

# 可调谐外腔 RCE 光探测器的实验研究\*

黄永清 刘 凯 刘立义 李建新 任晓敏

(北京邮电大学 66# 北京 100876)

**提要** 实现了波长调谐范围为 10 nm 左右的可调谐分立外腔半导体光探测器。这一方案对于可调谐探测来说简捷易行,性能良好。

**关键词** 波分复用,光探测器,光电子器件

## 1 引 言

继单频外腔可调谐半导体激光器成为光电子器件研究的热点之后,可调谐、高速响应的光探测器又成为光电子学领域研究的热点之一<sup>[1]</sup>。

目前,在光纤通信系统中所使用的光探测器一般采用具有宽带光谱响应或具有固定波长选择特性的光探测器,这就限制了系统在某些特定场合的应用,减小了系统设计的自由度。尤其是在密集光波分复用系统中,这一问题就显得更为突出。因此,研究可调谐光探测器成为光波分复用技术中的关键课题。

光纤通信系统的飞速发展对传统的探测器提出了新的要求:高速的响应速度和较好的波长选择性能。这两个问题在实际中是互相联系的。传统的光探测器没有细锐的波长选择功能,同时量子效率与响应速度通过吸收层厚度相互制约:若采用较厚的吸收层,固然可以获得满意的量子效率,但器件的响应速度却上不去;而为了提高响应速度就不得不减薄吸收层厚度,牺牲量子效率。近年来发展起来的谐振腔增强型(RCE)光探测器在这方面取得了突破<sup>[2]</sup>。它利用谐振腔对入射光束进行选频探测,并借助于光波无数次往复通过吸收层的强化吸收机制,使得在吸收层很薄的情況下仍能获得很高的量子效率。但就其在波分复用(WDM)光纤通信系统的应用而言,主要问题是获得高的量子效率、窄的光谱响应线宽和探测中心波长的调谐。可调谐光探测器将能够解决这些问题,满足 WDM 系统的使用要求。采用微机械制作成悬臂可实现调谐的功能<sup>[3]</sup>,亦可采用 RCE 型多量子阱实现调谐<sup>[4,5]</sup>。本文提出外腔可调谐的光探测器方案,并通过实验进行了验证。它可以实现器件的高量子效率、窄光谱响应线宽和探测中心波长的调谐。随着高速、大容量的光纤通信系统——密集波分复用(DWDM)光纤通信系统的迅速发展,它将在光通信领域中获得广泛的应用。此外,这一器件还可以应用于光学测试系统中。

\* 国家自然科学基金(项目号 69625101)、教育部留学归国人员科研启动基金、北京邮电大学校科研项目资助课题。

收稿日期: 1999-04-12; 收到修改稿日期: 1999-06-17

## 2 器件的结构

器件的结构如图 1 所示。在光探测器管芯的衬底一侧由分布式布喇格反射镜(DBR) 构成高反射率的反射镜,在探测器管芯的受光面一侧镀增透膜——即受光面镀增透膜的谐振腔增强型光探测器,在其受光面外侧加置可调谐的外腔反射镜,以实现其波长调谐功能,同时压窄器件的光谱响应线宽。这一方案的技术关键是管芯的制作、外腔反射镜的调整。

