

基于低温缓冲层的单片集成长波长可调谐光探测器^{*}

吕吉贺[†] 黄 辉 任晓敏 苗 昂 李轶群 王 睿 黄永清 王 琦

(北京邮电大学, 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 实现了一种单片集成的长波长可调谐光探测器. 通过外延实验, 摸索出低温缓冲层的最佳生长条件, 成功地在 GaAs 衬底上生长出晶格失配度约 4% 的高质量的 InP 基材料. 基于此低温缓冲层, 在 GaAs 衬底上首先生长 GaAs/AlAs 材料的 F-P 腔滤波器, 然后异质外延 InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP 材料的 PIN 结构. 制作出的器件通过热调谐, 峰值波长从 1533.1nm 红移到 1543.1nm, 实现了 10.0nm 的调谐范围, 同时响应线宽维持在 0.8nm 以下, 量子效率保持在 23% 以上, 响应速率达到 6.2GHz.

关键词: 异质外延; 可调谐; 光电探测器

EEACC: 7230C

中图分类号: TN3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1807-04

1 引言

具有波长选择性的可调谐光探测器是波分复用(WDM)光纤通信系统的关键器件之一^[1~6]. 目前为止报道的可调谐探测器中, 要么所选波长的谱线太宽(>4nm)^[1~5], 要么调谐范围太窄(<6nm)^[6].

另外, 对于具波长选择性的光探测器来说, 需要有能够和衬底材料晶格匹配的, 同时又具有很大折射率差的两种材料来构成分布式布拉格反射镜(DBR). 而对于长波长 InP 基材料来说, 目前可提供的材料很难满足大折射率差这一要求^[7,8]. 相对来说, GaAs/AlAs 材料的 DBR 却因拥有大折射率差而得到广泛应用^[9]. 也正因为如此, 目前为止, 有人利用 InP/空气隙 DBR 技术制作了谐振腔增强型探测器^[10], 有人通过把 InP 基有源材料和 GaAs/AlAs 材料的 DBR 键合在一起制作了可调谐探测器^[11], 还有人在 InP 材料上外延生长 GaAs/AlAs 材料的 DBR 制作了垂直腔面发射激光器(VCSEL)^[12].

InP 和 GaAs 是两种发展最成熟的 III-V 族化合物半导体. 人们很希望能够把 InP 的卓越高速性能和光学性能与 GaAs 的大尺寸、低价位的优点结合起来. 我们通过异质外延实验, 摸索出低温缓冲层的最佳生长条件, 成功地在 GaAs 衬底上生长出高质量的晶格失配度约 4% 的 InP 基材料. 基于此我们在 GaAs 衬底上首先生长了 GaAs/AlAs 的 F-P 腔

(含有两个 GaAs/AlAs 材料的 DBR), 然后利用低温缓冲层技术成功外延生长了 InP 基的 PIN 探测器结构. 这种单片集成的探测器, 具有大调谐范围(10.0nm)、窄线宽(0.8nm)的特点, 同时, 量子效率可以达到 23%, 响应速率为 6.2GHz.

2 材料生长

为了研究低温缓冲层厚度以及生长温度对于大失配异质外延的影响, 我们选用了两组实验、8 个样品进行研究, 实验中利用了 Bede QC200 型仪器进行了双晶 X 射线衍射(DCXRD), 还使用 Philips 公司的 PLM-100 光致发光光谱仪(PL), JEOL 公司的 JEM-3010 透射电子显微镜(TEM) 进行各项指标的度量.

生长采用 3X2" CCS InP 低压金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备. 具体生长过程如下: 第一步, 生长 500nm GaAs buffer 层, 在此基础上在低温下生长 InP 非晶缓冲层; 第二步, 提升到正常生长温度 650℃ 依次生长 InP 400nm、与 InP 晶格匹配的 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层 140nm 及 InP 盖帽层 50nm.

第一组 5 个样品固定低温缓冲层的生长温度, 调节生长时间, 测试结果如表 1 所示.

