

文章编号: 0258-7025(2002)04-0347-04

一种具有平顶陡边响应的新型谐振腔增强型(RCE)光电探测器的理论分析及模拟

钟 源¹, 潘 钟², 李联合², 黄永清¹, 任晓敏¹

(¹北京邮电大学光通信中心, 北京 100876; ²中国科学院半导体所光电子工艺中心, 北京 100083)

提要 提出了一种适用于波分复用系统的具有平顶陡边响应的新型谐振腔增强型(RCE)光电探测器结构, 模拟得到了量子效率从峰值下降 0.5 dB 的线宽 1.8 nm, 10 dB 的线宽 5.6 nm, 20 dB 的线宽 10.4 nm, 量子效率峰值 99.7%, 几乎没有凹陷的响应曲线。

关键词 波分复用, 光电探测器, 谐振腔增强型, 平顶响应

中图分类号 TN 929.11; TN 15 **文献标识码** A

A Novel Resonant Cavity Enhanced (RCE) Photodetector with a Flat-top and Steep-edge Response

ZHONG Yuan¹, PAN Zhong², LI Lian-he², HUANG Yong-qing¹, REN Xiao-min¹

¹Beijing University of Post & Telecom, Beijing 100876

²Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

Abstract This paper proposes a novel resonant cavity enhanced (RCE) photodetector with a flat-top and steep-edge response, which is promising for WDM application. The simulated response curve has a bandwidth of 1.8 nm at 0.5 dB down from the peak, 5.6 nm at 10 dB down from the peak, 10.4 nm at 20 dB down from the peak, and a peak quantum efficiency of 99.7%, the ripple in the flat-top is negligible.

Key words WDM, photodetector, RCE, flat-top and steep-edge response

1 引 言

近几年来,由于波分复用(WDM)技术具有从光纤巨大的潜在带宽中获取丰富的信道资源的能力,以及它与其他通信技术的兼容性,使得它在骨干网、城域网和接入网等各个领域都得到了广泛的应用。然而,目前光波分复用设备的高昂价格,特别是某些关键器件的高成本,又在一定程度上限制了其自身的进一步普及和发展。因而光纤通信系统的应用和发展对高性能、低成本的光波分复用器件的研发提出了迫切的要求。

波长选择探测作为光波分复用技术的一个关键技术,传统的方法是采用“滤波器+探测器”的组合方式,但这种方法成本高,而且滤波器的引入还带来了额外的插入损耗,降低了系统解复用接收的整体响应度。

谐振腔增强型(RCE)光探测器^[1~3]是一种新型集成解复用光电探测器,其基本结构是将吸收层引入到 F-P 谐振腔中,因而探测器本身就具有了波长选择特性,而无须外加滤波器。此外,由于谐振腔的增强效应,此类器件在较薄的吸收层情况下即可获得较高的量子效率,减少了光生载流子的吸收层渡

收稿日期: 2001-0-; 收到修改稿日期: 2001-07-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000036603), 国家自然科学基金(69976007, 69988005, 60137020) 资助项目。

作者简介: 钟源(1976-), 男, 湖北省荆州人, 1999年毕业于武汉大学应用物理专业, 同年进入北京邮电大学攻读硕士研究生, 现在的研究方向为光纤通信和光电子器件。E-mail: yuanzhong@red.semi.ac.cn

越时间,也就解决了器件响应速度的问题。

但是,此类器件仍然存在着一一定的缺陷。传统 RCE 探测器的响应峰都是尖顶的,如果信号光波长仅有微小漂移,探测器的响应电流将有大幅变化,这种不稳定性有可能对波分解复用接收带来不便。相反,如果 RCE 响应峰是平顶的,波分复用系统将在一定程度上放松对光发射端激光器波长的准确性和稳定性的要求,这对于降低系统成本是有利的。传统 RCE 探测器的响应峰还有另外一个缺点,就是边缘下降比较缓慢,这样多个波长之间会有串扰^[1]。如果使响应峰的边缘下降更陡,波长间串扰将会大大降低。正是基于上述考虑,现在波分复用系统中都选用平顶陡边的窄带光滤波器,而不是普通的 F-P 腔滤波器。

