



适用400 Gbit/s接收系统的铟磷基低暗电流高带宽倏逝波耦合光电探测器阵列

陆子晴 韩勤 叶焱 王帅 肖峰 肖帆

Low dark current and high bandwidth evanescent wave coupled PIN photodetector array for 400Gbit/s receiving system

Lu Zi-Qing Han Qin Ye Han Wang Shuai Xiao Feng Xiao Fan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 208501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210781

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210781>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高性能SOI基GePIN波导光电探测器的制备及特性研究

Fabrication and characteristics of high performance SOI-based Ge PIN waveguide photodetector

物理学报. 2017, 66(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198502>

光纤倏逝波型石英增强光声光谱技术

Fiber evanescent wave quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

物理学报. 2018, 67(2): 020701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171881>

超薄介质插层调制的氧化铟锡/锗肖特基光电探测器

Indium tin oxid/germanium Schottky photodetectors modulated by ultra-thin dielectric intercalation

物理学报. 2021, 70(17): 178506 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210138>

基于选区外延技术的单片集成阵列波导光栅与单载流子探测器的端对接设计

Butt-joint design in a uni-traveling carrier photodiode array monolithic with an arrayed waveguide grating by the selective area growth technique

物理学报. 2017, 66(15): 158502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.158502>

高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

低维半导体偏振光探测器研究进展

Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based on low-dimensional semiconductors

物理学报. 2019, 68(16): 163201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002>

适用 400 Gbit/s 接收系统的铟磷基低暗电流 高带宽倏逝波耦合光电探测器阵列*

陆子晴¹⁾²⁾ 韩勤^{1)2)3)†} 叶焱¹⁾²⁾ 王帅¹⁾²⁾ 肖峰¹⁾²⁾ 肖帆¹⁾²⁾

1) (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)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学电子电器与通信工程学院, 北京 100049)

(2021 年 4 月 23 日收到; 2021 年 5 月 26 日收到修改稿)

相较于面入射型和边入射型光电探测器, 倏逝波耦合型光电探测器 (evanescent coupling photodetector, ECPD) 能够同时具备高带宽和高量子效率, 因此在高速光通信领域有着广泛的应用前景. ECPD 由稀释波导、单模脊波导和 PIN 光电二极管组成, 通过倏逝波定向耦合提高光纤入射光到探测器吸收芯层的耦合效率. 本文详细介绍了一种铟磷基 ECPD 阵列的结构设计、实验制备和测试结果. 测试结果表明, 制备的 ECPD 暗电流较低, 在 -3 和 0 V 外加偏压下探测器暗电流低至 215 和 1.23 pA. 在有源区面积为 $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的情况下, 器件仍能有较高响应度, 为 0.5 A/W (无增透膜). 对探测器进行高频性能测试, 探测器阵列的所有探测器带宽均超过 25 GHz, 总带宽 400 GHz, 可以集成任意光学器件.

关键词: 倏逝波耦合, PIN 探测器阵列, 低暗电流, 400 GHz

PACS: 85.60.Gz, 73.40.Kp, 81.15.Hi

DOI: 10.7498/aps.70.20210781

1 引言

据统计, 光通信网络需求年均增长约 40%, 各种高数据流量需求应用层出不穷, 这就对通信技术的突破提出了更多要求. 过去几年, 得益于光子集成技术的不断发展, 在 COMS 电路上实现有源、无源光器件的光电子集成化技术日益成熟, 已成为应对未来高带宽需求最有前景的解决方案^[1-3]. 随着波分复用技术 (wavelength division multiplexing, WDM)^[4-6] 的不断发展, 高集成度高带宽的光电探测器引起了广泛关注.

