

文章编号: 0258-7025(2004)12-1487-04

新型长波长 InP 基谐振腔增强型 光探测器

王 琦, 黄 辉, 王兴妍, 黄永清, 任晓敏

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要 介绍了一种新型长波长 InP 基谐振腔增强型(RCE)光探测器。通过 $V(\text{FeCl}_3) : V(\text{H}_2\text{O})$ 溶液对 InGaAs 牺牲层的选择性湿法腐蚀, 制备出具有 InP/空气隙的高反射率分布布拉格反射镜(DBR), 并将该选择性湿法腐蚀技术成功地应用到长波长 InP 基谐振腔增强型光探测器的制备中去, 从而彻底解决了 InP/InGaAsP 高反射率分布布拉格反射镜难以外延生长的问题。所制备出的谐振腔增强型光探测器, 其台面面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 底部反射镜为 1.5 对的 InP/空气隙分布布拉格反射镜, 顶部反射镜靠 InGaAsP 与空气的界面反射来实现。测试结果表明, 该谐振腔增强型光探测器在波长 $1.510 \mu\text{m}$ 处获得了约 59% 的峰值量子效率, 在 3 V 反偏压下暗电流为 2 nA, 3 dB 响应带宽达到 8 GHz。

关键词 光电子学; 谐振腔增强型光探测器; 空气隙; 选择性湿法腐蚀

中图分类号 TN 364⁺.2; TN 929.11 **文献标识码** A

Novel InP-Based Resonant Cavity Enhanced Photodetectors for Long-Wavelength Applications

WANG Qi, HUANG Hui, WANG Xing-yan, HUANG Yong-qing, REN Xiao-min

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A novel long-wavelength InP-based resonant cavity enhanced (RCE) photodetector is introduced. High-reflectivity InP/air gap distributed Bragg reflectors (DBRs) have been fabricated by the selective wet etching of InGaAs sacrificial layers with $\text{FeCl}_3 : \text{H}_2\text{O}$ solution. And the technique has been successfully applied to the fabrication of long-wavelength InP-based RCE photodetector. Thus the problem, the unachievable epitaxy of high-reflectivity InP/InGaAsP DBR, is resolved. The mesa area of this type RCE photodetector is $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, the bottom mirror is 1.5 pairs InP/air gap DBR, the interface reflection of the air and InGaAsP layer serves as the top mirror. The measurement results show that the quantum efficiency of 59% at $1.510 \mu\text{m}$ wavelength, the dark current of 2 nA at 3 V reverse bias, and the 3 dB bandwidth of 8 GHz have been achieved.

Key words optoelectronics; resonant cavity enhanced photodetector; air gap; selective wet etching

1 引 言

随着高速、大容量光纤通信系统的飞速发展, 具有高速、高量子效率、窄光谱响应线宽以及探测波长可调谐等特性的谐振腔增强型(RCE)光探测器将在光通信系统中得到越来越广泛的应用^[1]。

到目前为止, 已通过外腔镜结构和集成液晶层^[2]实现了谐振腔增强型光探测器峰值响应波长的调谐; 通过一镜斜置三镜腔结构^[3]实现了谐振腔增强型光探测器的滤波腔和吸收腔之间的解耦, 使谐振腔增强型光探测器同时获得了高的量子效率和窄的光谱响应线宽。但要制备工作波长处于光通信波

收稿日期: 2003-09-15; 收到修改稿日期: 2003-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(90201035)和国家 863 计划(2001AA312290)资助项目。

作者简介: 王 琦(1976—), 男, 黑龙江大庆人, 北京邮电大学光通信中心博士研究生, 主要从事密集波分复用光纤通信系统中的集成解复用接收技术的研究。E-mail: wangqi-wq@263.net

