

文章编号: 0258-7025(2009)09-2362-05

具有多波长处理功能的单片集成光探测器阵列

段晓峰 黄永清 王琦 黄辉 任晓敏 温凯

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 从理论上设计并研制了一种用于可重构光分插复用技术中的具有多波长处理功能的单片集成光探测器阵列, 器件在 GaAs 基衬底上集成了 GaAs/AlGaAs 材料的法布里-珀罗谐振腔和 InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP 材料的 PIN 光探测器。为了能够实现多路波长的探测, 首先利用湿法腐蚀, 改变不同区域谐振腔的厚度, 然后通过二次外延完成谐振腔的生长, 最后利用低温缓冲层技术在 GaAs 材料上异质外延高质量的 InP 基的 PIN 结构。器件的工作波长位于 1500 nm 左右, 可实现对 4 路波长, 间隔为 10 nm 的光信号探测, 光谱响应线宽低于 0.8 nm, 峰值量子效率达到 12% 以上, 响应速率达到 8.2 GHz。实验测试结果与理论分析进行了对比, 并得到了很好的解释。

关键词 集成光学; 光探测器阵列; 多波长处理; 异质外延

中图分类号 TN36 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2362

A Wavelength Selective Monolithically Integrated Photodetector Array

Duan Xiaofeng Huang Yongqing Wang Qi Huang Hui Ren Xiaomin Wen Kai

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A wavelength selective monolithically integrated photodetector array is fabricated and characterized, which can be used for reconfigurable optical add-drop multiplexers. The integrated device consists of GaAs/AlGaAs Fabry-Pérot resonant cavities and InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP PIN photodetectors on the GaAs substrate. In order to achieve multiple channel routing detection, the thickness of GaAs-based resonant cavity is varied by wet etching, and then regrowth of the resonant cavities are accomplished by using the second epitaxy. High-quality heteroepitaxy is realized by employing a thin low-temperature buffer layer. The device is operated at a wavelength around 1500 nm for four channels with 10 nm interval. A spectral linewidth smaller than 0.8 nm, an external quantum efficiency of about 12%, and response rate of 8.2 GHz are simultaneously obtained in the device. The experiment result exhibits good agreement with the calculation.

Key words integrated optics; photodetector array; wavelength selective; heteroepitaxy

1 引言

可重构光分插复用(ROADM)技术在最近几年获得了很大的发展, ROADM 设备可以实现灵活的本地光波长上下路, 使网络具备重构功能, 因此逐渐成为光传送网(OTN)中的重要光节点设备。目前 ROADM 设备还都由基于光探测器和光学光纤等

分立器件构成, 器件的整体尺寸较大^[1~4]。基于阵列波导光栅(AWG)的平面集成化 ROADM 器件又存在工艺困难, 成本昂贵的问题^[5]。为此需要研制具有多波长处理功能的单片集成光电探测器阵列, 为进一步实现 ROADM 器件的大规模集成提供低成本的核心模块。

收稿日期: 2008-10-23; 收到修改稿日期: 2008-11-28

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314900)、国家 863 计划(2007AA03Z418)、高等学校学科创新引智计划(B07005)及教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0609)资助课题。

作者简介: 段晓峰(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事光通信技术和光电子器件等方面的研究。

E-mail: xiaofengduan@163.com

导师简介: 任晓敏(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信技术和光电子器件等方面的研究。

E-mail: xmren@bupt.edu.cn

1993年 Pezeshki 等^[6,7]研究了通过光波导和具有斜腔的法布里-珀罗(F-P)滤波器的耦合实现对光波长的选择;2003年 Gerken 等^[8,9]提出了利用非对称一维光子晶体实现对光波长的选择。这些方案都还需要通过分立的探测器对光信号进行处理。为了实现器件的低成本集成,提出了在具有阶梯腔的 GaAs 基 F-P 滤波器上异质外延 InP 基 PIN 光电探测器阵列的方案。在解决了对 F-P 滤波腔的纳米量级台阶的制作和 GaAs 材料上异质外延高质量 InP 材料的技术后^[10~12],成功实现了具有多波长处理功能的单片集成光电探测器阵列,器件的工作波长位于 1500 nm 左右,可实现对 4 路波长,间隔为 10 nm 的光信号探测,其响应线宽低于 0.8 nm,峰值量子效率达到 12% 以上,响应速率达到 8.2 GHz。