光互连中光子集成 (photonic integrated circuit, PIC)^[7,8] 技术通过同质或异质集成实现在同一衬底

上集成多种不同功能的光电子器件, 从而减少了不必要的封装对准并减少芯片损耗. PIC 技术有望成为下一代最具潜力的光互连技术^[9-11]. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ PIN 光电探测器因为具有良好的载流子传输特性和较宽的吸收谱范围 (1.0—1.7 μm), 引起了国内外学者的广泛重视. 其可以与 InP 系材料排列组合, 根据需求改变组分浓度而仍然保持晶格匹配, 使得制备出的光电探测器缺陷更少, 复合速率降低, 从而具有更低的暗电流及工作稳定性. 倏逝波耦合波导型 PIN 探测器^[12-15] 解除了量子效率和带宽的相互制约, 并通过集成倏逝波导有效提高了光纤与波导之间的耦合效率^[16,17], 增加探测器的响应度^[18-20].

本文成功设计并制备出了 16 个倏逝波耦合型

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFB1805701)、国家自然科学基金 (批准号: 61934003, 61635010, 61674136) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4194093) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hanqin@semi.ac.cn

光电探测器 (evanescent coupling photodetector, ECPD) 阵列, 在 -3 和 0 V 时的暗电流分别为 215 和 1.23 pA, 有源区面积仅为 $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的情况下, 仍有较大的响应度, 即 0.5 A/W (无减反膜); -3 V 偏压下总带宽超过 400 GHz, 可以实现 400 G 以上的并行通信接收系统.

2 模拟与设计

2.1 3 dB 带宽的数值计算

本节着重考虑器件吸收区厚度和有源区面积对器件带宽的影响, 3 dB 带宽由渡越时间带宽 f_t 和 RC 时间常数限制带宽 f_{RC} 组成. 渡越时间带宽可表示为

$$f_t \approx \frac{3.5 \times \bar{v}}{2\pi W}, \quad (1)$$

其中, W 为本征层厚度, \bar{v} 为载流子平均速度, 可表示为

$$\frac{1}{\bar{v}^4} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\nu_e^4} + \frac{1}{\nu_h^4} \right), \quad (2)$$

式中 ν_e 为电子速率, ν_h 为空穴速率. RC 时间常数限制带宽可以表示为

$$f_{RC} \approx \frac{1}{2\pi C (R_s + R_l)}, \quad (3)$$

其中, R_s 和 R_l 分别表示串联电阻和负载电阻. 探测器电容由以下公式表示:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{W}, \quad (4)$$

其中 $\epsilon_0 \epsilon_r$ 为本征层的介电常数. 探测器的 3 dB 带宽可以表示为

$$\frac{1}{f_{3dB}^2} \approx \frac{1}{f_t^2} + \frac{1}{f_{RC}^2}. \quad (5)$$

吸收区材料采用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 其介电常数为 13.76, 探测器宽度设定为 $5 \mu\text{m}$, 电子漂移速率 $v_e = 6.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 空穴漂移速率为 $v_h = 4.8 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 负载电阻和串联电阻分别为 $R_l = 50 \Omega$, $R_s = 50 \Omega$. 通过 (5) 式计算了长度分别为 20, 40, 60 μm 的探测器 3 dB 带宽及最佳吸收区厚度对应值. 考虑到材料生长速率通常在 4—5 A/min, 因此其厚度可以得到准确控制.

图 1 为数值计算的 3 dB 带宽随吸收区厚度和台面面积的变化曲线. 在综合考虑响应度的情况

下, 只有器件的有源区面积减小, 才能减小器件电容, 达到提高 RC 时间常数限制带宽目的. 器件的有源区厚度需综合考虑, 一方面有源区厚度的增加能够提高 RC 时间常数限制带宽, 另一方面减少有源区厚度能够提高渡越时间限制带宽. 由图 1 可见, 当台面长度 20 μm 时, 最佳吸收区厚度为 460 nm, 渡越时间带宽理论值为 64 GHz, 对应的 3 dB 带宽约 45.4 GHz. 因此, 吸收区 InGaAs 厚度设计为最优值 460 nm.