长窗口(1.3 μm 和 1.55 μm)的 InP 基高速、高量子效率的谐振腔增强型光探测器仍存在一定的难度^[4]。

由于 InP/InGaAsP 材料间的折射率差较小,为了获得具有高反射率的分布布拉格反射镜(DBR),就要求组成分布布拉格反射镜的介质膜对数很多,器件的外延生长很难实现。目前,为了实现具有高反射率分布布拉格反射镜的 InP 基光电器件已采用的方法有:在 InP 基材料上外延生长准晶态的 GaAs/AlGaAs 的分布布拉格反射镜^[5,6];将 InP 基的吸收层材料与 GaAs 基的分布布拉格反射镜直接键合^[7,8]等;与上述两种方法相比,利用选择性湿法腐蚀技术在 InP 基材料上制备基于 InP/空气隙的高反射率分布布拉格反射镜结构具有工艺相对简单、成本低廉的优势,目前已经实现了基于该技术和该结构的可调谐 F-P 腔光滤波器和长波长垂直腔面发射激光器(VCSEL)^[9,10]。但是对于具有 InP/空气隙分布布拉格反射镜结构的谐振腔增强型光探测器,尚少见报道。

本实验中通过研究 InP/InGaAs 材料的选择性湿法腐蚀,制备出基于 InP/空气隙的分布布拉格反射镜,并且将该分布布拉格反射镜结构引入到谐振腔增强型光探测器中,所制备的长波长 InP 基谐振腔增强型光探测器获得了较好的实验结果。

2 器件结构设计与制备方法

器件的外延结构如图 1 所示,它是利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在半绝缘(100) InP 衬底上外延生长而成的。首先生长了 500 nm 的 InP 缓冲层,接着生长由 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 组成的底部反射镜。通过选择性腐蚀去除 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 牺牲层后,形成了光学厚度分别为 $\lambda/4, \lambda(3/4)$ 和 $\lambda/4$ 的空气隙/InP/空气隙分布布拉格反射镜结构,该分布布拉格反射镜的中心波长设计在 1.55 μm 。在底部反射镜上继续生长 112 nm 厚的 InP 保护层,400 nm 厚的 p 掺杂 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 底电极接触层,140 nm 厚的 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 本征隔离层,300 nm 厚的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 本征吸收层,350 nm 厚的 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 本征隔离层以及 300 nm 厚的 n 掺杂 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 顶电极接触层。当利用选择性湿法腐蚀制备 InP/空气隙的底部反射镜时,112 nm 厚的 InP 保护层保证光探测器的 PIN 结构与腐蚀液隔离。谐振腔的

顶部反射镜靠 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 材料与空气的界面反射来实现,在波长 1.55 μm 时,经过计算其反射率约为 0.27;1.5 对 InP/空气隙的底部反射镜的反射率经过计算约为 0.95。

$n\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$	300 nm
$i\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$	350 nm
$i\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	300 nm
$i\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$	140 nm
$p\text{-In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$	400 nm
Undope-InP	112 nm
Undope- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	387 nm
Undope-InP	367 nm
Undope- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	387 nm
Undope-InP buffer	500 nm
Undope-InP substrate	

图 1 器件的外延结构

Fig. 1 Schematic diagram of the epitaxy layer profile

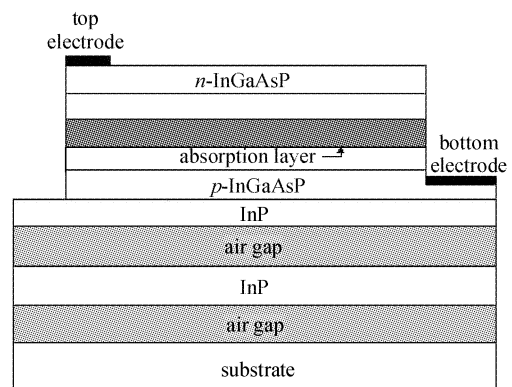


图 2 器件的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the device structure

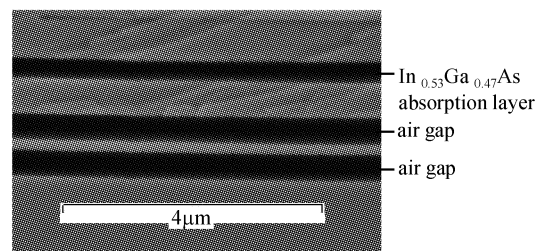


图 3 InP/空气隙分布布拉格反射镜结构的扫描电镜图像

Fig. 3 SEM cross section of InP-air gap structure

器件结构如图 2 所示。选用 $V(\text{FeCl}_3) : V(\text{H}_2\text{O}) = 1:1$ 溶液作为腐蚀液,器件台面在沉积了 $\text{SiN}_x\text{O}_{1-x}$ 掩膜后,接着在其两侧纵向刻蚀小孔,腐蚀液通过小孔横向腐蚀底镜中的两层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料,于是就在器件台面下形成了 1.5 对的 InP/空气隙分布布拉格反射镜结构。InP/空气隙分布布拉