本文提出了一种具有平顶和陡边响应的 RCE 光电探测器的器件结构,如图 1 所示。正如传统的 RCE 探测器是将吸收层放置于 F-P 腔中,本文提出的平顶陡边 RCE 器件是将吸收层放置于双半波滤波器^[4,5](Double Half Wave Filter)的一个腔中。器件结构为 $AR(m\lambda/2)R'(m\lambda/2)R''S$, 其中 S 代表衬底, R, R' 和 R'' 代表分布布喇格反射镜(DBR)。本文将对 DBR 的材料、间隔层厚度、顶镜、中镜和底镜反射率、吸收层在间隔层中位置等关键参数对响应曲线的量子效率和形状的影响进行讨论。图 2 为传统 RCE 和本文提出的具有平顶陡边响应的 RCE 光电探测器响应曲线的比较。

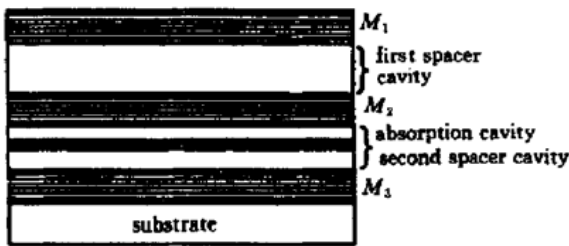


图 1 器件结构

Fig. 1 Proposed device structure

2 关键参数对响应峰的影响

在模拟计算器件的响应曲线时,假设器件除了吸收层以外其他各层的吸收都可以忽略。这样就可以认为 $A = 1 - R - T$, 其中 A 表示器件吸收层的吸收,即响应曲线, R 和 T 分别为反射曲线和透射曲线。 R 和 T 通过菲涅耳系数矩阵方法计算。还假设吸收层材料为 InGaNaAs, 假设其消光系数为 -0.1 ,

即吸收系数为 $9661/\text{cm}$ 。

假设光正入射,经比较,吸收层应放置于第二个间隔层中。如图 3 所示,当吸收层位于第一个间隔层时,响应峰中心有很深的坑,而当吸收层位于第二个间隔层时,响应峰中心的坑很浅,因此更理想。

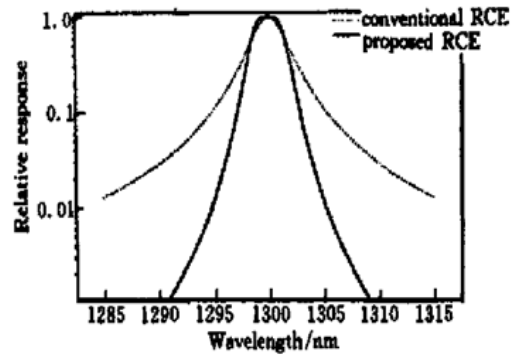


图 2 传统与新型 RCE 相对响应曲线(log) 的比较
Fig. 2 Comparison of the relative response curves of conventional and novel RCE photodetectors

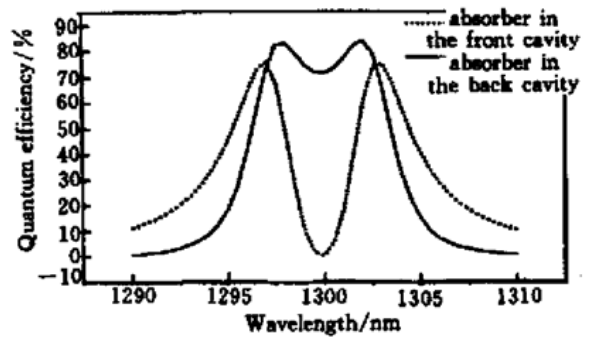


图 3 吸收层分别在第一个和第二个间隔层的响应峰
Fig. 3 Simulated response curves when absorber is in different cavities

