

# 零偏压下近红外集成单波长波导光探测器

高松<sup>1</sup>, 牛慧娟<sup>1,2,3</sup>, 李真<sup>1</sup>, 范鑫烨<sup>1,2</sup>, 段晓峰<sup>3</sup>, 黄永清<sup>3</sup>

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城大学 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059; 3. 北京邮电大学 信息光子学与光通信重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 提出了一种基于 InGaAsP 材料的零偏压单片集成波导光探测器。该器件单片集成了光子晶体 (Photonic Crystals, PC) 滤波器、锥形耦合器、零偏压波导光探测器 (Wave-Guide Photodetector, WGPd) 以及直波导, 形成了一个平面微纳光信号接收子系统。集成的波导光探测器吸收峰值波长位于  $1.55\ \mu\text{m}$  处, 光谱线宽仅  $1.6\ \text{nm}$ 。设计的波导光探测器在无外加偏压时具有良好性能, 经优化, 当其面积为  $4\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  时其  $3\ \text{dB}$  带宽达  $78\ \text{GHz}@0\ \text{V}$ , 响应度为  $0.78\ \text{A/W}$ 。整个器件基于组分可调的 InGaAsP 材料, 实现多功能器件的单片集成, 具有高性能、小体积、低功耗、窄线宽等特性。

**关键词** 单片集成; 光子晶体滤波器; 锥形耦合器; 波导光探测器; 零偏压

**中图分类号** TN215, TN256

**文献标识码** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Integrated Single Wavelength Waveguide Photodetector in the Near Infrared Operating at Zero Bias

GAO Song<sup>1</sup>, NIU Huijuan<sup>1,2,3</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, FAN Xinye<sup>1,2</sup>,  
DUAN Xiaofeng<sup>3</sup>, HUANG Yongqing<sup>3</sup>

(1. School of Physical Science and Information Engineering Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;  
2. Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University,  
Liaocheng 252059, China; 3. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Integrated Monochromatic near-infrared waveguide photodetector operating at zero-bias based on InGaAsP material is proposed. The device monolithically integrates a photonic crystal filter, a tapered coupler, a zero-bias waveguide photodetector, and a straight waveguide to form a planar micro-nano optical signal reception subsystem. The integrated waveguide photodetector has a peak wavelength of  $1.55\ \mu\text{m}$  and a spectral linewidth of  $1.6\ \text{nm}$ . The designed waveguide photodetector has good performance without applied voltage bias and is optimized to achieve a bandwidth of  $78\ \text{GHz}$  and a response of  $0.78\ \text{A/W}$  with

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2200803); 山东省自然科学基金项目(ZR2022MF305, ZR2022MF253, ZR2021MF053, ZR2021MF070); 信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金项目(IPOC2021B07); 山东省高校2021年青年引进与培养计划; 聊城大学博士科研启动基金(318052168); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC2570); 教育部产学研协同育人项目(220605160271242, 221002802140950, 220906093200103)资助

通讯作者: 牛慧娟, 女, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 光电信息器件与系统, E-mail: supernhj@lccu.edu.cn.

the area of  $4\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ . The integrated device is based on the component-tunable InGaAsP material to achieve monolithic integration of multifunctional devices with high performance, small size, low power consumption, and narrow line width.

**Key words** monolithic integration; photonic crystal filters; taper coupler; waveguide photodetectors; zero bias

## 1 引言

当前, AI、互联网+、云计算等技术不断发展, 促使智能光通信系统的迭代更新<sup>[1]</sup>。在信号传输和处理过程中, 需要将信号快速切换到某一特定波长, 这就要求接收端具有极窄线宽的单波长探测能力。为了适应智能光通信系统的发展, 具有光电转换功能的接收端器件逐渐向高性能、集成化方向发展<sup>[2-5]</sup>。高集成度的光电器件在实现多功能、高性能、小体积的同时, 其大量的外部偏置电路也带来了焦耳热以及器件之间的串扰。工作在零偏压下的波导光探测器外电路简单, 器件具有低功耗、易集成等优点, 因此设计零偏压下的高速、高响应度、具有波长选择性的波导光探测器具有重要意义和更广阔的应用前景<sup>[6-7]</sup>。