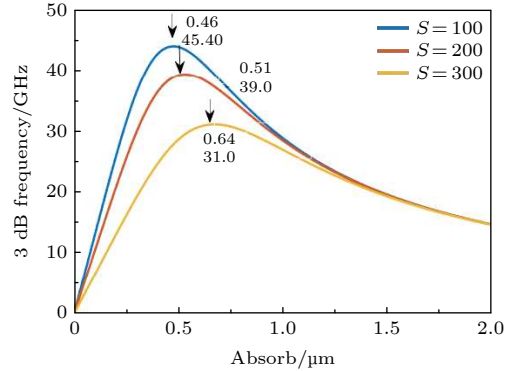


图 1 数值计算的不同吸收区厚度和面积对探测器带宽的影响

Fig. 1. Influence of different thickness and area of absorption region on detector bandwidth is obtained by numerical calculation.

2.2 倏逝波耦合波导型 PIN 探测器物理模型构建

倏逝波耦合波导型 PIN 物理模型以及外延结构见图 2 和表 1. PIN 光电探测器位于稀释波导上方, N 型重掺杂 (Si 的掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的 InGaAsP 为 N 型接触层, 其折射率介于波导芯与吸收区折射率之间, 以减少折射率突变带来的回波损耗, 此外, 该接触层的宽度要足够大以引入多模分布, 使光场在其内呈现周期性振荡分布, 类似多模干涉, 通过改变光电探测器 (PD) 台面与波导间距可以控制吸收区中的光强分布, 从而改变器件的吸收效率.

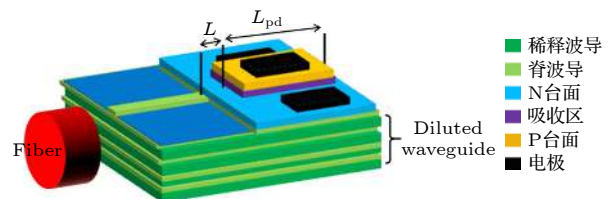


图 2 PIN 光电探测器 3D 结构示意图

Fig. 2. 3D structure of PIN photodetector.

表 1 倏逝波耦合 PIN 探测器外延结构
Table 1. Epitaxial structure of evanescent waveguide coupled PIN detector.

| Function | Component | λ_g | Doping | Thickness/ μm |
|-------------------|---|-------------|------------------------|--------------------------|
| P contact | P-In _{0.53} Ga _{0.47} As | 1.69 | Zn: 10^{19} | 80 |
| Grading 1 | P-In _{0.3} Ga _{0.64} AsP | 1.32 | Zn: 5×10^{18} | 5 |
| Cladding | P-In _{0.18} Ga _{0.39} AsP | 1.14 | Zn: 10^{18} | 410 |
| Spacer | P-In _{0.18} Ga _{0.39} AsP | 1.14 | Zn: 5×10^{17} | 30 |
| Grading 2 | P-In _{0.34} Ga _{0.73} AsP | 1.396 | Zn: 10^{17} | 5 |
| Absorption | In _{0.53} Ga _{0.47} As | 1.69 | | 460 |
| Ethc stop 1 | InP | | | 10 |
| n-contact | N-In _{0.3} Ga _{0.64} AsP | 1.32 | Si: 2×10^{18} | 320 |
| Ethc stop 2 | InP | | | 10 |
| Diluted waveguide | | | | |
| Substrate | InP | | | 500000 |

探测器吸收区 InGa_{0.53}As_{0.47} 和宽度设为 5 μm , 厚度为 460 nm. 吸收波长大于 1.69, 使其在很大范围内有较高的光响应度. 在吸收区上方有一层 0.41 μm 厚的隔离层 InGa_{0.18}As_{0.39}P, 用于隔离开 P 接触层与吸收层, 减少 P 接触层与金属电极对吸收区光吸收的削弱. 在隔离层两面有约 5 nm 厚的过渡层, 折射率介于隔离层与吸收层之间, 减少折射率突变带来的回波损耗. 最上方为 0.08 μm 厚的 In_{0.53}Ga_{0.47}As P 接触层, 其掺杂浓度高达 10^{19} cm^{-3} , 便于形成良好的欧姆接触, 减小接触电阻. 通过计算, 确立了探测器吸收区台面面积 (5 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$)、吸收区厚度 (0.46 μm) 及稀释波导结构, 如表 1 所列. 图 2 为倏逝波耦合波导型 PIN 的三维 (3D) 结构示意图, 可以看到, 入射的高斯光 (模斑尺寸为 7 μm) 首先在稀释波导区发生模式转换耦合, 耦合进去的光逐渐传输到脊波导层中, 然后光沿着脊波导层传输到光学匹配层再慢慢向上耦合进入吸收区被吸收转化为光生电流.