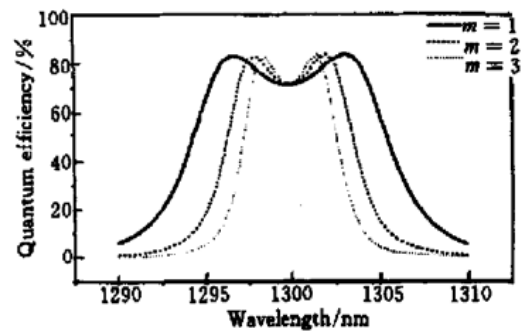


图 4 不同干涉级次的响应峰

Fig. 4 Simulated response curves when order is changing

2.1 间隔层厚度对响应峰的影响

两个间隔层的厚度应该相等,且光学长度应为 $m\lambda/2$, 其中 m 是干涉级次。图 4 说明了间隔层厚度对响应峰宽的影响,显然干涉级次越大,响应峰越窄

且越陡。当 $m > 3$ 后响应峰的变化不明显, 而且在制造双半波滤波器的实践中 $m > 3$ 的情况通常是不成功的, 这是因为时间隔层的粗糙度增加, 不利于达到使响应峰又窄又平的目的。

2.2 DBR 材料的选取

在 GaAs 衬底上生长 RCE 器件时, GaAs/AlAs, GaAs/AlO_x, AlGaAs/AlO_x 等材料组合可以用于生长 DBR 反射镜。以下的模拟假设 20 nm 厚的吸收层放置于第二个间隔层的顶部, 间隔层光学长度为 $3\lambda/2$ 。响应峰的量子效率和线宽只与反射镜的反射率有关(假设反射镜没有吸收), 所以不同材料的 DBR 对响应峰的量子效率和线宽没有影响。

2.2.1 GaAs/AlAs 材料 DBR

GaAs/AlAs(3.41/2.92) 是常用的 DBR 材料组合, 我们模拟得到的比较好的响应峰如图 5, 6 所示, 量子效率从峰值下降 0.5 dB 的线宽为 2.8 nm, 下降 10 dB 为 6.9 nm, 下降 20 dB 为 12.3 nm。量子效率最大值为 96.2%, 凹陷中量子效率最小值为 92%, 起伏 0.194 dB。此时的顶镜 14.5 对, 中镜 21.5 对, 底镜 27.5 对。

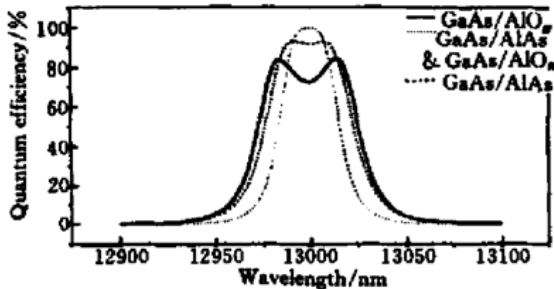


图 5 不同材料组合的 DBR 所得到响应曲线

Fig. 5 Simulated response curves when different DBRs are used

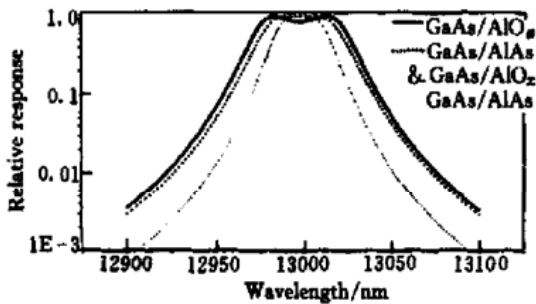


图 6 不同材料组合的 DBR 所得到的响应曲线(log)

Fig. 6 Simulated response curves when different DBRs are used (in log display)