边入射结构克服了响应度与载流子渡越时间之间的矛盾, 因此可以同时具有高速、高响应度的特性<sup>[8]</sup>。所以具有相同的有源区面积和吸收层厚度的情况下, 波导光探测器的响应度远超过垂直入射光探测器<sup>[3]</sup>。边入射结构的波长选择性可以通过将法布里波罗腔(Fabry-Pérot Cavity, FPC)滤波器与波导光探测器异质集成、直波导与环形波导光探测器单片集成来实现<sup>[5,9]</sup>。虽然它们分别通过 FPC 腔与环形谐振腔实现了滤波功能, 但是其制备工艺相当繁琐, 并且不易于大规模集成。近年来, 光子晶体滤波器的设计得到了关注。但是光子晶体滤波器与波导光探测器的单片集成器件还未得到充分的研究, 这种单片集成器件对比于以往的波长选择型波导光探测集成器件, 具有制备工艺简单、占地面积小、抗干扰能力强、易于大规模集成等突出优点, 更适合构建智能光通信系统中高密集光网络架构<sup>[10-12]</sup>。

针对以上问题, 将窄线宽、单波长滤波器与边入射波导光探测器进行集成以同时实现滤波与光电转换功能<sup>[5]</sup>。该器件由工作于零偏压的高性能波导光探测器、InGaAsP 材料锥形耦合器与光子晶体滤波器水平集成而成, 集成后器件如图 1 所示, 其中锥形耦合器可以大大提高光子晶体滤波器与波导光探测器间的耦合效率。采用商用软件对所设计的集成器件进行仿真, 提取并计算主要的性能指标, 包括传输效率、响应度、频率响应等, 并通过优化光场分布、电场分布方法提高其性能。

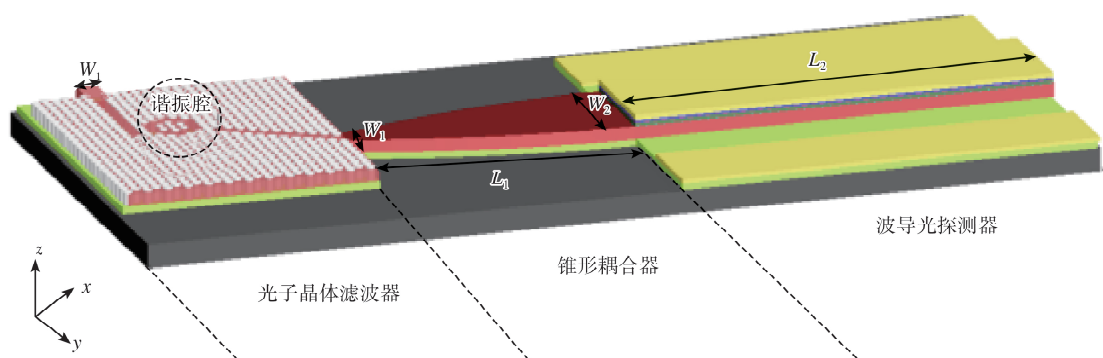


图 1 集成单波长波导光探测器结构示意图

## 2 设计与原理

### 2.1 零偏压波导光探测器的设计

为了实现波导光探测器与光子晶体滤波器、锥形耦合器的单片集成, 采用高掺杂的 InGaAsP(折射率为 3.39)材料作为光波导层。设计的零偏压波导探测器的有源区宽度( $W_2$ )为  $4\ \mu\text{m}$ , 长度( $L_2$ )为  $15\ \mu\text{m}$ , 电极与有源区间隔为  $2\ \mu\text{m}$ 。具体参数如表 1。

