

# 1.55 $\mu\text{m}$ 低温生长 GaAs 谐振腔增强型探测器\*

韩 勤 彭红玲 杜 云 倪海桥 赵 欢 牛智川 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所,集成光电子学国家重点联合实验室,超晶格国家重点实验室,北京 100083)

**摘 要** 利用低温(200 $^{\circ}\text{C}$ )生长的 GaAs 材料作为吸收层制备了 GaAs 基 1.55  $\mu\text{m}$  谐振腔增强型 (RCE) 光电探测器,对其光电特性进行了分析、研究. 无光照 0 偏压下探测器暗电流为  $8.0 \times 10^{-12}$  A;光电流谱峰值波长 1563 nm;响应谱线半宽 4 nm,具有良好的波长选择性.

**关键词** 探测器; LT-GaAs; 谐振腔增强; 分布布喇格反射镜

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

## 0 引言

谐振腔增强型探测器 (RCE-PDs) 由于其高量子效率、高速以及极窄的光谱响应带宽等优点近年来受到特别的关注<sup>[1~7]</sup>. 高性能 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  光电探测器是长途光纤通讯系统以及测试取样系统中非常重要的器件,谐振腔增强型探测器由于其特有的波长选择性使其在波分复用 (WDM) 系统中具有重要的用途. 目前 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  波长范围的谐振腔增强型探测器大多采用 Si 基 GeSi/ Si 量子点、Ge 岛、InGaAs; InP 基 GaInAs 和 GaAs 基 GaInNAs 等材料制备. 以 SOI 为衬底在 Si 上生长 Ge 岛制备的 RCE 探测器已实现对 1.55  $\mu\text{m}$  波长的探测,响应度为 0.028 mA/W<sup>[2]</sup>,以 Si 为衬底采用 Sol-Bonding 键合工艺键合 InGaAs 有源层的 RCE 探测器实现了 1.55  $\mu\text{m}$  波长 44% 的探测效率<sup>[3]</sup>;采用 InP/空气隙布喇格反射镜和 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜制备的 InP 基 RCE 探测器在 1.55  $\mu\text{m}$  波段分别实现了高达 60% 和 80% 的量子效率<sup>[4,5]</sup>,而以 GaInNAs 量子阱为吸收介质的 GaAs 基 RCE 探测器也已实现了对 1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  的探测<sup>[6~9]</sup>. GaAs 基光电探测器由于具有许多独特的优点,被认为是光纤通讯系统中最为理想的探测器. GaAs 基长波长探测器的关键是研制与 GaAs 匹配的长波长吸收介质材料. 本文介绍一种新型 GaAs 基长波长探测器,利用低温生长 GaAs 材料<sup>[10~13]</sup>作为有源吸收介质实现对 1.55  $\mu\text{m}$  波段的探测. 采用分子束外延 (MBE) 方法开展了低温生长 LT-GaAs 材料的研究,在 200 $^{\circ}\text{C}$  下生长出可有效吸收红外波段光辐照的 LT-GaAs 材料,并以此材料作为吸收层结合生长多层 DBR 高反射镜,制备出 RCE 探测器,探测器响应峰值波长 1.631  $\mu\text{m}$ .

## 1 探测器结构和制备

LT-GaAs RCE 探测器结构如图 1. 材料生长采用 MBE 外延设备,衬底为半绝缘 2 英寸 (100) GaAs. 首先 600 $^{\circ}\text{C}$  生长 GaAs buffer 缓冲层以及 15 对 GaAs/AlAs 下 DBR 反射镜;DBR 反射镜上 550 $^{\circ}\text{C}$  生长 300 nm 本征 GaAs;300 nm 掺杂浓度为  $10^{18}/\text{cm}^3$  n<sup>+</sup> 型 GaAs 和 300 nm 掺杂浓度为  $10^{16}/\text{cm}^3$  的 n 型 GaAs; LT-GaAs 的生长在 200 $^{\circ}\text{C}$  下进行,生长速度约为 0.7  $\mu\text{m}/\text{h}$ ;随后 550 $^{\circ}\text{C}$  生长 330 nm P<sup>+</sup>-GaAs,掺杂浓度为  $10^{19}/\text{cm}^3$  和 15 对上 DBR. 生长过程中不引入中断,因此在 LT-GaAs 层靠近衬底和 p-GaAs 两侧分别有 0.03  $\mu\text{m}$  和 0.1  $\mu\text{m}$  温度梯度层. LT-GaAs 在随后的 p 型 GaAs 生长中经历了 550 $^{\circ}\text{C}$  退火过程,这一过程被实验证明会有效提高 LT-GaAs 的质量. DBR 为交替生长的 113.6 nm GaAs 和 134.3 nm AlAs,各层材料除 LT-GaAs 吸收层外均对 1550 nm 光透明.