2.3 倏逝波耦合光电探测器光场传输模拟

借助光学软件对倏逝波耦合光电探测器进行光场传输的模拟. 图 3 所示为倏逝波耦合光电探测器光场纵向传输强度分布图, 可以看出, 入射的高斯光首先在稀释波导区发生模式转换耦合, 耦合进去的光逐渐传输到脊波导层中, 然后光沿着脊波导层传输到光学匹配层再慢慢向上耦合进入吸收区被吸收转化为光生电流.

为了进一步更加直观地说明所设计器件的响

应速率, 对器件进行了 3 dB 带宽的模拟. 在 -5 V 偏压, 1 mW/cm^2 小信号下器件在 10 MHz—105 GHz 的频率范围内的动态响应如图 4 所示. 从图 4 可以得到器件的 3 dB 带宽对应的截止频率为 46.8 GHz, 与计算值一致.

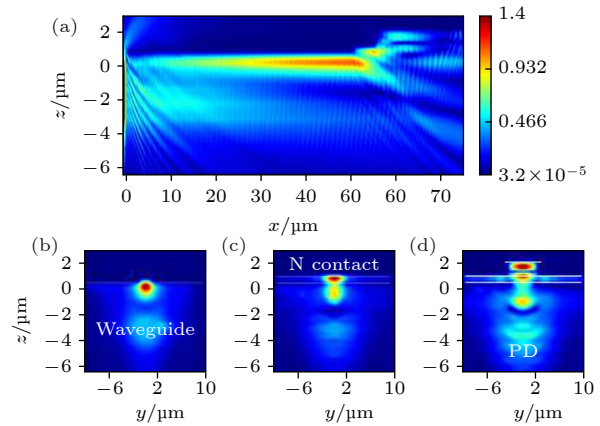


图 3 (a) 倏逝波耦合波导型探测器光场纵向传输强度分布; (b) 光场传输到脊波导时横向电场截面图; (c) 光场传输到光学匹配层时的横向电场截面; (d) 光场被探测器吸收区吸收时的横向电场截面图

Fig. 3. (a) Longitudinal propagation intensity distribution of evanescent coupled waveguide detector; (b) cross section of transverse electric field when light field propagates to ridge waveguide; (c) cross section of transverse electric field in optical matching layer; (d) cross section of transverse electric field when light field is absorbed by absorption region of detector.

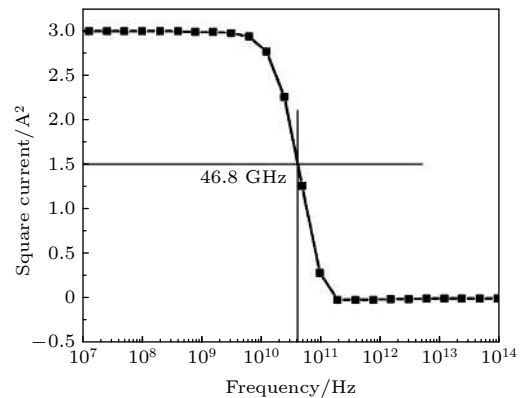


图 4 -5 V 偏压, 1 mW/cm^2 小信号下器件的高频响应
Fig. 4. High frequency response of the device under -5 V bias and 1 mW/cm^2 small signal.