2 器件设计与理论分析

理论上利用传输矩阵方法设计器件的光学性能。信号光由底部入射,经过滤波器后进入 PIN 光电探测器。由于滤波器的谐振腔厚度周期性阶梯分布,由此实现相应台阶上的探测器对不同波长光的响应,图 1 为器件结构示意图。

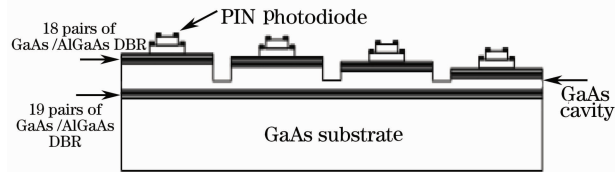


图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the device

对器件的光谱响应特性进行的理论仿真说明对应峰值量子效率的波长间隔由 F-P 腔的厚度差决定,厚度差越大,峰值波长间隔越大。图 2 为相邻 4 个 F-P 腔的厚度差为 20 nm 时,理论计算的光谱响应曲线及垂直入射与入射角为 3° 时响应谱线的变化。说明 F-P 腔的厚度差为 20 nm 时,可以达到峰值波长间隔为 10 nm 的要求。同时指出当入射光斜入射时,响应谱线将向短波方向移动。另外,光谱响应线宽主要取决于 GaAs 基滤波器的分布布拉格反射镜(DBR)对数,计算了 10,15,20 对 DBR 时,器件所对应的响应线宽分别为 5.4 nm,1.1 nm,0.3 nm,如图 3,说明 DBR 对数越多,响应线宽越窄。也就是说,器件响应线宽可以通过增加 DBR 对数而达到更窄。

异质结 PIN 光探测器的响应速率主要由耗尽

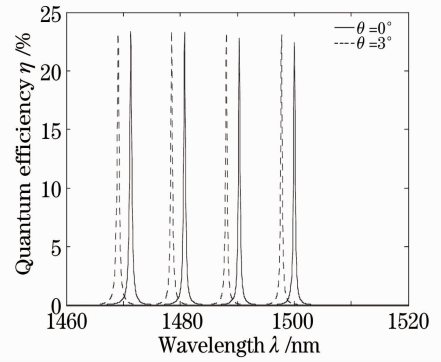


图 2 器件的仿真响应谱

Fig. 2 Calculated response spectrum of device with 0° and 3° of incidence

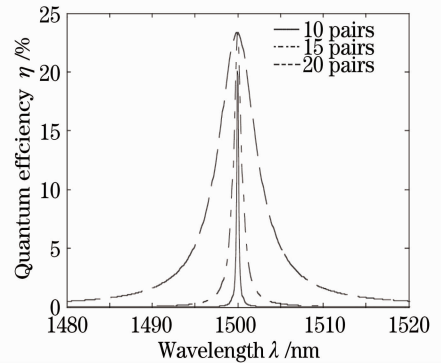


图 3 不同 DBR 对数对应的器件响应谱

Fig. 3 Calculated response spectrum of device with 10,15 and 20 pairs DBR

区的载流子渡越时间和器件的电容特性所决定。由于光生载流子中空穴的速度小于电子的速度,所以空穴速度决定了载流子渡越时间。受载流子渡越时间限制的 3 dB 带宽可表示为^[13]

$$f_{3\text{dB}} = 0.45 \cdot \frac{v_h}{L}, \quad (1)$$

式中 L 为整个耗尽层的厚度, v_h 为空穴的速度。可见减小耗尽层的厚度,受渡越时间限制的探测器的 3 dB 带宽会提高。然而,当耗尽层厚度下降时,电容会增大,从而成为基本的带宽限制因素,受电容限制的 3 dB 带宽为

$$f_{\text{RC}} = \frac{1}{2\pi R_T C} = \frac{L}{2\pi R_T \epsilon_r \epsilon_0 A}, \quad (2)$$

式中 ϵ_r, ϵ_0 分别为半导体的相对介电常数和真空介电常数, A 为器件的台面面积, R_T 为总电阻(负载电阻和接触电阻),从(1)式,(2)式可以看出,对于给定的 A 和 R_T ,存在一个最优的 L 使得器件获得最大的 3 dB 带宽。