2.2.2 GaAs/AlO_x 材料 DBR

如果用 GaAs/AlAs 材料的反射镜, 要得到较高

的反射率需要生长很多对 DBR, 这样既费生长时间又费原料。GaAs/AlO_x (3.41/1.56) 材料组合的折射率差比 GaAs/AlAs 大许多, 因此可以使用较少对数的 DBR 就可以达到较高的反射率。但同时由于 DBR 每增加一对, 反射镜的反射率增加比较大, 这样不利于准确控制反射镜的反射率。而且 AlO_x 材料绝缘, 必须设计好器件电极。我们模拟得到使用 GaAs/AlO_x 材料 DBR 较好的响应峰如图 5, 6 所示, 量子效率从峰值下降 0.5 dB 的线宽为 4 nm, 下降 10 dB 为 8.8 nm, 下降 20 dB 为 15.3 nm。量子效率最大值为 84.5%, 小坑中量子效率最小值为 72.5%, 起伏 0.667 dB。此时的顶镜 3.5 对, 中镜 4.5 对, 底镜 6.5 对。

另外, 可以考虑一种折衷的方法: 顶镜和中镜用 GaAs/AlAs 材料的 DBR, 底镜用 GaAs/AlO_x 材料的 DBR, 由于底镜的反射率可以达到很高, 这样可以得到比只用 GaAs/AlAs 材料 DBR 还好的响应曲线。如图 5, 6 所示, 量子效率从峰值下降 0.5 dB 的线宽为 1.8 nm, 下降 10 dB 为 5.6 nm, 下降 20 dB 为 10.4 nm。量子效率最高为 99.7%, 小坑中量子效率最小值为 98%, 起伏 0.075 dB。对应的 DBR 反射镜分别为顶镜 15.5 对 GaAs/AlAs, 中镜 23.5 对 GaAs/AlAs, 底镜 6.5 对 GaAs/AlO_x。AlGaAs/AlO_x 等材料组合也可以用于生长 DBR 反射镜, 由于 AlGaAs 材料的折射率介于 AlAs 和 GaAs 之间, 与 Al 的组份有关。AlGaAs/AlO_x 材料 DBR 在此不详细讨论。

2.3 吸收层厚度对响应峰的影响

相同的其他结构, 仅仅是不同的吸收层厚度也会对响应曲线有很大的影响, 这是因为吸收层的折射率是复数, 它的厚度对光的相移有复杂的影响。因此, 对于不同的吸收层厚度, 其优化的器件结构都会有所不同。

2.4 DBR 反射镜的反射率对响应曲线的影响

底镜的反射率越高则光的透射越少, 量子效率才越高。顶镜和中镜组合对响应曲线的形状和量子效率有着非常重要的影响。图 7 说明了顶镜反射率对响应曲线的影响。其中顶镜分别为 10.5, 11.5 和 12.5 对 GaAs/AlAs, 中镜为 16.5 对 GaAs/AlAs。可见增加顶镜的反射率会使尖的响应曲线变为平顶的响应曲线, 继续增加顶镜反射率会使响应曲线中出现小坑, 这时适当增加中镜的反射率会使小坑变浅直到消失。图 8 说明了中镜反射率对响应曲线的影响。其中中镜分别为 16.5, 17.5, 18.5 和 19.5 对

GaAs/AlAs, 顶镜为 12.5 对 GaAs/AlAs。由图可见当增加中镜的反射率时, 响应峰中央的小坑变浅甚至消失从而得到平顶响应, 如果继续增加反射率会使响应峰变尖; 同时, 增加中镜的反射率可以使响应峰变窄。因此, 顶镜反射率和中镜反射率之间的组合对于响应曲线的形状和量子效率起着至关重要的作用。不断调节顶镜和中镜的反射率可以得到既是平顶又具有比较窄线宽的响应曲线。当顶镜和中镜的反射率达到一定程度时, 进一步增加反射率将只能使响应峰的线宽变窄, 而不能得到平顶的响应峰。