通过比较可以看出, 样品 2 展示了最好的 InP 基外延层的 DCXRD 与 PL 的测量结果(744.4 μ m 与 53.9meV). 随后固定生长时间为 35s, 调节低温缓冲层的生长温度进行第二组实验, 结果如表 2 所示.

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB314901), 国家自然科学基金(批准号: 60576018, 90601002)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA03Z416)资助项目

[†] 通信作者. Email: lvjihe@gmail.com

2007-05-13 收到, 2007-06-21 定稿

表 1 采用低温缓冲层方案表征的 DCXRD 衍射峰的半高全宽(FWHM)和 PL 谱的 FWHM

Table 1 Low temperature buffer layer scheme, FWHM of XRD peak and PL spectrum peak

Sample No.	Low temperature InP buffer layer	XRD FWHM of epitaxy layers /($^{\circ}$)	PL FWHM /meV
1	400 $^{\circ}$ C ,25s	817.2	72.2
2	400 $^{\circ}$ C ,35s	744.4	53.9
3	400 $^{\circ}$ C ,70s	843.5	61.9
4	400 $^{\circ}$ C ,120s	1198.4	65.7
5	400 $^{\circ}$ C ,300s	1305.4	64.6

表 2 采用低温缓冲层方案表征的 DCXRD 衍射峰的半高全宽(FWHM)和 PL 谱的 FWHM

Table 2 Low temperature buffer layer scheme, FWHM of XRD peak and PL spectrum peak

Sample No.	Low temperature InP buffer layer	XRD FWHM of epitaxy layers /($^{\circ}$)	PL FWHM /meV
6	350 $^{\circ}$ C ,35s	1334.2	56.2
2	400 $^{\circ}$ C ,35s	744.4	53.9
7	450 $^{\circ}$ C ,35s	512.0	51.7
8	500 $^{\circ}$ C ,35s	541.9	55.9

由此我们确定 450 $^{\circ}$ C ,35s(厚度约 18nm)为低温缓冲层的最佳生长条件,此时的透射电子显微镜(TEM)图像如图 1 所示,可以看出,低温缓冲层有效地阻止了位错的产生.

整个探测器结构是在 GaAs 基的 F-P 腔滤波器上外延生长出 InP 基的 PIN 结构,器件结构如图 2 所示.

整个器件是在半绝缘型的 GaAs 衬底上,利用 MOCVD 外延生长而成.具体外延过程如下:首先生长 F-P 腔结构,包括底镜、两波长(设计波长 $\lambda_0 = 1.53\mu\text{m}$)厚的 GaAs 腔层、顶镜.其中,底镜和顶镜都是由 20 对 GaAs/AlAs 四分之一波长堆栈构成的 DBR.然后在 450 $^{\circ}$ C 的低温下生长 18nm 厚的低温非晶缓冲层,然后回到正常生长温度 650 $^{\circ}$ C 下生长 950nm 的 InP 层,然后生长 100nm 的 InGaAsP 腐

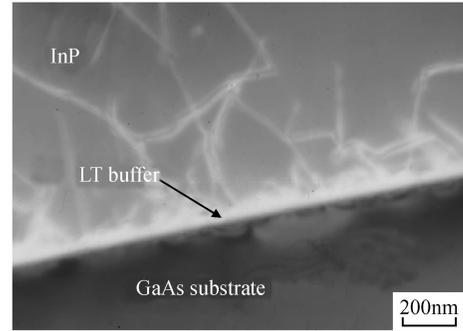


图 1 InP/GaAs 异质外延界面的 TEM 图像
Fig.1 TEM scheme of the InP/GaAs interface

蚀阻挡层.最后生长 PIN 结构,即依次生长 500nm 的 n 型 InP 电接触层,500nm 的 InGaAsP 隔离层,340nm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层,200nm 的 InP 隔离层和 200nm 的 p 型 InGaAs 电接触层.

我们对生长完的外延片(004)平面进行了 XRD 扫描,如图 3 所示.左边的峰 B 对应于 InP 基材料,此峰的半高宽是 416 $^{\circ}$,这说明了 InP 基的 PIN 结构外延层有着很好的晶体质量.左边的突起 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 AlAs 峰,是因 AlAs 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.