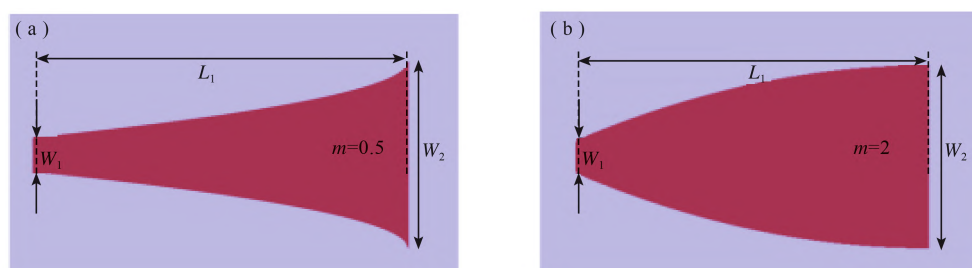
表 1 波导光探测器外延参数

| 材料      | 掺杂浓度/ $\text{cm}^{-3}$ | 掺杂类型 | 厚度/ $\mu\text{m}$ | 层名    | 折射率   |
|---------|------------------------|------|-------------------|-------|-------|
| InGaAs  | 2E19                   | P    | 0.05              | P 接触层 | 3.42  |
| InGaAsP | 1E19                   | P    | 0.07              | 电子阻挡层 | 3.39  |
| InGaAs  | 3E17~5E18              | P    | 0.15              | 吸收层   | 3.59  |
| InGaAs  | 1.5E18                 | P    | 0.01              | 过渡层   | 3.59  |
| InGaAsP | 1E15                   | U    | 0.01              | 间隔层   | 3.42  |
| InGaAsP | 1.5E18                 | N    | 0.01              | 崖层    | 3.39  |
| InGaAsP | 1E15                   | U    | 0.25              | 收集层   | 3.39  |
| InP     | 1E15                   | U    | 0.01              | 匹配层   | 3.167 |
| InGaAsP | 1E19                   | N    | 1                 | 光波导层  | 3.39  |
| InP     | 1E19                   | N    | 0.3               | N 接触层 | 3.167 |
| S.I.InP |                        |      |                   |       |       |

波导光探测器的吸收层采用高斯掺杂类型可以增加吸收层的内部电场<sup>[13]</sup>,加快电子的漂移速度,从而提高波导光探测器的响应速度。重掺杂的 InGaAsP 材料作为光波导层,InP 材料作为 N 接触层。匹配层可以使光信号更好的耦合至吸收层,收集层可以调节结电容,电子在其中作漂移运动,吸收层则进行光电转换。电子阻挡层用于阻挡光生电子从吸收层向 P 接触层扩散,P 接触层的作用是使半导体器件与金属电极形成良好的欧姆接触。

## 2.2 锥形耦合器结构的设计

锥形耦合器的输入端的宽度为  $W_1$ ,输出端的宽度为  $W_2$ ,分别与光子晶体滤波器、波导光探测器的输出、输入端宽度保持一致。定义锥形耦合器的长度为  $L_1$ ,令  $a = (W_1 - W_2)/L_1^m$ ,则锥形曲线函数  $W(x)$  可以用以上参数表示为:  $W(x) = a(L_1 - x)^m + W_2$ 。其中,  $W(0) = W_1$ ,  $W(L_1) = W_2$ ,当  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $L_1$  值确定时,通过改变  $m$  的值将得到形状、性能不同的锥形耦合器。这里分别展示了  $m=0.5$  或  $m=2$ ,给定  $W_1=0.727 \mu\text{m}$ 、 $W_2=4 \mu\text{m}$ 、 $L_1=10 \mu\text{m}$  时锥形耦合器结构俯视图,如图 2 所示。

图 2 不同  $m$  值锥形耦合器俯视图 (a)  $m=0.5$ ; (b)  $m=2$ 

## 2.3 光子晶体滤波器设计

本文设计的光子晶体滤波器是通过在厚度为  $1 \mu\text{m}$  的 InGaAsP 材料上刻蚀出空气孔来实现滤波功能。图 3(a) 为具有线缺陷的光子晶体结构,线缺陷波导将束缚光波在其中传播,因此左端口 (Port1) 入射光波将在右端口 (Port2) 出射。在实际中常要求改变光路的方向以适应不同的应用场合,本文设计的光子晶体滤波器通过对入射光场的控制使得特定波长的光波可以通过光子晶体且方向改变  $90^\circ$  后进入锥形耦合器。图 3 (b) 为具有一个六边形环形谐振腔的光子晶体结构,其中腔内的空气柱 (白色圆柱) 半径为  $R$ ,腔外的空气孔半径为  $r$ ,晶格常数为  $a$ ,Port1 端口宽度  $W_1 = \sqrt{3}a$ 。入射光波从输入端口 (Port1) 处进入光子晶体滤波器,在谐振腔内传播一周后相位移  $\varphi = \beta L$ 。其中  $\beta = 2\pi n_e / \lambda_m$ ,  $L = 2\pi b$ ,  $b$  为谐振腔半径,  $n_e$  为谐振腔介质中的有效折射率<sup>[14]</sup>。当  $\varphi = 2m\pi$  ( $m$  为自然数,  $m=0,1,2,\dots$ ) 时,环形腔内发生共振,共振波长  $\lambda_m = 2\pi b n_e / m$ 。满足共振条件的光波将通过环形腔耦合至输出端口 Port3 处,其它波长的光波将无法通过光子晶体滤波器,从而实现滤波的功能。

