

# 一种同时具有高消光比和低插入损耗的新型 谐振腔增强型光调制器的理论分析\*

周 震<sup>†</sup> 余重秀 马健新

(北京邮电大学电子工程学院 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 提出了一种新型的谐振腔增强型(RCE)光调制器结构,该器件采用双腔混合式结构.理论分析表明这种新型谐振腔增强型光调制器在保留了谐振增强作用的同时,还结合了非对称结构和对称结构谐振腔增强型光调制器的性能优势,因而更易同时获得高消光比和低插入损耗.该新型器件在一定的调制电压下还可获得较大的反射率差.

**关键词:** 谐振腔增强型光调制器; 消光比; 插入损耗

EEACC: 1250

中图分类号: TN761

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1305-05

## 1 引言

半导体电吸收光调制器按结构可分为两大类:波导型<sup>[1~3]</sup>和垂直腔型<sup>[4~8]</sup>.波导型光调制器具有高消光比、高调制带宽的优势,但波导型光调制器与光纤之间的损耗较大,且不易制成阵列的形式.采用垂直腔结构则可以解决波导型光调制器存在的这些问题,但传统垂直腔型调制器吸收层的作用长度较短,因而消光比较低且工作电压较高.将吸收层置于 F-P 腔中,利用 F-P 腔的谐振增强作用可增加吸收层的作用长度,同时又保证了器件具有较薄的吸收层厚度.具有这种结构及原理的光调制器称为谐振腔增强型(RCE)光调制器.RCE 光调制器具有高消光比、低工作电压、易于耦合及阵列化的优势,在光信息处理、光交换、光计算机等领域具有很好的发展前景和实用价值.

传统 RCE 光调制器由一个 F-P 腔和腔内的吸收层构成,其基本原理多是通过量子限制斯塔克效应(QCSE)改变有源层的吸收系数来使 F-P 腔的反射率或透射率发生变化,从而实现光强的调制.RCE 光调制器按构成 F-P 腔的上下反射镜反射率是否相同可分为对称型和非对称型,按工作方式可分为反射式和透射式.具有对称结构的 F-P 腔的透射率随吸收的变化要远远大于其反射率随吸收的变化,因此对称型 RCE 光调制器多采用透射的工作方式.而具有非对称结构 F-P 腔的反射率随吸收的变化

要远远大于其透射率随吸收的变化,因此非对称型 RCE 光调制器多采用反射的工作方式.非对称型反射式 RCE 光调制器具有较高的消光比,但该类型 RCE 光调制的插入损耗较大.对称型透射式 RCE 光调制器的插入损耗较低,但该类型 RCE 光调制的消光比却较低.因此这两种类型的 RCE 光调制器都很难同时获得高消光比和低插入损耗.目前多见非对称型反射式 RCE 光调制的报道<sup>[4,5,9~13]</sup>.

本文首次提出一种混合型 RCE 光调制器结构,这种新型的光调制器结合了对称型透射式及非对称型反射式 RCE 光调制器各自的性能优势,更易同时获得高消光比和低插入损耗.

## 2 混合型 RCE 光调制的结构设想

### 2.1 对称型透射式和非对称型反射式 RCE 光调制器的性能优势

传统 RCE 光调制器模式波长的反射率和透射率可以分别表示为<sup>[9,12]</sup>:

$$R_{FP} = \frac{(\sqrt{R_t} - \sqrt{R_b} \exp(-d))^2}{(1 - \sqrt{R_t R_b} \exp(-d))^2} \quad (1)$$

$$T_{FP} = \frac{(1 - R_t)(1 - R_b) \exp(-d)}{1 - 2\sqrt{R_t R_b} \exp(-d) + R_t R_b \exp(-2d)} \quad (2)$$

其中  $R_t, R_b$  分别为 F-P 腔顶镜和底镜的反射率;  $d$  分别为吸收层的吸收系数和吸收长度.  $R_t = R_b$

\*北京邮电大学电子工程学院博士科研启动基金资助项目

<sup>†</sup>通信作者. Email:zhou405@263.net

2005-10-28 收到,2006-01-07 定稿

时对应对称结构,  $R_t = R_b$  时对应非对称结构. F-P 腔的模式波长即为 RCE 光调制器的工作波长. 在本文的分析过程中, 如不特殊说明, 反射率及透射率都是指器件模式波长的反射率和透射率. (1), (2) 式可以分别用来描述反射式和透射式 RCE 光调制器的工作特性. 图 1 给出了非对称型反射式、对称型透射式 RCE 光调制器的反射率、透射率随吸收的变化规律.