3 器件制备

器件制作过程如下:首先光刻腐蚀出 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 上台面和 $60\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ 下台面,用聚酰亚胺进行钝化.然后镀上材料为 Pt-Ti-Au 的上下电极,电极呈环形以减少接触面积,提高响应速率.最后,在下台面的两侧腐蚀出两个窗口,用 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 7$ 腐蚀到滤波腔的 GaAs 腔层,在腐蚀出的凹面镀上调谐电极.最后减薄抛光,器件制作完毕.完整器件的光学显微镜图像如图 4 所示.

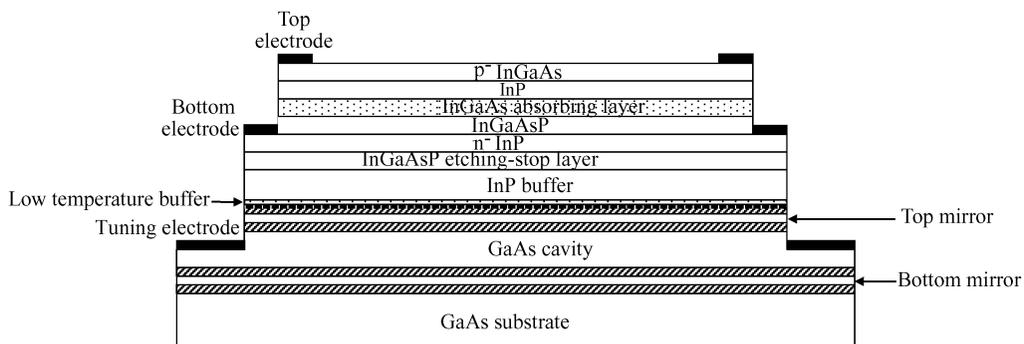


图 2 器件结构示意图
Fig.2 Schematic structure of the photodetector

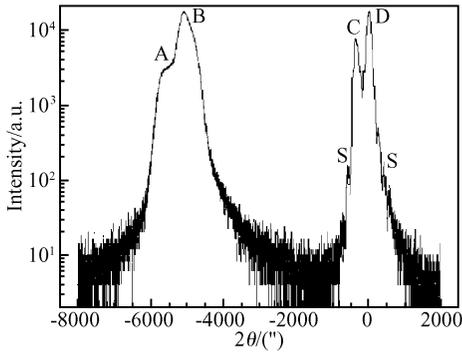


图 3 外延片的 XRD $\omega-2\theta$ 扫描图样

Fig.3 Double crystal X-ray diffraction $\omega-2\theta$ scans

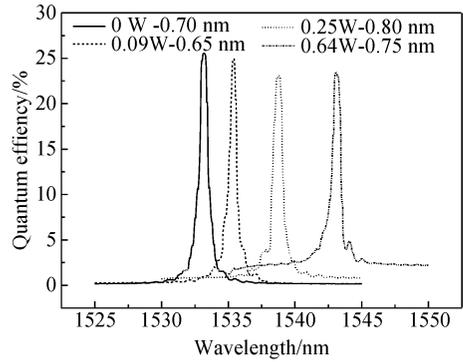


图 5 器件的响应谱

Fig.5 Measured spectral response

4 测试与分析

光电子器件的调谐一般是利用材料的量子阱受限斯塔克效应、载流子注入、热膨胀、Keer 效应^[13]. 在我们所用的调谐方式中,利用直流电压源直接对深入滤波器中的调谐电极进行加压.当所加电压较小时,主要呈现载流子注入特性.随着电压增大,热调谐和电调谐同时起作用,电流增大,温度升高,相应的 GaAs 折射率变大,对应滤波峰值波长红移.

测试光源线宽 150kHz 的 3642CR00 可调谐激光器,光源经自聚焦棒从探测器的背面入射.探测器经探针和反向偏压以及负载电阻串联,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 0.6mW,在 3V 的反向偏压下,响应谱线如图 5 所示.