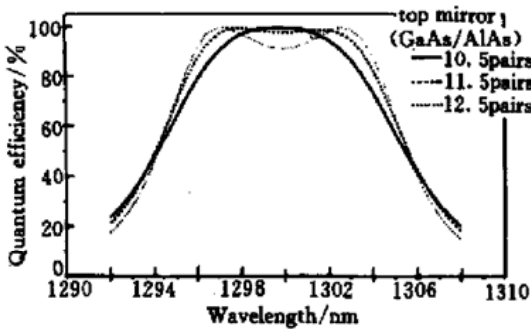


图 7 顶镜反射率对响应曲线的影响

Fig. 7 Simulated response curves when top mirror's reflectivity is changing

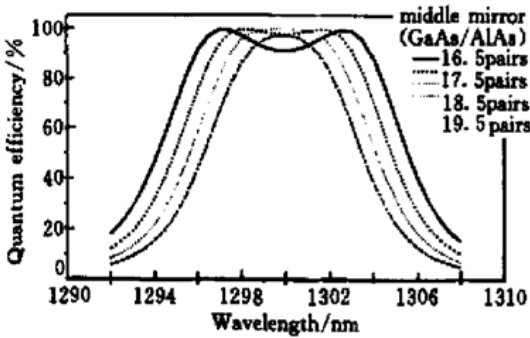


图 8 中镜反射率对响应曲线的影响

Fig. 8 Simulated response curves when the middle mirror's reflectivity is changing

2.5 吸收层在间隔层中位置对响应波形的影响

吸收层在间隔层中的位置也会强烈地影响曲线的形状。以下的模拟均假设间隔层为 $3\lambda/2$ 。图 9 是模拟 60 nm 吸收层在第二个间隔层中处于不同位置时的响应曲线的变化情况, 可见吸收层在间隔层中的某些位置时响应会变弱, 同时在响应曲线上会出现凹陷。当吸收层在距离中镜 $0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$ 等

处附近时响应曲线形状比较好, 而在距离中镜 $\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$ 等处附近时响应曲线形状比较差。这是由于谐振腔的驻波效应^[1](SWE)造成的。

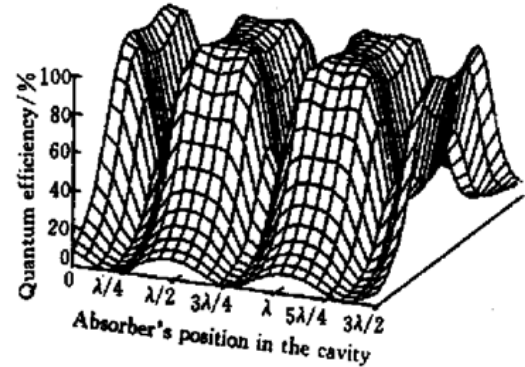


图 9 吸收层在吸收腔中不同位置时的响应曲线

Fig. 9 Simulated response curves when absorber's position is changing in the cavity

3 总 结

本文提出了一种具有平顶陡边响应的谐振腔增强型(RCE)光电探测器, 模拟得到了量子效率从峰值下降 0.5 dB 的线宽 1.8 nm, 下降 10 dB 的线宽 5.6 nm, 下降 20 dB 的线宽 10.4 nm, 量子效率峰值 99.7%, 几乎没有凹陷的响应曲线。因此它将不仅具有普通 RCE 器件所具有的优点, 即波长选择功能, 可以同时获得高量子效率和高速响应, 而且与传统的 RCE 器件相比它放宽了系统对激光器发射波长准确性和稳定性的要求, 从而降低系统成本, 同时还有利于降低多波长信号之间的串扰。此种器件将十分适用于光波分复用系统。

参 考 文 献

- 1 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2): 607~ 639
- 2 X. Ren, J. C. Campbell. Theory and simulations of tunable two-mirror and three-mirror resonant cavity photodetectors with a built-in liquid crystal layer [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(11): 1903~ 1915
- 3 Kai Liu, Yongqing Huang, Xiaomin Ren. Theory and experiments of a three-cavity wavelength-selective photodetector [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(24): 4263~ 4269
- 4 H. A. Macleod. Thin-film Optical Filters [M]. London: Adam Hilger Ltd., 1969. 168~ 184
- 5 J. Tang, Q. Zheng. Applied Optics for Thin-film [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1984 (in Chinese)