格反射镜结构的扫描电镜(SEM)图像如图 3 所示。

3 实验结果及分析

对于异质结 PIN 光探测器,限制其响应速率的主要因素有:载流子在耗尽层的渡越时间;固有电容和寄生电容的充放电时间;非耗尽层中载流子的扩散时间;异质结的电荷俘获时间。由于 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3}$ 本征隔离层材料的带隙要比 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 本征吸收层材料的带隙更宽,使其对所需要探测波长的光没有吸收,这样就可以忽略非耗尽层内载流子扩散时间对响应速率的限制;同时在器件结构的设计过程中避免异质结材料之间的带隙差过大,并且使异质结处于耗尽层的强电场中,因此异质结的电荷俘获时间对响应速率的限制也可以忽略。对于本实验中所制备的谐振腔增强型光探测器,光生载流子在耗尽层的渡越时间以及器件的固有电容充放电时间成为限制器件响应速率的主要因素^[11]。对图 1 所示的器件结构,器件台面面积为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 时,计算得到的 3 dB 响应带宽约为 7.5 GHz。

利用传输矩阵法,同时考虑金属有机化学气相沉积外延生长带来的厚度偏差,对器件的光谱响应进行模拟。此外还结合光栅单色仪和锁相放大器对器件在 3 V 反偏压下的光谱响应进行测试。结果如图 4 所示。

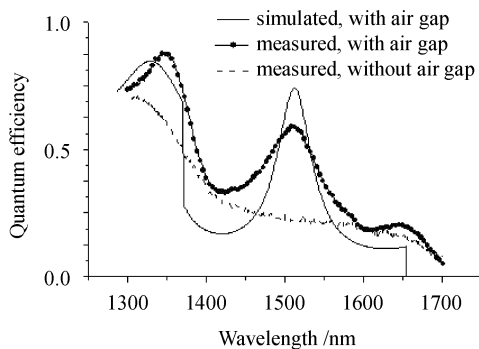


图 4 器件的模拟和实测光谱响应

Fig. 4 Simulated and measured spectral response of the photodetector

由图 4 可知,实验结果与理论分析基本吻合,器件在 1510 nm 波长处的峰值量子效率约为 59%,半峰全宽(FWHM)约为 65 nm。实验结果表明通过选择性湿法腐蚀制备的 InP/空气隙成功地实现了谐振腔增强型光探测器中分布布拉格反射镜的功能。如果能在器件台面上沉积 Si/SiO₂ 介质薄膜分

布布拉格反射镜,则能大大提高顶镜反射率,进一步提高器件的量子效率、降低器件的半峰全宽。

在室温、无光照条件下对器件的 I - V 特性进行测试,结果如图 5 所示。由图 5 可知,器件在 3 V 反偏压下,暗电流低至 2 nA,暗电流密度为 $8 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。

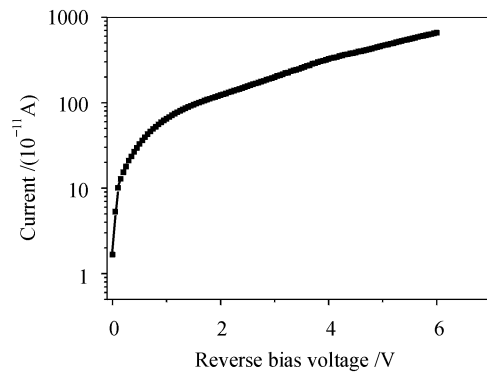


图 5 器件的暗电流特性曲线

Fig. 5 Dark current versus reverse bias voltage in the photodetector

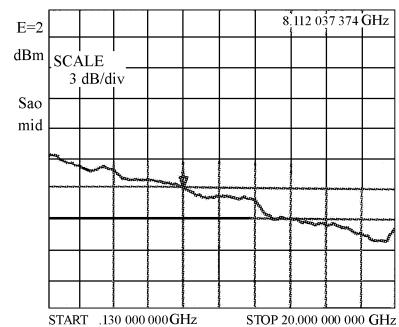


图 6 器件的响应带宽

Fig. 6 Measured frequency response of the photodetector

利用 HP8703A 型光波元件分析仪,在 3 V 反偏压下,对器件的响应带宽进行测试,结果如图 6 所示。由图 6 可知,器件的 3 dB 带宽达到 8 GHz。如进一步通过减小器件台面面积、优化器件结构来降低器件的电容和电阻,还可以大大提高器件的 3 dB 响应带宽。