从图中可以看出,所加功耗 90,250 和 640mW 时,峰值波长向长波长方向分别产生了 2.2,5.6 和 10.0nm(1533.1~1543.1nm)的红移.同时器件的量子效率基本没有恶化,保持在 23% 以上,器件响应线宽也维持在 0.8nm 以内.

器件量子效率主要由 340nm 厚的 InGaAs 吸收层决定,为了增大量子效率,可以采用更厚的吸收

层.此外采用 p 型接触层上加斜镜结构^[14]可以在保持吸收层厚度不变的情况下,增大量子效率.

暗电流也是探测器测试中的一项重要指标,器件反向偏压的增大有助于提高探测器响应,但同时也会导致噪声电流的增大,具体测量如图 6 所示.由图可见,在反向偏压从 0 增加到 2.4V 的过程中,光生电流呈线性增大趋势,此时暗电流略有增大趋势,当偏压在 2.6V 时,器件光生电流达到饱和,继续增大反偏,暗电流增大,光生电流开始不变甚至略有下降.器件的高速响应主要由光生载流子渡越时间以及

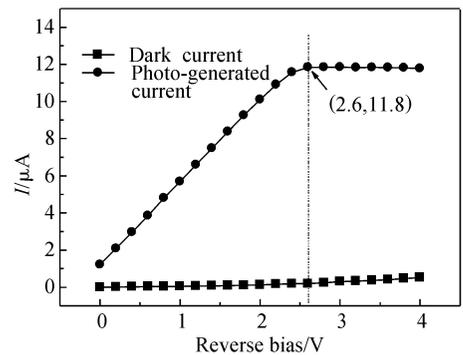


图 6 暗电流、光生电流和反向偏压的关系

Fig.6 Dark current and photo-generated current are related to the reverse bias voltage

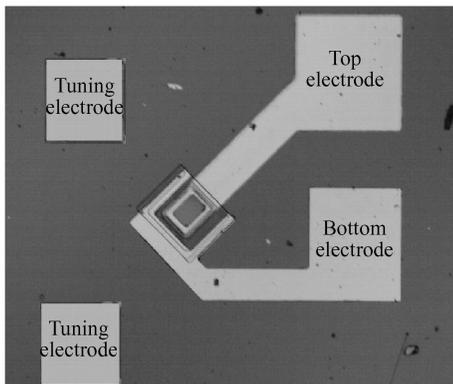


图 4 光探测器的光学显微镜图像

Fig.4 Optical microscope image of the photodetector

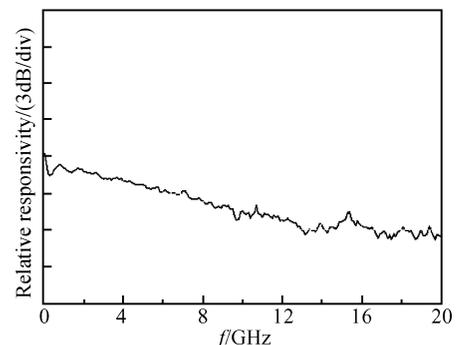


图 7 器件的响应带宽

Fig.7 Bandwidth of the device

PIN 的电容电阻特性决定. 我们的器件带宽主要由 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的器件台面所决定的电容电阻特性决定^[10], 所以, 如果想提高器件的响应速率, 可以减小台面面积来实现.

响应带宽测试采用可调谐激光器和光波器件分析仪(HP 8703A). 外加反向偏压 3V, 测试 1533nm 波长下的响应带宽. 测得 3dB 带宽为 6.2GHz, 如图 7 所示.

5 结论

实现了一种单片集成的长波长可调谐光探测器. 通过引入低温缓冲层, 在 GaAs 衬底上首先生长 GaAs/AlAs 的 F-P 腔滤波器, 然后异质外延 InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP 的 PIN 结构. 通过热调谐, 峰值波长从 1533.1nm 红移到 1543.1nm, 实现了 10.0nm 的调谐范围, 同时, 响应线宽维持在 0.8nm 以下, 量子效率保持在 23% 以上, 响应速率达到 6.2GHz. 器件将有望在 WDM 光纤通信系统中得到应用. 进一步优化结构参数, 性能有望进一步提高.