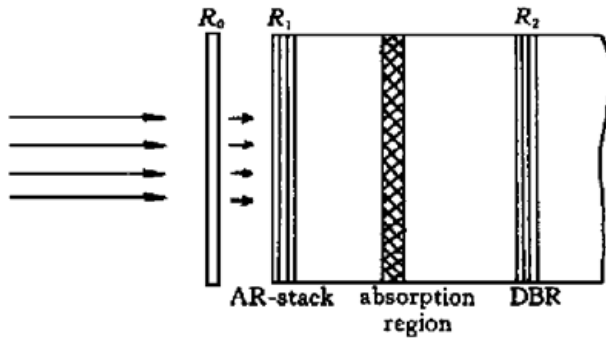


图 1 可调谐外腔光探测器的结构

Fig. 1 Structure of the tunable external cavity photo-detector

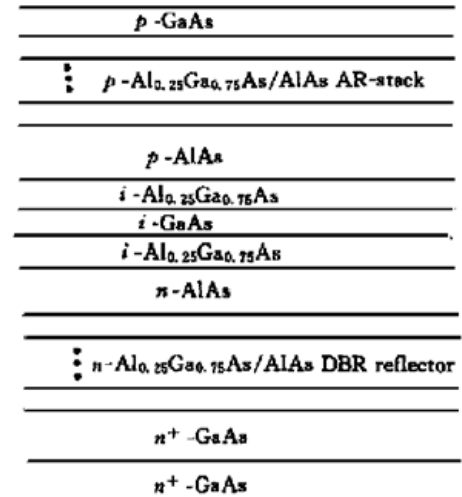


图 2 器件管芯的具体结构

Fig. 2 Structure of the photo-detector chip

探测器管芯是利用金属有机化学气相沉积法(MOCVD) 工艺在 GaAs 衬底上生长而成的,具体结构如图 2 所示。管芯的底部反射镜由  $0.5 \mu\text{m}$  厚的  $n$  掺杂的 GaAs 层和厚度为  $\lambda/4$  的  $n$  掺杂的  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{AlAs}$  两种材料层交替组成的 DBR 构成,其设计波长为  $0.85 \mu\text{m}$ 。在底部反射镜以上,生长了一层  $0.3 \mu\text{m}$  厚的  $n$  掺杂 AlAs 层和一层  $0.05 \mu\text{m}$  的本征型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  层。吸收层由本征型 GaAs 材料构成,厚度为  $0.135 \mu\text{m}$ 。在吸收层之上,生长了一层  $0.05 \mu\text{m}$  厚的本征型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  和一层  $0.3 \mu\text{m}$  厚的  $p$  掺杂 AlAs。器件的顶部为由  $p$  掺杂的  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{AlAs}$  两种材料层交替组成的增透膜,厚度为  $\lambda/2$ , 和一层  $0.015 \mu\text{m}$  厚的高  $p$  掺杂的 GaAs 电接触层构成。

## 3 理论分析及实验结果

对于外腔光探测器,可以根据参考文献[2] 推出其量子效率公式为

$$\eta = (1 + R_2 e^{-\alpha d})(1 - R_0)(1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d}) \left[ 1 + 2 \sqrt{R_0 R_1} \cos(2\beta_0 L_0 + \psi_0) + R_0 R_1 \right] \times \left[ 1 + R_1 R_2 e^{-2\alpha d} + R_0 R_2 (1 - R_1)^2 e^{-2\alpha d} - 2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d} \cos(2\beta L + \psi_1 + \psi_2) - 2 \sqrt{R_0 R_2} \times (1 - R_1) e^{-\alpha d} \cos(2\beta_0 L_0 + 2\beta L + \psi_0 + \psi_2) + 2 \sqrt{R_0 R_1 R_2} (1 - R_1) e^{-2\alpha d} \cos(2\beta_0 L_0 + \psi_0 - \psi_1) \right]^{-1}$$

其中,  $\beta = 2n\pi/\lambda$  ( $\lambda$  为真空波长,  $n$  为折射率);  $R_0, R_1$  和  $R_2$  分别为器件的外腔镜、探测器管芯的顶镜和底镜的反射率;  $\alpha$  为吸收层的吸收系数;  $d$  为吸收层的厚度;  $L$  为由探测器管芯的顶镜和底镜构成的 F-P 腔的几何长度;  $L_0$  为外腔长度;  $\psi_1$  和  $\psi_2$  分别为由于光在顶端和底端 DBR 的渗透而导致光场的相移;  $\psi_0$  为光在外腔镜反射时产生的相移。

由器件量子效率公式的分析可以发现, 在可调谐外腔光探测器的结构里, 对应于一定的吸收层厚度  $d$  (这一厚度远小于达到同等量子效率时常规光探测器件所需的吸收层厚度) 和管芯底镜反射率  $R_2$  存在着特定的  $R_0, R_1$  使器件的量子效率达到最高。通过计算可知, 在可调谐外腔光探测器的结构里, 要求探测器管芯的顶部增透膜的残余反射率  $R_1$  应该尽可能地小, 以提高内腔和外腔的耦合效率, 提高器件的量子效率和可调谐范围。当  $R_1 = 0$  时, 器件可以获得最高的量子效率, 器件的量子效率公式为

$$\eta = \left| \frac{(1 + R_2 e^{-\alpha d})}{1 - 2 \sqrt{R_0 R_2} e^{-\alpha d} \cos(2\beta L + 2\beta_0 L_0 + \psi_0 + \psi_2) + R_0 R_2 e^{-2\alpha d}} \right| \times (1 - R_0)(1 - e^{-\alpha d})$$

在谐振峰处的量子效率为

$$\eta_p = \left| \frac{(1 + R_2 e^{-\alpha d})}{1 - 2 \sqrt{R_0 R_2} e^{-\alpha d} + R_0 R_2 e^{-2\alpha d}} \right| \times (1 - R_0)(1 - e^{-\alpha d})$$

由外腔光电探测器的量子效率公式可以看出, 器件本身的响应特性具有波长选择性; 而且由于谐振腔的增强效应, 器件不必通过加厚吸收层的厚度来达到较高的量子效率, 而是在吸收层较薄(这一厚度远小于达到同等量子效率时常规光探测器件所需的吸收层厚度)的情况下即可获得较常规的光探测器高的量子效率。

从器件的量子效率公式可以发现, 由于器件本身光响应具有选频特性, 其被选波长由器件的外腔长度  $L_0$  和由 RCE 管芯的顶镜和底镜构成的 F-P 腔的几何长度  $L$  决定, 因而通过改变器件的外腔长度可以改变响应波长, 从而达到调谐的目的。图 3 为当  $R_1 = 0$  时对于不同的外腔长度计算的光谱响应, 其中  $R_0 = 0.6, R_2 = 0.9, L = 2 \mu\text{m}, \alpha d = 0.1$ 。从图中可以看到改变外腔长度器件的响应峰值波长发生移动。实验中, 我们即利用这一特性, 在 RCE 管芯的外部加入外腔镜, 通过调节器件外腔的长度实现了器件光响应的调谐。