15 对 GaAs/AlAs DBR
P <sup>+</sup> -GaAs
LT-GaAs
n <sup>-</sup> -GaAs
n <sup>+</sup> -GaAs
i-GaAs
15 对 GaAs/AlAs DBR
Buffer GaAs
SI GaAs 衬底

图 1 LT-GaAs RCE 探测器外延结构

Fig. 1 The structure of LT-GaAs RCE-PD

RCE 探测器采用内电极工艺制备. 首先选用磷酸、双氧水系列 GaAs 腐蚀液精确控制腐蚀到 GaAs 电极层,随后淀积 SiNO 介质膜. p 型欧姆接触电极为 Cr-Au, n 型欧姆接触电极为 Au-Ge-Ni, 通过剥离工艺实现,电极整体结构为共面电极.

\*国家自然科学基金 (60137020, 60376025)、国家 973 计划 (TG2000036603) 和 863 计划 (2002AA312080) 资助项目  
Tel: 010-82304343 Email: hanqin@red.semi.ac.cn  
收稿日期: 2005-01-03

## 2 实验测量及结果分析

本文研究的 LT-GaAs RCE 探测器腔体由  $4\lambda$  的 GaAs(其中 500 nm 为 LT-GaAs)组成,器件窗口直径为  $80\ \mu\text{m}$ . 对其器件在无光照情况下的  $I/V$  特性特别是暗电流进行测试,测试采用 HP4140B 进行,得到  $I/V$  曲线如图 2. 首先注意到 LT-GaAs 与常规 GaAs(560~600°C 下生长)p-i-n 二极管  $I/V$  特性不同,它没有一个通常所见到的很“硬”的正向开启点;另外还可以看到其暗电流非常小,零偏压下为  $0.2\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . 这是因为低温(200~250°C)下生长的 GaAs 远偏离常规 GaAs 的标准化学配比,大约是 50.5~51%As 和 49.5~49%Ga,因此 LT-GaAs 中含有约为 1~2%过量的 As,这些 As 原子在 GaAs 中占据 Ga 的位置,在 GaAs 中形成高浓度的 As 反位杂质(As antisites)  $\text{As}_{\text{Ga}}$ . As 反位杂质作为电子陷阱使得 LT-GaAs 具有极高的电阻率和极小的暗电流.

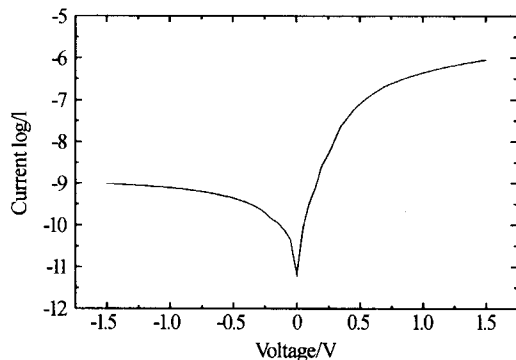


图 2 LT-GaAs RCE 探测器  $I/V$  特性曲线(对数坐标)  
Fig. 2 The  $I/V$  curve of LT-GaAs RCE-PD

器件的反射谱采用微区光谱测试分析系统进行测试. 高亮度碘钨灯发出的宽谱光束经单色仪分光后通过高倍率显微镜聚焦到器件表面,聚焦点光斑直径为  $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ,器件表面的反射光信号经放大后由微机采集、记录. 图 3 为 LT-GaAs RCE 探测器外延片的反射谱. 高反带中心出现的凹陷即是垂直

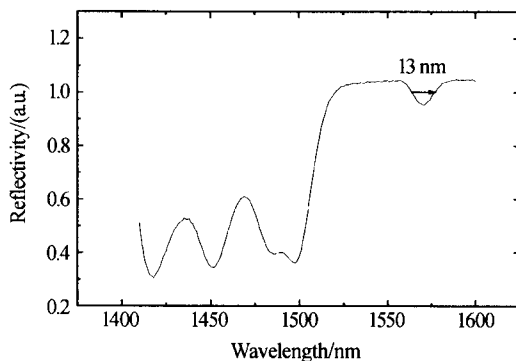


图 3 实验测量 RCE 探测器反射谱  
Fig. 3 Measured reflectance spectra of RCE-PD

腔谐振模式所在位置. 与器件生长结构设计值一致.