参考文献

- [1] Christenson G L, Tran A T T D, Zhu Z H, et al. Long-wavelength resonant vertical-cavity LED/photodetector with a 75-nm tuning range. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(6):725
- [2] Seassal C, Leclercq J L, Letartre X, et al. InP-based micro-mechanical tunable and selective photodetector for WDM systems. *Proc SPIE*, 1997, 3008:62
- [3] Shi Y, Zhao J H, Sarathy J, et al. Tunable resonant cavity enhanced photodetectors with GaInAsSb/AlGaAsSb multiple quantum well structure grown by molecular beam epitaxy. *Electron Lett*, 1997, 33(17):1498
- [4] Shi Y, Zhao J H, Sarathy J, et al. Tunable photodetectors based on strain compensated GaInAsSb/AlGaAsSb multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy. *IEEE Trans Electron Devices*, 1997, 44(12):2167
- [5] Mao R W, Li C B, Zuo Y H, et al. Fabrication of low cost Si-based tunable high performance resonant cavity enhanced photodetectors. *Proc 1st IEEE Int Conf Group IV Photon*, 2004:104
- [6] Sarathy J, Anselm K A, Streetman B G, et al. Narrow linewidth, tunable distributed feedback photodetector. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(21):3123
- [7] Dentai A G, Kuchibhotla R, Campbell J C, et al. High quantum efficiency, long wavelength InP/InGaAs microcavity photodiode. *Electron Lett*, 1991, 27:2125
- [8] Dodabalapur A, Chang T Y. Resonant-cavity InGaAlAs/InAlAs phototransistors with high gain for 1.3~1.6 μm . *Appl Phys Lett*, 1992, 60:929
- [9] Mondry M J, Babit D I, Bowers J E, et al. Refractive indexes of (Al, GaIn)As epilayers on InP for optoelectronic applications. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1992, 4:627
- [10] Huang H, Huang Y, Wang X, et al. Long wavelength resonant cavity photodetector based on InP/air-gap Bragg reflectors. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(1):245
- [11] Wang W, Ren X, Huang H, et al. Tunable Photodetector Based on GaAs/InP wafer bonding. *IEEE Electron Device Lett*, 2006, 27(10):827
- [12] Yuen W, Li G S, Nabiev R F, et al. High-performance 1.6 μm single-epitaxy top-emitting VCSEL. *Electron Lett*, 2000, 36(13):1121
- [13] Kotlyar M V, O'Faolain L, Krysa A B, et al. Electrooptic tuning of InP-based microphotonic Fabry-Pérot filters. *J Lightw Technol*, 2005, 23(6):2169
- [14] Huang H, Ren X, Wang X, et al. Theory and experiments of a tunable wavelength-selective photodetector based on a taper cavity. *Appl Opt*, 2006, 45(33):8448

A Monolithic Integrated Long-Wavelength Tunable Photodetector Based on a Low Temperature Buffer Layer*

Lü Jihe[†], Huang Hui, Ren Xiaomin, Miao Ang, Li Yiqun, Wang Rui, Huang Yongqing, and Wang Qi

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of MEC, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: We demonstrate a tunable long-wavelength photodetector by using a heteroepitaxy growth of an InP-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP p-i-n structure on a GaAs-based GaAs/AlAs Fabry-Perot filter structure. High quality heteroepitaxy is realized by employing a thin low-temperature buffer layer, which is carried out in a series of experiments. A wavelength tuning range of 10.0nm, an external quantum efficiency of about 23%, a spectral linewidth of 0.8nm, and a 3dB bandwidth of 6.2GHz are simultaneously obtained in the device.

Key words: heteroepitaxy; tunable; photodetector

EEACC: 7230C

Article ID: 0253-4177(2007)11-1807-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314901), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60576018, 90601002), and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z416)

[†] Corresponding author. Email: lvjihe@gmail.com

Received 13 May 2007, revised manuscript received 21 June 2007