针对不同的耗尽层厚度和台面面积,对光探测器器件高速性能进行了分析,计算中台面面积 A 对应

的入光孔径分别取 $15\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$, R_T 为 $30\ \Omega$ 。如图 4, 横轴对应耗尽层厚度, 纵轴为 3 dB 带宽。可以看出, 对于一定的台面面积, 当耗尽层厚度很小时, 电容成为基本的限制因素, 随着耗尽层厚度的增加, 载流子渡越时间成为限制带宽的主要因素。

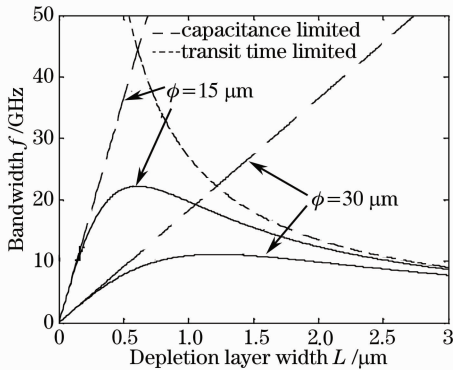


图 4 器件的响应带宽与耗尽层厚度的关系
Fig. 4 Schematic frequency response versus depletion width layer

表 1 器件层结构

Table 1 layer structure of the device

Material	Thickness / μm	Doping	Function
InP	0.12	Undoped	Cap
InGaAs	0.2	Zn	P^+
InP	0.24	Undoped	
InGaAs	0.4	Undoped	Absorber
InP	0.468	Undoped	
InGaAs	0.04	Undoped	
InP	0.256	Si	N^+
InGaAs	0.05	Undoped	
InP	1.272	Undoped	
InP	0.048	Undoped	LTB
GaAs	0.2	Undoped	Buffer
GaAs	375.00	Undoped	
AlGaAs	375.00	Undoped	
GaAs	1.6	Undoped	F-P cavity
GaAs	375.00	Undoped	
AlGaAs	375.00	Undoped	
GaAs	2.5	Undoped	Buffer
GaAs S. I. substrate			

3 器件制备

材料生长采用了 TSSEL 3×2 " CCS InP 低压金属有机物化学气相沉积(LP-MOCVD)设备, 三甲基铟(TMIn)和三甲基镓(TMGa)作为 III 族源, 砷烷(AsH_3)和磷烷(PH_3)作为 V 族源, 硅烷(SiH_4)和二乙基锌(DEZn)分别作为 n 型和 p 型掺杂源, 经过钯管(Pd-cell)纯化后的 H_2 作为载气。

整个器件是在半绝缘的 GaAs 衬底上外延生长而成, 整个器件层结构如表 1。生长过程可以分为 3 步。

第 1 步, 首先生长 500 nm 厚 GaAs 缓冲层, 然后是 F-P 腔底镜由 19 对 GaAs/AlGaAs 四分之一波长堆栈构成的 DBR 组成, 设计波长 $\lambda_0 = 1500\ \mu\text{m}$, 最后再生长 800 nm 厚的 GaAs 腔层。第 2 步, 用 $\text{V}(\text{H}_2\text{SO}_4) : \text{V}(\text{H}_2\text{O}_2) : \text{V}(\text{H}_2\text{O}) = (1:1:30)$ 腐蚀液在 GaAs 腔层表面腐蚀出高度差为 20 nm 的连续 4 个台阶, 台阶宽度为 $800\ \mu\text{m}$, 并周期排列。第 3 步, 经过清洗后, 首先再次生长 GaAs 腔层 800 nm, 18 对 GaAs/AlGaAs 的 DBR, 即 F-P 腔顶镜, 然后在 $450\ ^\circ\text{C}$ 的低温下生长 48 nm 的低温非晶缓冲层(LTB)^[10], 用以解决 InP 与 GaAs 的晶格失配, 失配度约 4%, 最后在 $650\ ^\circ\text{C}$ 的生长温度下完成 InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP 材料的 PIN 光电探测器的生长, 及 120 nm 的盖帽层。