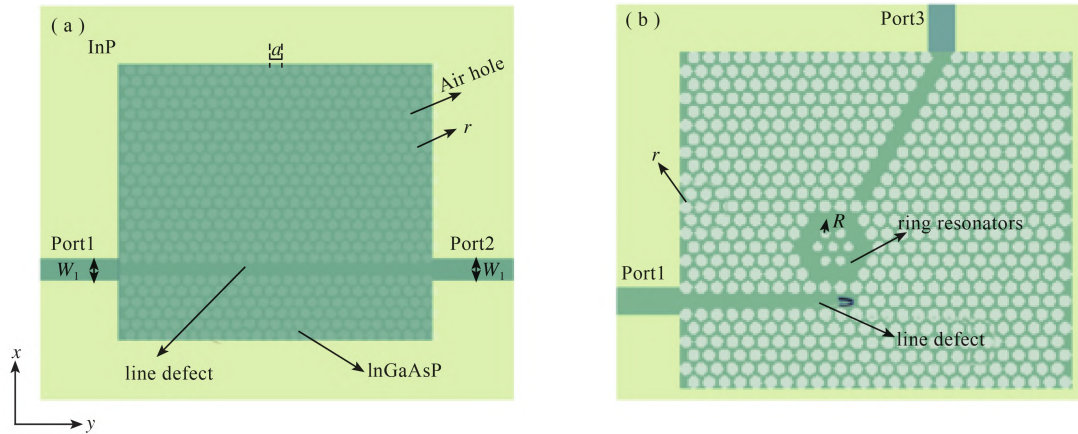


图3 解复用器结构俯视图(a) 线缺陷; (b) 环形缺陷

### 3 仿真结果及性能分析

#### 3.1 零偏压波导光探测器的性能分析

使用光束传播法模拟了  $1.55 \mu\text{m}$  的光波在波导光探测器结构中的传播,如图4所示。输入光功率变为原来的  $1/e$  时波导光探测器的吸收长度为  $15 \mu\text{m}$ 。采用时域有限差分法对波导光探测器的响应度进行分析。响应度计算公式为:  $M = J_{sc} * A / P$ , 其中  $J_{sc}$  为电流密度,  $A$  为有源面积,  $P$  为输入功率<sup>[3]</sup>。最终我们得到了  $4 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  波导光探测器的响应度为  $0.78 \text{ A/W}$ 。同时对  $4 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  波导光探测器进行了电学仿真,  $3 \text{ dB}$  带宽的仿真采用的是小信号分析模型。其中在低电场条件下,采用浓度依赖迁移率(CON-MOB)模型。在高电场条件下,使用平行电场迁移率(FLDMOB)模型。浓度依赖迁移率模型和平行电场迁移率模型中的 InP 和  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料数据主要参考 Y.L.Huang 的报道<sup>[15]</sup>。通过小信号模型可以得到外置偏置电压为  $0 \text{ V}$  时波导光探测器在大信号(调制深度为  $100\%$ )输入下的频率响应,即  $I(\omega)$ 。归一化频率响应  $\tau(\omega)$  计算公式如下<sup>[16]</sup>

$$\tau(\omega) = 10 \lg \left( \frac{I(\omega)}{I(0) \sqrt{1 + \omega^2 (R_s + R_L)^2 (C_p + C_j)^2}} \right), \quad (1)$$

式中角频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $I(0) = I(\omega)|_{\omega=0}$ ,  $C_j(0) = C_j(\omega)|_{\omega=0}$ , 负载阻抗  $R_L = 50 \Omega$ , 串联电阻  $R_s = 50 \Omega$ , 寄生电容  $C_p = 5 \text{ fF}$ , 波导光探测器的电容值  $C_j$  可以通过  $C-\omega$  曲线计算得到<sup>[17]</sup>。