3 制备与测试

采用 MOCVD 技术生长外延裸片. 整体工艺制备分成两个部分: 钝化前 PN 结台面的制备和钝化后电极与倏逝波导制备, 如图 5 所示. 首先制备

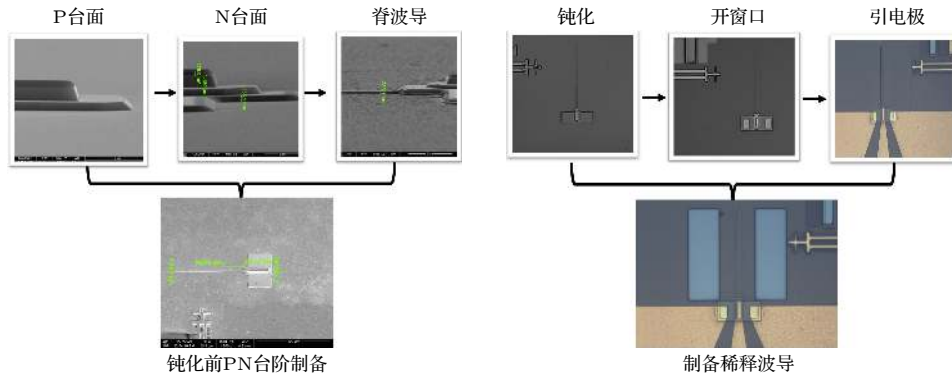


图 5 工艺制备流程图

Fig. 5. Process preparation flow chart.

P 台面, 采用干法 ICP 刻蚀到 P 吸收层, 然后使用浓硫酸腐蚀液腐蚀出吸收层形貌. 接着用相同腐蚀液制备出 N 台面, 再通过 ICP 刻蚀出单模脊波导. 使用 PECVD 技术完成器件的钝化, 再进行电极窗口和引线制备, 最后使用溴水腐蚀液制备出倏逝波导, 深度约 5—6 μm .

对制备的倏逝波耦合型探测器进行暗电流测试, 采用 Keithley 4200 SCS 半导体参数仪共测试了 16 个器件. 如图 6 所示, 器件在 -3 和 0 V 时的暗电流分别为 215 和 1.23 pA. 如此小的暗电流表明材料外延缺陷很少, 后期制备工艺对台面表面形貌处理平滑, 制备的器件具有很高的探测灵敏度.

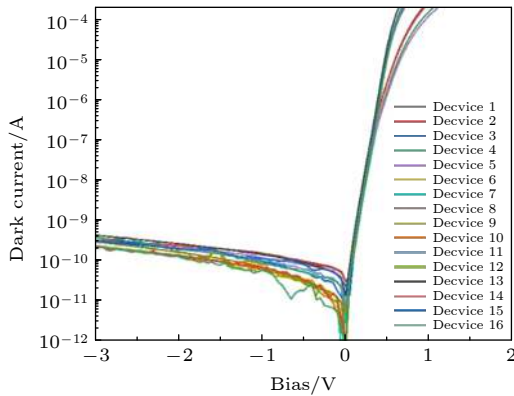


图 6 器件的暗电流特性

Fig. 6. Dark current characteristics of devices.

设定可调谐激光器输出光源波长为 1550 nm, 光功率为 5 mW, 测试的 16 个器件有源区尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 器件光响应电流如图 7 所示. 可以看出, 16 个器件的光电流最大值可以达到 2 mA, 对应的响应度为 0.4 A/W; 最小值为 1.65 mA, 对应的响应度为 0.33 A/W. 解理时波导端面的粗糙

度不同以及测试过程中的测量误差都会导致器件最后的响应度差异. 此外, 由于接入波导是拉锥光纤, 自身存在至少 1 dB 的损耗, 若按照 1 dB 的损耗计算, 则从拉锥光纤输出的光约为 4 mW, 对应的响应度可以达到 0.5 A/W.

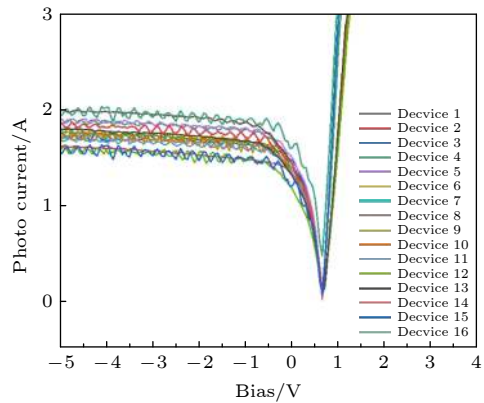


图 7 器件在 5 mW 功率下的光响应

Fig. 7. Optical response of the device at 5 mW power.