使用 HP 1510~1640 nm 可调谐激光器测量探测器在此波长范围的光电流谱. 可调谐激光由单模光纤输出,与自聚焦透镜耦合后输出平行光,光斑直径约为  $1.0\ \text{mm}$ . 平行光经斩波器后照射到探测器入射光窗口,探测器吸收光信号产生的光电流通过锁相放大器放大后记录下光电流谱图,如图 4. 探测器响应峰值波长为  $1.563\ \mu\text{m}$ ,响应光谱半宽(FWHM)4 nm,峰值波长处响应度为  $14.2\ \text{mA}/\text{W}$ ,对应的量子效率为 1.13%. 由于在器件实际生长过程中各外延层厚度,特别是探测器腔体厚度与设计厚度常有一细微的涨落,因此峰值波长与设计值  $1.55\ \mu\text{m}$  略有偏离.

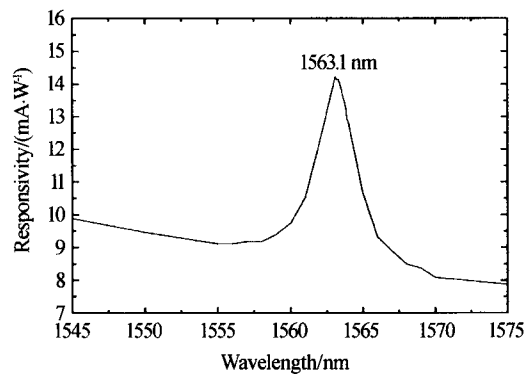


图 4 RCE 探测器光电流谱  
Fig. 4 The photocurrent spectra of RCE-PD

谐振腔增强型(RCE)光电探测器的基本结构是在谐振腔中插入较薄的吸收层,借助于光波在谐振腔中的往复,使光波多次通过吸收层形成光增强效应,从而在谐振模式处获得高的量子效率,同时通过 DBR 高反射镜的波长选择特性得到极窄的光谱响应. RCE 探测器的量子效率和响应半宽分别为

$$\eta_p = \left\{ \frac{1 + R_2 e^{-\zeta d}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\zeta d})^2} \right\} (1 - R_1)(1 - e^{-\zeta d})$$

$$FWHM = \frac{\lambda_0^2 (1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\zeta d})}{2\pi n_g L_{\text{eff}} \sqrt{R_1 R_2} e^{-\zeta d/2}}$$

这里  $R_1$  为上 DBR 反射率,  $R_2$  为下 DBR 反射率,上下反射镜之间的吸收层厚度为  $d$ ,吸收系数为  $\alpha$ ,  $\zeta$  为驻波增强因子,  $L_{\text{eff}}$  为探测器的等效腔长,  $n_g$  为模式的群折射率,  $\lambda_0$  为模式波长.

可以看出,通过上下 DBR 形成的 F-P 谐振腔的增强效应,不但使探测器具有波长选择性,同时即使对于很薄的吸收层或吸收系数较小的吸收层材料也能获得较高的量子效率. RCE 探测器的量子效率和谐振腔的 Q 值,上下 DBR 高反镜的反射率以及腔模位置是器件结构设计和实际制备过程中的重要参数,理论分析表明当上下 DBR 反射率满足  $R_2 = R_1 \exp(-\alpha d)$  时探测器具有最佳的探测效率. LT-

GaAs 由于其通过带间缺陷态实现对光的吸收,所以和带间吸收材料相比其吸收系数相对较低,利用 RCE 结构,通过谐振腔的增强效应可有效提高其吸收效率,在 1.55  $\mu\text{m}$  波长得到较强的光电响应,实现了对 1.55  $\mu\text{m}$  波长光的探测.