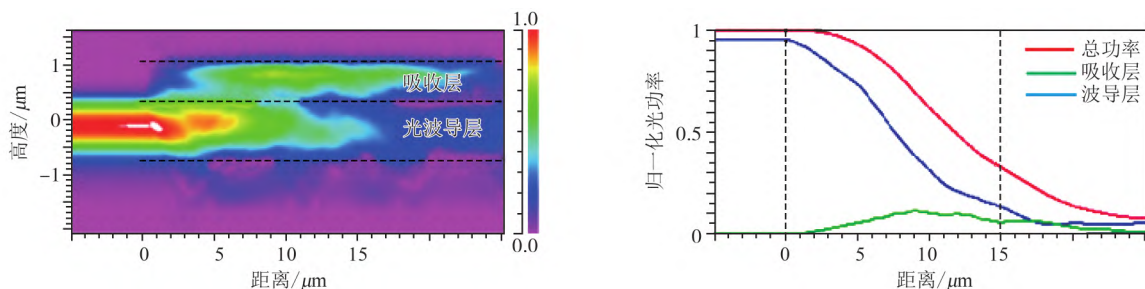


图4 光在波导探测器中的传播

同时,为了说明吸收层采用高斯掺杂分布可以提高吸收层内部电场强度,提高波导光探测器的响应速度。这里将吸收层采用 P 型高掺杂,掺杂浓度为  $5\text{E}18 \text{ cm}^{-3}$ ,即传统的 UTC-WGPD;吸收层采用 P 型高斯掺杂,掺杂浓度为  $5\text{E}18 \sim 3\text{E}17 \text{ cm}^{-3}$ ,即 MUTC-WGPD 进行对比分析,器件掺杂浓度分布如图5(a)所示。仿真结果表明,零偏压工作下  $4 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  波导光探测器 UTC-WGPD 和 MUTC-WGPD 的  $3 \text{ dB}$  带宽可分别达  $61 \text{ GHz}$  和  $78 \text{ GHz}$ ,图5(b)给出二者的频率响应关系。显然,在  $0 \text{ V}$  工作条件下,MUTC-WGPD 的带宽大约是 UTC-WGPD 的  $1.27$  倍,带宽得到了明显的提升。图5(c)为外置偏置电压为  $0 \text{ V}$  时 UTC-WGPD 和 MUTC-WGPD 的电场分布,可以看出高斯掺杂分布提高了吸收层的电场强度,从而使光生载流子以更快

的速度通过吸收层,即使在 0 V 工作条件下 MUTC-WGPD 也具有高速性能。内建电场与吸收层掺杂浓度关系可以表达为<sup>[18]</sup>

$$E_{\text{built}}(x) = \frac{V_t}{p_0(x)} \cdot \frac{dp_0(x)}{dx} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{p_0(x)} \cdot \frac{dp_0(x)}{dx}, \quad (2)$$

式中  $E_{\text{built}}(x)$  是内建电场强度,  $V_t$  是热电压,  $p_0(x)$  是吸收层掺杂浓度,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是温度,  $q$  是电子电荷。