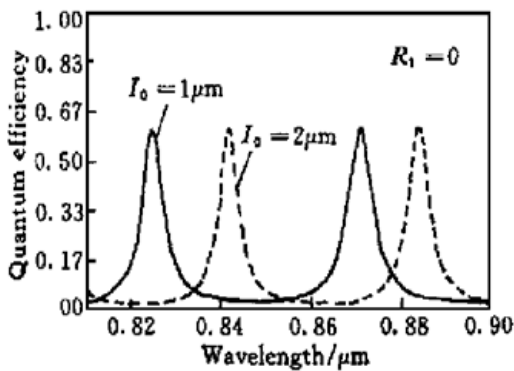


图 3 在不同外腔长度下计算的器件光谱响应

Fig. 3 Spectral response of the tunable external cavity photo-detector for different external cavity length

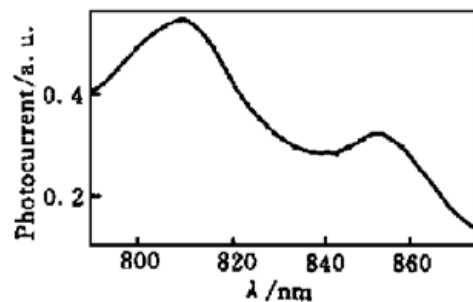


图 4 管芯的光谱响应曲线

Fig. 4 Spectral response of the photo-detector chip

图 4 为根据实测数据绘制的管芯的光谱响应曲线。从图 3 中可以看到, 器件有两个响应峰, 并且位于 810nm 附近的响应峰比位于 850 nm 附近的响应峰具有更高的响应峰值。

可调谐外腔光探测器的光谱响应调谐曲线如图 5 所示(为了区分三条不同的测试曲线给出了 (a) 和 (b) 两幅图), 其中曲线 1~ 3 分别为加置外腔后, 在不同外腔长度下所测试的器件光谱响应曲线。根据图 5, 器件在 800 nm 附近的响应峰有 8 nm 左右的调谐范围; 而在 830 nm 附近的响应峰调谐范围最大可达 12 nm。比较图 4 和图 5 可见, 加置外腔后仍存在两个响应

峰,但响应线宽已被压窄。

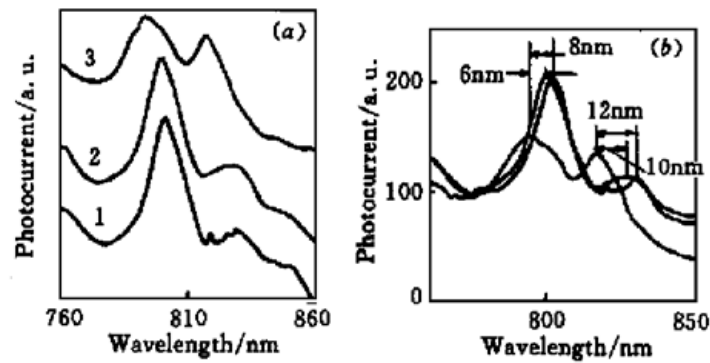


图 5 可调谐外腔光探测器的光谱响应调谐曲线

Fig. 5 Spectral response of the tunable external cavity photo-detector

## 4 结 论

我们研制的外腔可调谐半导体光探测器达到了 10 nm 左右的调谐范围。由于管芯电接触层的存在以及生长时的工艺误差,使管芯顶部增透膜残余反射率  $R_1$  的值约为 0.2 左右,没有达到要求,使器件的特性受到了一定的影响。进一步改进器件的设计和管芯的制作工艺,有可能得到性能优越的光探测器。

**致谢** 感谢中国科学院半导体所马骁宇、陈良惠、康学军、廖奇伟同志对本课题的大力支持。

## 参 考 文 献

- 1 Xiaomin Ren, Joe C. Campbell. Theory and simulations of tunable two-mirror and three-mirror resonant-cavity photodetectors with a built-in liquid-crystal layer. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(11): 2012~ 2025
- 2 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2): 607~ 639
- 3 M. S. Wu, E. C. Vail, G. S. Li *et al.*. Widely and continuously tunable micromachined resonant cavity detector with wavelength tracking. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 98~ 100
- 4 K. Lai, Joe C. Campbell. Design of a tunable GaAs/AlGaAs multiple-quantum-well resonant-cavity photodetector. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(1): 108~ 114
- 5 J. Waclawek, J. Kováč, B. Rheinländer *et al.*. Electrically tunable GaAs/AlGaAs MQW RCE photodetector. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(1): 71~ 72

## Experimental Study on the Tunable External Cavity RCE Photo-detector

Huang Yongqing Liu Kai Liu Liyi Li Jianxin Ren Xiaomin

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract** The tunable external cavity RCE photo-detector with a tuning range attained about 10 nm has been realized. This design for tunable photo-detector has the advantages of simple structure, easy realization and preferable performance.

**Key words** WDM, photo-detector, optoelectronics device