### 3 结论

通过采用低温生长的 GaAs 材料作为吸收层,制备了 GaAs 基 1.55  $\mu\text{m}$  波段的垂直腔增强型光探测器. 探测器具有极低的暗电流,暗电流为  $8 \times 10^{-12}$  A; 光电流谱峰值波长为 1563 nm,半宽为 4 nm. 实验显示 LT-GaAs 具有其独特的优点,可实现 GaAs 基 1.3~1.55  $\mu\text{m}$  通讯波段探测器及光开关的制备.

#### 参考文献

- 1 Selim ünlü M, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J Appl Phys*, 1995, **78**(2): 607~639
- 2 Li C B, Cheng B W, Mao R W, et al. 1.55  $\mu\text{m}$  Ge islands resonant-cavity-enhanced narrowband detector. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5644**: 465~471
- 3 Mao R W, Zuo Y H, Li C B, et al. Demonstration of low-cost Si-based tunable long-wavelength Resonant Cavity Enhanced Photodetectors. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(3): 033502
- 4 Huang Y Q, Ren X M, Huang H, et al. High-performance InP-based resonant cavity enhanced photodetector based on InP/air-gap Bragg reflectors. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5624**: 678~685
- 5 Huang H, Lei L, Li Y J, et al. High coupling efficiency and high speed InP/InGaAs resonant cavity enhanced photodetector with micro-pectinated carrier collected layer. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5280**: 549~553
- 6 张瑞康, 钟源, 徐应强, 等. 1.3  $\mu\text{m}$  GaInNAs/GaAs 量子阱 RCE 探测器. *光子学报*, 2002, **31**(3): 304~307  
Zhang R K, Zhong Y, Xu Y Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 304~307
- 7 梁琨, 杨晓红, 杜云, 等. 谐振腔增强型光电探测器的角度相关特性研究. *光子学报*, 2003, **32**(5): 637~640  
Liang K, Yang X H, Du Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 637~640
- 8 杨晓红, 梁昆, 韩勤, 等. 超薄有源层谐振腔增强型调制器. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1196~1199  
Yang X H, Liang K, Han Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1196~1199
- 9 Han Q, Yang X H, Niu Z C, et al. 1.55  $\mu\text{m}$  GaInNAs resonant-cavity-enhanced photodetector grown on GaAs. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(11): 111105
- 10 Smith F W, Le H Q, Diadiuk V, et al. Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors. *Appl Phys Lett*, 1989, **54**(10): 890~892
- 11 Warren A C, Burroughes J H, Woodall J M, et al. 1.3  $\mu\text{m}$  p-i-n photodetector using GaAs with as precipitates (GaAs; As). *IEEE Electron Device Lett*, 1991, **12**(10): 527~529
- 12 Erlig H, Wang S, Azfar T, et al. LT-GaAs detector with 451 fs response at 1.55  $\mu\text{m}$  via two-photon absorption. *Electron Lett*, 1999, **35**(2): 173~174
- 13 Shi J W, Chen Y H, Gan K G, et al. High-speed and High-power performances of LTG-GaAs based metal-semiconductor-Metal traveling-wave-photodetectors in 1.3  $\mu\text{m}$  wavelength regim. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2002, **14**(3): 363~365

## 1.55 $\mu\text{m}$ Low-temperature-grown GaAs Resonant Cavity Enhanced Photodetector

Han Qin, Peng Hongling, Du Yun, Ni Haiqiao, Zhao Huan, Niu Zhichuan, Wu Ronghan

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, National Laboratory for Superlattices and Microstructures  
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

Received date: 2005-01-03

**Abstract** 1.55  $\mu\text{m}$  resonant cavity enhanced photodetector was fabricated using low-temperature grown GaAs as the absorption layer. Its electrical and optical characteristics were investigated. Under 0 V bias without incident light the dark current was  $8 \times 10^{-11}$  A, the peak wavelength of the photocurrent was 1563 nm with fullwidth at half maximum (FWHM) 4 nm.

**Keywords** Detector; LT-GaAs; RCE; DBR

**Han Qin** was born in 1965. He is now working in the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. He is now engaged in research work on semiconductor optoelectronics materials and devices.