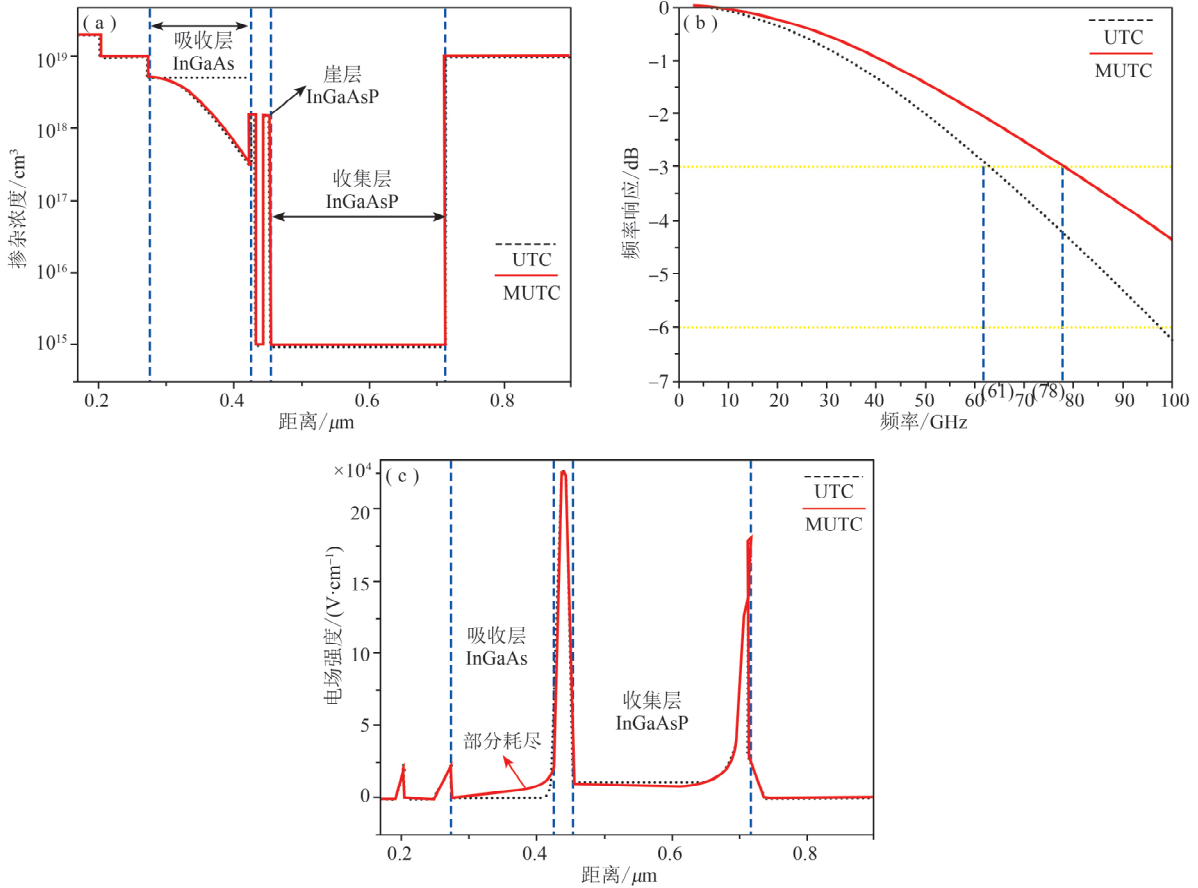
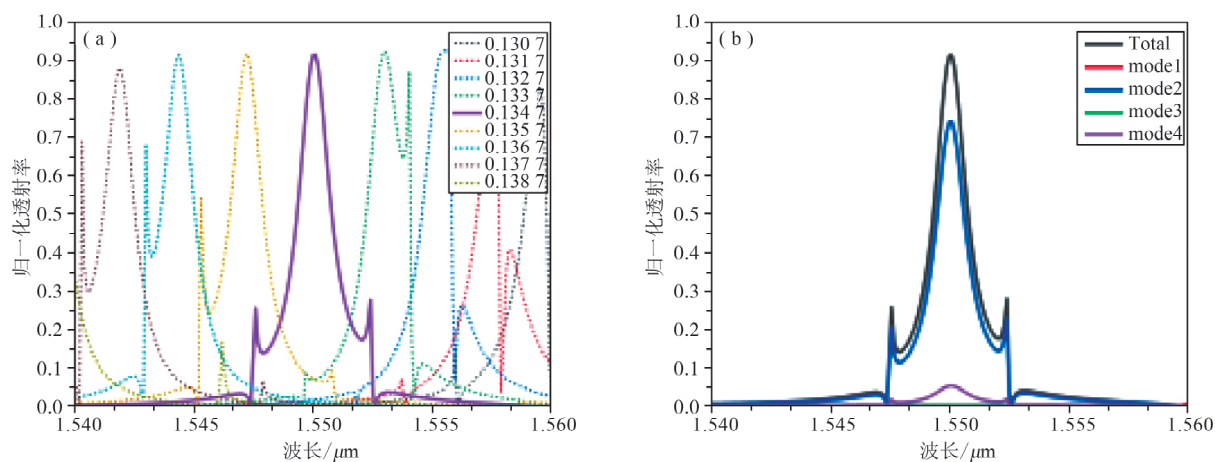
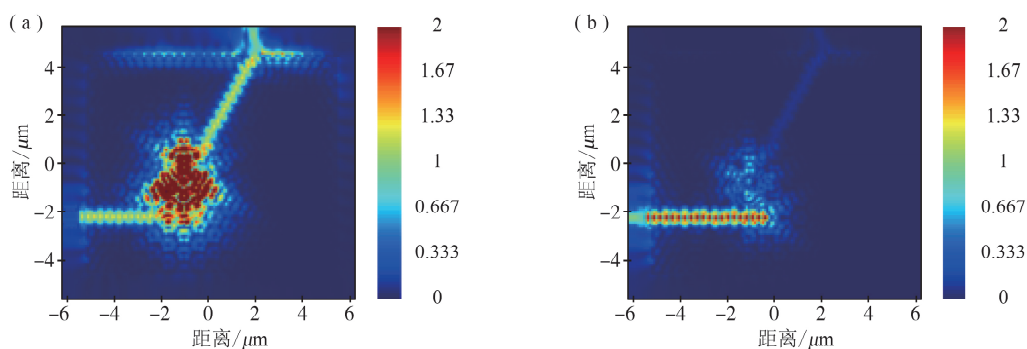
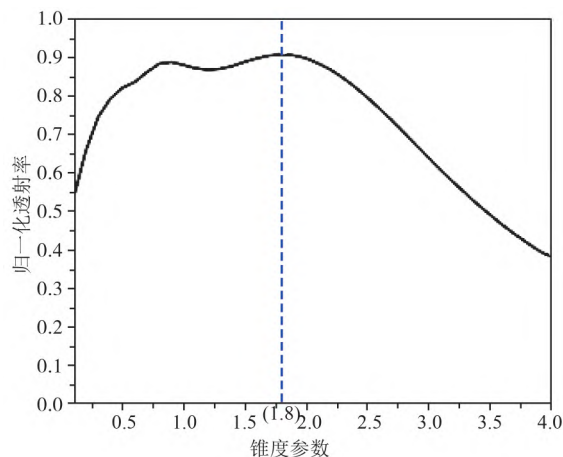
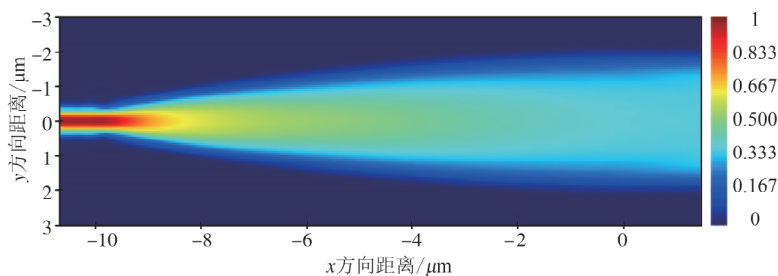