4 结 论

利用选择性湿法腐蚀技术成功实现了具有 InP/空气隙分布布拉格反射镜结构的谐振腔增强型光探测器。所制备出的长波长 InP 基谐振腔增强型光探测器,在波长 1.510 μm 处获得了约 59% 的峰值量子效率,在 3 V 反偏压下暗电流为 2 nA,3 dB

响应带宽达到 8 GHz,其中器件的台面面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Yuxin Zhou, Julian Cheng. 1-Gb/s-per-channel wavelength division multiplexed optical interconnect using wavelength-graded VCSEL and resonant photodetector arrays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6):740~742
- 2 Huang Hui, Cheng Buwen, Huang Yongqing *et al.*. Experimental study on the tunable RCE photodetectors with builtin liquid-crystal layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):908~910
黄 辉,成步文,黄永清等.集成液晶可调谐 RCE 光电探测器的实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):908~910
- 3 Huang Hui, Zhang Ruikang, Wang Qi *et al.*. Experimental study on one-mirror-inclined three-mirror-cavity photodetectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(6):440~444
- 4 A. G. Dental, R. Kuchibhotla, J. C. Campbell *et al.*. High quantum efficiency, long wavelength InP/InGaAs microcavity photodiode [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(23):2125~2126
- 5 L. Goldstein, C. Fortin, C. Stark *et al.*. GaAlAs/GaAs metamorphic Bragg mirror for long wavelength VCSELs [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3):268~270
- 6 C. Starck, J. Boucart, A. Plais *et al.*. Novel 1.55 μm VCSELs with top metamorphic GaAs/GaAlAs and bottom InP/InGaAsP Bragg reflectors [C]. *OFC/IOOC'99*, 1999, **4**:90~92
- 7 I. Hsing Tan, J. J. Dudley, D. I. Babic *et al.*. High quantum efficiency and narrow absorption bandwidth of the wafer-fused resonant $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photodetectors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7):811~813
- 8 Y. Ohiso, C. Amano, Y. Itoh *et al.*. Long-wavelength (1.55- μm) vertical-cavity lasers with InGaAsP/InP-GaAs/AlAs DBR's by wafer fusion [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10):1904~1913
- 9 R. Le Dantec, T. Benyattou, G. Guillot *et al.*. Tunable microcavity based on InP-air Bragg mirrors [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(1):111~114
- 10 Chao Kun Lin, David Bour, Jintian Zhu *et al.*. High temperature continuous-wave operation of 1.3 ~ 1.55 μm VCSELs with InP/air-gap DBRs [C]. *IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference*, 2002. 144~146
- 11 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2):607~639



欢迎订阅 2005 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会和中非人工晶体研究院联合主办,由《人工晶体学报》编辑委员会编辑,人工晶体学报社出版的国家级学术性期刊,是我国唯一专门刊登人工晶体材料这一高新技术研究领域成果的学术性刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、压电晶体材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备,以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流会议及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门,本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文核心期刊,美国工程索引(EI)收录源期刊。全文在“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊全文数据库”上网。2004年6月被《中国知识资源总库·科技精品期刊库》收入。

刊 号:ISSN 1000-985X CN 11-2637/O7

广告经营许可证:京朝工商广字 0016 号

主办单位:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会 中非人工晶体研究院

刊 期:双月刊

开 本:大十六开

2005年《人工晶体学报》全年定价 240 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

邮局汇款方式:

收款单位:中非人工晶体研究院

邮 编:100018

开户银行:北京工商银行管庄分理处

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

帐 号:144330-01

网 址:www.jtxb.cn

电 话:(010)65492968

E-mail:bjb@jtxb.cn

传 真:(010)65493320