使用 $\text{V}(\text{HCl}) : \text{V}(\text{H}_3\text{PO}_4) = (1:1)$ 腐蚀液去掉 120 nm 的 InP 盖帽层, 经过光刻处理, 并利用磁控溅射系统镀 Pt-Ti-Pt-Au 制作出环形 p 电极, 中心入光孔径为 $30\ \mu\text{m}$ 。通过湿法腐蚀方法制作出直径为 $42\ \mu\text{m}$ 的圆形上台面, 对 InP 和 InGaAs 材料的湿法腐蚀, 分别使用了 $\text{V}(\text{HCl}) : \text{V}(\text{H}_3\text{PO}_4) = (1:1)$ 腐蚀液和 $\text{V}(\text{H}_2\text{SO}_4) : \text{V}(\text{H}_2\text{O}_2) : \text{V}(\text{H}_2\text{O}) = (1:1:2)$ 腐蚀液^[14]。再次经过光刻处理和磁控溅射制作出 n 电极, 并腐蚀出 $61\ \mu\text{m} \times 64\ \mu\text{m}$ 的矩形下台面。器件用聚酰亚胺进行钝化, 然后镀 Ti-Au 作为引出电极。经过减薄抛光, 器件制作完毕。完整器件的光学显微镜图像如图 5。



图 5 探测器阵列的光学显微镜图像
Fig. 5 Optical microscope image of the device

4 测试与分析

利用 Bede QC200 型双晶 X 射线衍射(DCXRD)系统对生长完的外延片平面进行了 XRD 扫描, 如图 6 所示。左边的峰 B 对应于 InP 基材料, 此峰的半高峰全宽是 $480''$, 这说明 InP 基的 PIN 结构外延层有着很好的晶体质量。左边的扩展 A 是由于掺杂引起的晶格常数变大。右边的双峰对应 GaAs 基滤波器结构, 侧峰 C 是 AlGaAs 峰, 是由

AlGaAs 晶格常数稍大于 GaAs 引起的。卫星峰 S 是 DBR 周期性结构在 X 射线衍射图样上的反映。

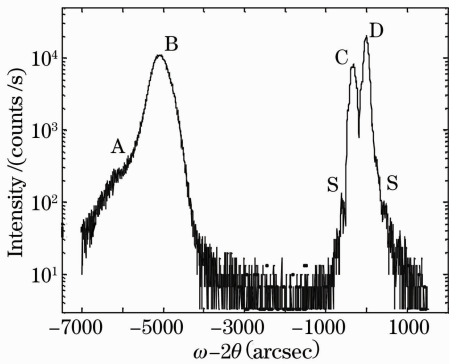


图 6 外延片的 XRD $\omega-2\theta$ 扫描图

Fig. 6 Double crystal X-ray diffraction $\omega-2\theta$ scans

器件光谱响应的测试光源为线宽 150 kHz 的 3642CR00 可调谐激光器,光源经自聚焦棒从探测器的背面入射。探测器经探针和负载电阻串联,负载两端电压经电压计通过 GPIB 接口由计算机自动控制。入射光功率为 0.6 mW,在 3 V 的反向偏压下,响应谱线如图 7 所示。从图可以看出,在一个周期内对应峰值量子效率的波长分别为 1469.2 nm, 1479.4 nm, 1486.8 nm, 1497.4 nm。与图 2 给出的理论计算值基本一致,仅稍有差异,一个主要因素是 F-P 腔的厚度在生长或刻蚀时引入了误差,另一个因素是测试中光源入射角度的偏差,导致峰值波长向短波方向移动。各峰值波长所对应的峰值量子效率基本一致,均保持在 12% 以上,器件响应线宽也低于 0.8 nm。这与理论计算的峰值量子效率达到 23% 是有差距的,主要原因来自于测试中的系统损耗,以及器件内部界面态和缺陷态的存在,它们大量消耗了光生载流子。器件响应线宽与理论计算结果基本保持一致。器件的量子效率主要由 400 nm 厚的 InGaAs 吸收层所决定,为了增大量子效率,可以采用更厚的吸收层,或采用谐振腔增强型(RCE)探测器结构^[13]。

测量器件的高速响应采用频域法。将可调谐激光器的输出波长调至探测器的峰值响应波长,可调谐激光器输出的光经过 HP8703A 光波器件分析仪调制后由光纤输入光探测器。通过微波探针将光探测器的输出电信号转换为全向增益线(SMA)接口信号,电信号送至光波器件分析仪的电输入端口,从光波器件分析仪上读出测量结果。光探测器的直流偏置由偏置适配器通过高频电缆加到光探测器上。器件频率响应带宽的测试结果如图 8 所示,外加反