图5 MUTC-WGPD 和 UTC-WGPD 的对比图(a)掺杂浓度分布图;(b)频率响应图;(c)电场分布图

### 3.2 光子晶体滤波器与锥形耦合器的性能分析

本文设计光子晶体滤波器,以波长为  $1.54 \sim 1.56 \mu\text{m}$  (TE 基模) 为输入源、背景折射率为 1, 光子晶体滤波器晶格常数  $a = 0.42 \mu\text{m}$ , 并且以完美匹配层作为吸收条件, 进行模拟计算, 利用时域有限差分法研究了光子晶体滤波器的传输特性。图 6(a) 显示了输出端口 Port3 处的透射谱与腔内空气柱半径  $R$  的关系。当  $R = 0.1347 \mu\text{m}$  时, 光波波长为  $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 、 $1.56 \mu\text{m}$  的透射率分别为 0.55%、91%、0.58%。Port3 处不同模式的透射谱如图 6(b) 所示, 图 6(b) 表明 Port3 处主要以波长为  $1.55 \mu\text{m}$  TE 基模(mode2)模式波为输出源, 其中 TE 基模的透射率约为 80%。图 7(a)(b) 为当光源分别为  $1.55 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$  在光子晶体滤波器中的传播路径, 同时证明了波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光波可以到达光子晶体滤波器输出端口 Port3 处, 然而  $1.54 \mu\text{m}$  的光波则无法通过光子晶体滤波器。在环形缺陷的作用下, 形成了以中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 总透射率高达 91%, 半高全宽为仅为 1.6 nm,  $Q$  值为 962.7 的透射峰,  $Q$  值计算公式为  $Q = \lambda / \Delta\omega$ , 其中  $\lambda$  为中心波长,  $\Delta\omega$  为半高全宽。

波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光波经锥形耦合器传输到零偏压波导光探测器, 采用时域有限差分法研究锥形耦合器的光学特性。图 8 展示了不同  $m$  值时, 锥形耦合器输出端 TE 基模的透射谱(只考虑 TE 基模的传输效率)。当  $m$  为 1.8 时, 锥形耦合器的传输效率约为 90.5%, 其光场分布如图 9 所示。

图6 光子晶体滤波器透射谱图(a) 不同  $R$  值; (b) 不同模式图7 不同波长光场分布图(a) 波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ; (b) 波长为  $1.54 \mu\text{m}$ 图8 不同  $m$  值锥形耦合器透射谱图 TE 基模图9  $m = 1.8$  时锥形耦合器光场分布图