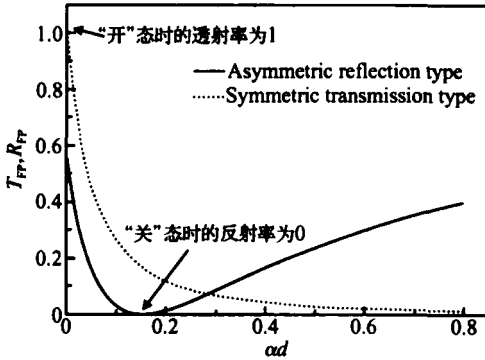


图 1 非对称型反射式(底镜和顶镜的反射率分别为 0.99, 0.7)、对称型透射式 RCE 光调制器(上下反射镜的反射率为 0.9)的反射率及透射率随吸收的变化

Fig. 1 Reflectivity of asymmetric reflection type for bottom and top mirror reflectivity values of 0.7 and 0.99 and transmissivity of symmetric transmission type for bottom and top mirror reflectivity values of both 0.9 versus cavity absorption

消光比和插入损耗是衡量调制器性能的两个重要参数. 为了让消光比达到最高, 最好能使调制器在“关”状态时的反射率或透射率为零. 从(1)式可以发现: 当  $R_t = R_b \exp(-2d)$  时, F-P 腔的反射率为零. 这表明可以通过增加吸收层的吸收使非对称 RCE 光调制器“关”状态时的反射率为 0, 从而实现高消光比(理论上可以为  $\infty$ ), 这也是目前多见非对称型反射式 RCE 光调制器报道的主要原因之一. 但(1)式及图 1 同时也表明, 非对称反射型 RCE 光调制器在“开”状态时(低吸收)的反射率较低, 这意味着此类器件的插入损耗会较大. 为了让插入损耗降到最小, 最好能使调制器在“开”状态时的反射率或透射率为 1. 从(2)式可以发现, 当  $R_t = R_b, \alpha = 0$  时, F-P 腔的透射率为 1. 这表明可以通过降低吸收层的吸收使对称型 RCE 光调制器“开”状态时的透射率趋近于 1, 从而实现低插入损耗(理论上可以为 0). 但(2)式及图 1 同时也表明: “关”状态时(高吸收)对称型透射式 RCE 光调制器无法实现其透射率为 0, 这就意味着此类器件的消光比会较低, 而且此类器件达到“关”状态所需的吸收也较大, 这对降低器件工作电压是非常不利的.

### 2.2 混合型 RCE 光调制器的结构及原理

为了解决传统 RCE 光调制器很难同时获得高消光比和低插入损耗的问题, 本文提出了一种新型 RCE 光调制器结构, 该器件采用反射式, 结构如图 2 所示. 该 RCE 调制器可看成是由一个对称型和一个非对称型的 F-P 腔所构成, 吸收层位于第一个 F-P 腔中. 只考虑理想情况, 即假定不加电场时吸收层的吸收为零(实际上模式波长距离激子吸收峰值波长足够远的情况下可以作这样的近似). 此时对称型 F-P 腔对正入射光及背入射光透明, 器件的反射率只由底镜的反射率所决定, 因此选择高反射率的底镜就可使器件的插入损耗变得很小. 当外加电场后, 激子吸收峰由于 QCSE 效应而发生红移, 使激子吸收峰值波长向模式波长接近, 吸收区的吸收急剧增强. 此时由顶镜、中镜、底镜反射的光波在器件的入射界面有可能完全干涉相消, 使反射率为零, 实现高消光比. 而且入射光波能够在器件内多次反射形成谐振, 保留了传统 RCE 光调制器对吸收的谐振增强作用.

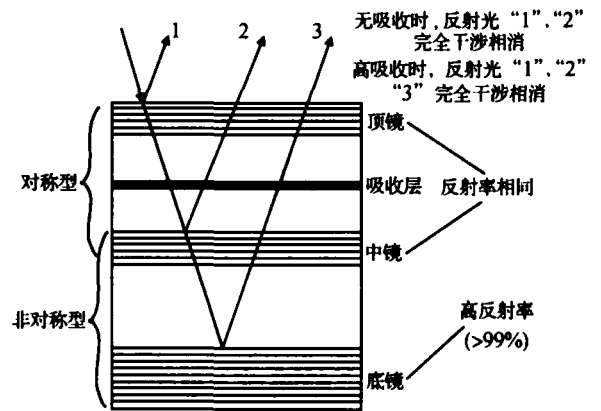


图 2 器件结构

Fig. 2 Schematic structure of the device

### 3 混合型 RCE 光调制器的性能模拟

不失一般性, 在数值模拟中我们假设器件的中心工作波长为 850nm, 顶镜、中镜和底镜是由 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 材料的四分之一波长堆栈构成的分布布拉格反射镜(DBR), 两个腔体的光学长度为半波长的整数倍. 吸收层由多对 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As(9.5nm/3.5nm)量子阱构成. 可以利用多层膜的特征矩阵法<sup>[14]</sup>或多镜腔的相关理论<sup>[15]</sup>对器件的反射特性进行模拟分析. 利用后一种方法, 可以得到混合型 RCE 光调制器(吸收层在第一个腔体中)的反射率公式(所有波长)为:

$$R = \left[ \frac{\sqrt{R_1} e^{\frac{j}{2} d + j(\phi_1^+)} + \sqrt{R_2} e^{-j(\phi_1^+ + \phi_2^+) - \frac{j}{2} d} + \sqrt{R_3} e^{-j(\phi_1^+ + \phi_2^+ + \phi_3^+) - \frac{j}{2} d} - \sqrt{R_1 R_2 R_3} e^{j(\phi_1^+ + \phi_2^+ + \phi_3^+) + \frac{j}{2} d}}{e^{j\phi_1^+ \frac{d}{2}} - \sqrt{R_1 R_2} e^{-j(\phi_1^+ + \phi_2^+) - \frac{j}{2} d} - \sqrt{R_2 R_3} e^{-j(\phi_1^+ + \phi_2^+ + \phi_3^+) + \frac{j}{2} d} - \sqrt{R_1 R_3} e^{-j(\phi_1^+ + \phi_2^+ + \phi_3^+) - \frac{j}{2} d}} \right]^2 \quad (3)$$

其中  $R_1, R_2, R_3$  分别为顶镜, 中镜和底镜的反射率;  $\phi_1^+, \phi_2^+, \phi_3^+$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别为 DBR 对正向入射光和反向入射光的反射相移;  $\phi$  为光波在器件中传播一个总腔长所引入的相移;  $\phi_i$  为光波在器件中分别传播两个子腔长所引入的相位差. 在模拟分析的过程中, 根据 2.2 节中对器件的原理说明, 假定工作波长为模式波长,  $\phi_1^+ = \phi_2^+ = \phi_3^+ = 0, R_1 = R_2$ .

若忽略器件吸收层之外其他材料对光的吸收, 用多层膜的特征矩阵法得到的计算结果同 (3) 式得到的计算结果非常接近. 本文正是基于这两种方法对器件特性进行模拟分析的.

### 3.1 混合型 RCE 光调制器的消光比特性

对于反射式 RCE 光调制器, 消光比定义为“开”状态时与“关”状态时反射率之比. 获得高消光比的最好方法是“关”状态时使器件的反射率为零. 图 3 给出了当底镜反射率为 0.99, 顶镜反射率分别为 0.4, 0.6 和 0.8 时, 混合型 RCE 光调制器与传统非对称型反射式 RCE 光调制器的反射率随吸收常数  $d$  的变化关系.

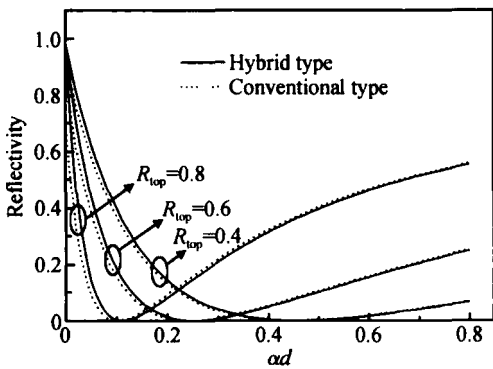


图 3 混合型 RCE 光调制器与传统非对称型反射式 RCE 光调制器反射率随吸收的变化关系 ( $R_{\text{bottom}} = 0.99$ )

Fig. 3 Reflectivity of hybrid type and conventional asymmetric reflection type for bottom mirror reflectivity values of 0.99 versus cavity absorption

从图 3 可以发现, 混合型 RCE 光调制器与传统非对称型反射式 RCE 光调制器的反射率随吸收的变化规律基本相同, 二者都可以通过调整吸收使器件的反射率趋于零, 这说明混合型 RCE 光调制器可以获得高消光比. 而且在底镜反射率相同时, 使器件反射率为零的吸收常数平衡值 (也称为“临界吸收厚度”) 随着顶镜反射率的增加而减小. 因此, 适当提

高顶镜反射率就可以减小这两种类型 RCE 光调制器的吸收常数平衡值, 这意味着只需较薄厚度的吸收层即可得到零反射率, 这对降低器件工作电压是非常有利的.