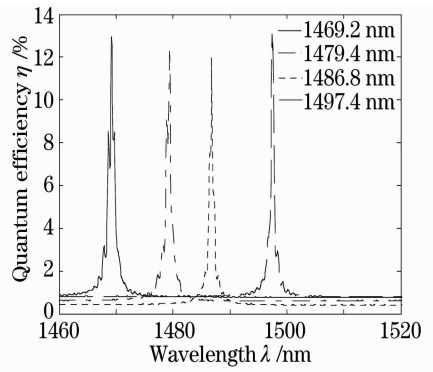


图 7 器件的响应谱

Fig. 7 Measured response spectrum of the device

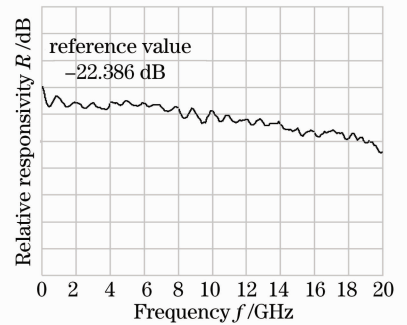


图 8 器件的响应带宽

Fig. 8 Measured frequency response of the device

向偏压 3 V,测得 3 dB 带宽为 8.2 GHz。由前面的理论分析得出,器件的高速特性主要由电容的 RC 时间常数限定,从图 4 看出器件 3 dB 带宽最大值为 10 GHz 左右。如果想提高器件的响应速率,可以通过减小台面面积,或者利用特殊图案透明欧姆接触电极等方法来实现。

5 结 论

设计并研制了具有多波长处理功能的单片集成光电探测器阵列,器件的工作波长位于 1500 nm 左右,可实现对 4 路波长,间隔为 10 nm 的光信号探测,响应线宽低于 0.8 nm,峰值量子效率达到 12% 以上,响应速率达到 8.2 GHz。作为 ROADM 设备的核心模块,大幅提高了 ROADM 设备的集成度,降低了设备的复杂度和成本,提高了设备的可靠性。应用前景广阔,可在以波分复用(WDM)技术为基础的下一代光网络和光接入网系统中发挥作用。

参 考 文 献

1 K. Okamoto, K. Takiguchi, Y. Ohmori. 16-channel optical add-drop multiplexer using silica based arrayed-waveguide gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9): 723~724
 2 C. G. M. Vreeburg, T. Uitterdijk, Y. S. Oei *et al.*. First InP-

- based reconfigurable integrated add-drop multiplexer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(2): 188~190
- 3 C. R. Giles, B. Barber, V. Aksyuk *et al.*. Reconfigurable 16-channel WDM drop module using silicon MEMS optical switches [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 63~65
- 4 Q. Huang, F. Luo, Z. Wang *et al.*. Parallel-stage-based reconfigurable optical add-drop multiplexer for WDM optical transport networks[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(17): 1864~1866
- 5 K. -T. Shiu, S. S. Agashe, S. R. Forrest. An InP-based monolithically integrated reconfigurable optical add-drop multiplexer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1445~1447
- 6 B. Pezeshki, F. K. Tong, J. A. Kash *et al.*. Tapered Fabry-Perot waveguide optical demultiplexer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(9): 1082~1085
- 7 B. Pezeshki, F. K. Tong, J. A. Kash *et al.*. Vertical cavity devices as wavelength selective waveguides [J]. *IEEE J. Lightwave. Technol.*, 1994, **12**(10): 1791~1801
- 8 M. Gerken, D. Miller. Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1330~1345
- 9 M. Gerken, D. Miller. Monolithically thin-film stacks with steplike spatial beam shifting [J]. *IEEE J. Lightwave. Technol.*, 2004, **22**(2): 338~342
- 10 Jihe Lü, Hui Huang, Xiaomin Ren *et al.*. Monolithically integrated long-wavelength tunable photodetector[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(3): 338~342
- 11 Deping Xiong, Xiaomin Ren, Qi Wang *et al.*. Heteroepitaxial growth of InP/GaAs (100) by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 422~425
- 12 Qi Wang, Jihe Lu, Deping Xiong *et al.*. Metamorphic In_{0.53}Ga_{0.47}As p-i-n photodetector grown on GaAs substrates by low-pressure MOCVD[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 358~360
- 13 M. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2): 607~639
- 14 Wenjuan Wang, Xiaomin Ren, Hui Huang *et al.*. Tunable photodetector based on GaAs/InP wafer bonding [J]. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, 2006, **27**(10): 827~829