## 4 总结

本文设计的零偏压下近红外集成单波长波导光探测器同时具有高速、高量子效率和窄的光谱响应线宽。

器件的响应波长为 1 550 nm,  $Q$  值为 962.7, 理论仿真该器件的响应度为 0.78 A/W, 3 dB 响应带宽为 78 GHz@0 V。此研究方法不单单适用于单波长下光子晶体滤波器与波导光探测器集成器件的研究, 也适用设计具有多波长处理功能的单片集成波导光探测器阵列器件。采用 InGaAsP 材料作为光波导层的外延层材料, 一方面有利于与 InP 材料衬底的晶格匹配实现单片集成, 另一方面通过变换 InGaAsP 材料组分可以对其光学折射率进行调节以适应不同波段的接收。多光路光子晶体可以作为多波长解复用器, 可应用于弹性光网络的可重构光分插复用器, 与波导光探测器集成后形成弹性接收子系统, 同时具有低的复杂度和高的可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] GU R, YANG Z Y, JI Y F, et al. Machine learning for intelligent optical networks: a comprehensive survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 157:102576.
- [2] GEUM D M, KIM S K, LEE S, et al. Monolithic 3D integration of InGaAs photodetectors on Si MOSFETs using sequential fabrication process[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(3):433-436.
- [3] LIU T, LI D, ZHANG Y, et al. Design of monolithic distributed Bragg reflector-integrated photodiode using a tapered waveguide with InP and polymer cladding layer[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144(9):107395.
- [4] YAGI H, OKIMOTO T, INOUE N, et al. InP-based photodetectors monolithically integrated with 90° hybrid toward over 400 Gb/s coherent transmission systems[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2019, 102(4):347-356.
- [5] 刘飞, 黄永清, 胡福全. 一种新型波长选择性波导探测器的设计与分析[J]. 软件, 2013, 34(1):22-25.
- [6] T. U, K. A, N. Y, et al. Zero-bias operational ultra-broadband UTC-PD above 110 GHz for high symbol rate PD-array in high-density photonic integration[C].//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015:1-3.
- [7] CHEN H, BELING A, PAN H, et al. A method to estimate the junction temperature of photodetectors operating at high photocurrent [J]. IEEE J Quant Electron, 2009, 45 (12): 1537-1541.
- [8] BELING A, JC.C, InP-Based high-speed photodetectors[J]. Light wave Technology, 2009, 27(3):343-355.
- [9] ABAEIANI G, AHMADI V, SAGHAFI K. Design and analysis of resonant cavity enhanced-waveguide photodetectors for microwave photonics applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(15):1597-1599.
- [10] HU Y, CHEN H, ZHOU H. An integrated device for photonic-crystal electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3):0306002.
- [11] W.Y.C, Y.S.W, Y.J C, et al. Monolithically integrated photonic-crystal devices with photodiodes[J]. Optics Communications, 2011, 284 (19):4749-4751.
- [12] KENGO N, SHINJI M, TAKURO F, et al. Sub-fF-capacitance photonic-crystal photodetector towards fF/bit on-chip receiver[C].// Optoelectronics & Communications Conference IEE, 2017:750-758.
- [13] JIANF C X, NIU H J, WANG H Z, et al. A low-bias operational MPDA photodetector with high bandwidth-efficiency product and high saturation characteristics[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(11):628-634.
- [14] 李韵嘉, 李军, 文化锋, 等. 基于波导与环形腔耦合的多通道光子晶体滤波器[J]. 光电子激光, 2021, 32(5):443-450.
- [15] HUANG Y, SUN C. Nonlinear saturation behaviors of high-speed p-i-n photodetectors[J]. Journal of Light-wave Technology, 2000, 18 (2):203-212.
- [16] LIU T, HUANG Y Q, WEI Q, et al. Optimized uni-traveling carrier photodiode and mushroom-mesa structure for high-power and sub-terahertz bandwidth under zero- and low-bias operation[J]. Journal of Physics Communications, 2019, 3(9): 095004.
- [17] UMEZAWA T, KANNO A, KASHIMA K, et al. Bias-free operational UTC-PD above 110 GHz and its application to high baud rate fixed-fiber communication and W-band photonic wireless communication[J]. Light-wave Technology, 2016, 34(13):3138-3147.
- [18] ZHANG L Z, ZUO Y H, et al. High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector[J], 物理学报, 2012, 61(13):138501.

(责任编辑:赵海军)