使用矢量网络分析仪对 16 个探测器进行器件 3 dB 带宽的测试. 图 8 为使用 -3 V 的偏压对 16 个器件进行高频响应测试的结果. 可以看到, 每个器件的 3 dB 带宽均在 25 GHz 左右, 有的达到 28 GHz, 阵列总带宽达到 400 GHz 以上, 可同时适用于双信道 200 Gbit/s 的相干接收系统和 400 Gbit/s 的 WDM 接收系统. 进一步减小吸收区有效面积和优化合金条件可以进一步提高器件的带宽.

图 9 为 16 个器件的 3 dB 带宽值, 可以看出, 16 个器件中带宽最大值为 28 GHz, 最小值为 22.5 GHz, 最大值与最小值相差仅为 5.5 GHz, 表明 16 个器件具有很好的探测均匀性.

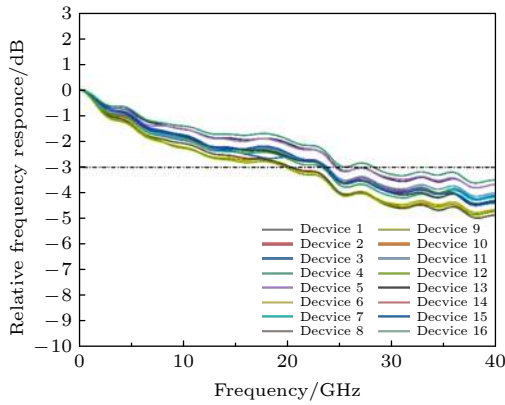


图 8 器件在-3 V 偏压下的高频响应

Fig. 8. High frequency response of the device under -3 V bias.

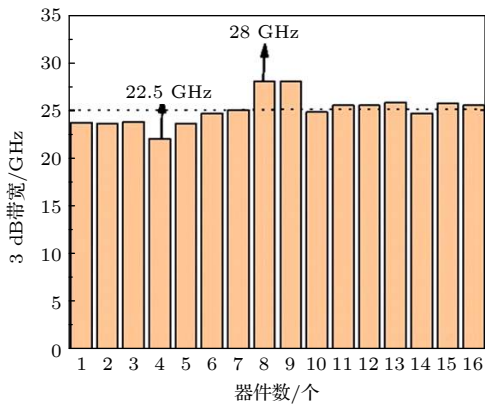


图 9 16 个器件的高频变化

Fig. 9. High frequency variation of 16 devices.

4 结 论

本文报道了一款砷磷基低暗电流、高带宽倏逝波耦合型 PIN 探测器仿真设计和制备工作. 倏逝波耦合型探测器由稀释波导、单模脊波导和 PIN 光电二极管构成. 通过对探测器带宽的理论计算, 得到了最大带宽值 45.4 GHz 对应的有源区最佳面积 $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 和最佳厚度 460 nm; 利用仿真软件模拟了设计的探测器的 3 dB 带宽为 46.8 GHz, 与理论计算保持一致; 进一步, 成功制备出了 16 个 PIN 探测器阵列, 器件在-3 和 0 V 时获得了非常小的暗电流, 分别为 215 和 1.23 pA; 在有源

区面积仅为 $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 时获得了较高的光响应度, 即 0.5 A/W(无增透膜); 单个探测器的 3 dB 带宽均保持在 25 GHz 以上, 系统总带宽可达到 400 GHz. 所制备的探测器阵列可应用到 400 Gbit/s 的 WDM接收系统和 200 Gbit/s 的相干接收系统.

