* Low-frequency noise, reliability, and quality of high-speed avalanche breakdown detectors[C]. SPIE, 2004, **5577**: 834-842.
- [17] HAYAT M M, SARGEANT W L, SALEH B E A. Effect of dead space on gain and noise in Si and GaAs avalanche photodiodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(5): 1360-1365.
- [18] ZENG Qiao-yu. Fabrication and study of InGaAs/InP single photo avalanche photodiodes (APDs) [D]. Shanghai: Shanghai institute of technical physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 37-38.
曾巧玉. InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管的制备及研究[D]. 上海:中科院上海技术物理研究所, 2014:37-38.
- [19] PARK K, KANG S, *et al.* Effect of multiplication layer width on breakdown voltage in InP/InGaAs avalanche photodiode[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(25): 3789-3791.
- [20] MCINTYRE R J. A new look at impact ionization-Part I: A theory of gain, noise, breakdown probability, and frequency response[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, **46**(8): 1623-1631.