参考文献

- [1] Poon W A, Luo X, Xu F, Chen H 2009 *IEEE J. Proc.* **97** 1216
- [2] Lira H L R, Manipatruni S, Lipson M 2009 *IEEE J. Opt. Express* **17** 22271
- [3] Xu Q, Schmidt B, Shakya J, Lipson M 2006 *Opt. Express* **14** 9431
- [4] Bosco G, Curri V, Carena A, Poggiolini P, Forghieri F 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 53
- [5] Yu S, Zhang H, Shen J, Zhang Y J, Gu W Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 909 (in Chinese) [喻松, 张华, 申静, 张永军, 顾晓仪 2008 物理学报 **57** 909]
- [6] Wang F, Wu B J, Cao Y M, Wang Y H, Wen F, Qiu K 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114207 (in Chinese) [万峰, 武保剑, 曹亚敏, 王瑜浩, 文峰, 邱昆 2019 物理学报 **68** 114207]
- [7] Heck M J R, Bauters J F, Davenport, M L, Doylend J K 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 6100117
- [8] Huang B, Xu Z, Wei W, Zan D, Ning G, Zhang Z, Chen H 2011 *Opt. Commun.* **284** 3924
- [9] Kwack M J, Tanemura T, Higo A, Nakano Y 2012 *Opt. Express* **20** 28734
- [10] Zhang X L, Liu S T, Lu D, Zhang R K, Ji C 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 054202
- [11] Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 50
- [12] Sheng Z, Liu L, Joost B, He S L, Dries V T 2010 *Opt. Express* **18** 1756
- [13] Kato K, Hata S, Kozen A, Yoshida J I, Kawano K 1991 *J. IEEE Photonics Technol. Lett.* **3** 473
- [14] Ohnaka K, Inoue U T, Hasegawa H N, Serizawa H 1985 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 1236
- [15] Demiguel S, Li N, Li X W, Zheng X G, Kim J, Champbell J C, Lu H F, Anselm A 2003 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **15** 1761
- [16] Liu S Q, Yang X H, Liu Y, Li B, Han Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108503
- [17] Giraudet L, Banfi F, Demiguel S, Herve-Gruyer G 1999 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **11** 111
- [18] Magnin V, Giraudet L, Harari J, Decobert J, Pagnot P, Boucherez E, Decoster D 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 477
- [19] Yang C D, Lei P H, Pong D J, Wu M Y, Ho C L, Ho W J 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1607
- [20] Wang Y S, Chang S J, Chiou Y Z, Lin W 2009 *J. Electrochem. Soc.* **155** 307

Low dark current and high bandwidth evanescent wave coupled PIN photodetector array for 400 Gbit/s receiving system*

Lu Zi-Qing¹⁾²⁾ Han Qin^{1)2)3)†} Ye Han¹⁾²⁾ Wang Shuai¹⁾²⁾
Xiao Feng¹⁾²⁾ Xiao Fan¹⁾²⁾

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

2) (*College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China*)

3) (*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China*)

(Received 23 April 2021; revised manuscript received 26 May 2021)

Abstract

Compared with surface and edge incident photodetectors, evanescent coupling photodetector (ECPD) has high bandwidth and high quantum efficiency, so it has a broad application prospect in the field of high-speed optical communication. The evanescent wave coupled photodetector is composed of a diluted waveguide, a single-mode ridge waveguide and a PIN photodiode. By directional evanescent wave coupling, the coupling efficiency of the incident light from the fiber to the absorption core of the photodetector is improved. In this paper, the structure design, experimental preparation and test results of an indium phosphorus based evanescent wave coupled photodetector array are introduced in detail. The test results show that the dark current of the evanescent wave coupled photodetector array is as low as 215 pA and 1.23 pA under -3 and 0 V bias, respectively. When the active area is $5\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$, the device still has a high responsivity of $0.5\ \text{A/W}$ (without antireflection film). The high frequency performance of the detector is tested. The bandwidth of each detector is more than 25 GHz, and the total bandwidth is more than 400 GHz. Any optical device can be integrated. The detector array can be applied to the WDM receiving system of 400 Gbit/s and coherent receiving system of 200 Gbit/s.

Keywords: evanescent wave coupling, pin detector array, low dark current, 400 GHz

PACS: 85.60.Gz, 73.40.Kp, 81.15.Hi

DOI: [10.7498/aps.70.20210781](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210781)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFB1805701), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61934003, 61635010, 61674136), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4194093).

† Corresponding author. E-mail: hanqin@semi.ac.cn