### 3.2 混合式 RCE 光调制器的插入损耗特性

对于 RCE 光调制器, 插入损耗可以定义为器件“开”状态时 (低吸收时) 反射率或透射率的分贝数, 当吸收为零时器件的插入损耗达到最小. 但在实际中很难实现器件的零吸收, 因此插入损耗与器件的残余损耗有很大的关系. 图 4 给出了混合式与传统非对称型反射式 RCE 光调制器“开”状态时反射率随吸收对比度之间的变化关系. 其中吸收对比度定义为:  $f = \text{high} / \text{low}$ , high, low 分别为“关”状态和“开”状态时器件的吸收. 可以发现, 无论混合式还是非对称型反射式, RCE 光调制器的插入损耗都会随着  $f$  的增加而迅速降低, 当  $f$  增加到一定值时, 插入损耗的变化趋于平缓. 图 4 表明对于非对称型反射式 RCE 光调制器, 其插入损耗会随顶镜反射率的增加而增加. 而 3.1 节的分析却表明增加顶镜的反射率可以进一步降低器件的工作电压, 这是反射式 RCE 光调制器存在的固有缺陷. 对于混合式 RCE 光调制器, 顶镜反射率的变化对器件的插入损耗却几乎没有影响, 而且在吸收对比度、顶镜、底镜反射率相同的情况下, 混合式 RCE 光调制器的插入损耗要小于非对称型反射式 RCE 光调制器.

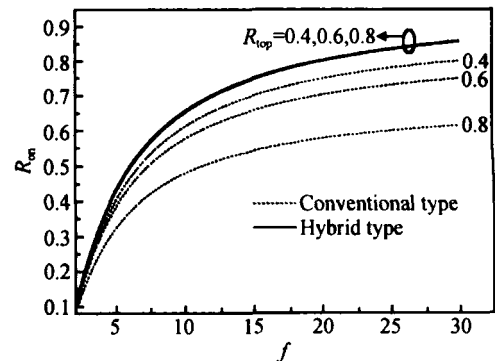


图 4 混合式 RCE 光调制器与传统非对称型反射式 RCE 光调制器“开”状态时反射率随吸收对比度的变化关系 ( $R_{\text{bottom}} = 0.99$ )

Fig. 4 On-state reflectivity of hybrid type and conventional asymmetric reflection type for bottom mirror reflectivity values of 0.99 versus absorption contrast

### 3.3 混合式 RCE 光调制器与非对称型反射式、对称型透射式 RCE 光调制器的性能对比

3.1 及 3.2 节的分析已经表明较非对称型反射式 RCE 光调制器,混合式 RCE 光调制器具有高消光比和低插入损耗的特点.为了更好地说明混合式 RCE 光调制器较非对称型反射式和对称型透射式 RCE 光调制器的性能优势,现将这三种类型 RCE 光调制器的反射率/透射率随吸收的变化关系在同一个坐标中表示出来,如图 5 所示.该图表明这种混合式 RCE 光调制器实际上结合了非对称型反射式和对称型透射式 RCE 光调制器的性能优势,同时获得高消光比和低插入损耗的能力得到了很大的加强.而且在吸收变化一定(调制电压一定)的情况下,混合式 RCE 光调制器更易获得较大的反射率差.

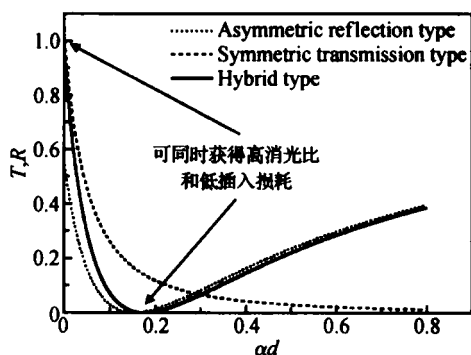


图 5 非对称型反射式(底镜和顶镜的反射率分别为 0.99, 0.7)、对称型透射式(上下反射镜的反射率均为 0.9)、混合型 RCE 光调制器(底镜、中镜和顶镜的反射率分别为 0.99, 0.7, 0.7)的反射率及透射率随吸收的变化

Fig. 5 Reflectivity of asymmetric reflection type for bottom and top mirror reflectivity values of 0.99 and 0.7, transmissivity of symmetric transmission type for bottom and top mirror reflectivity values of both 0.9, and reflectivity of hybrid type for bottom, middle and top mirror reflectivity values of 0.99, 0.7 and 0.7 versus cavity absorption

## 4 结论

本文提出了一种新型的谐振腔增强型光调制器结构,该器件采用三镜两腔结构,吸收层位于顶镜和中镜构成的对称型 F-P 腔中.理论分析表明:这种新型谐振腔增强型光调制器结合了非对称型反射式及对称型透射式谐振腔光调制器的性能优势,能够解决传统谐振腔增强型光调制器的消光比和插入损耗相互制约的问题,同时易获得高消光比和低插入损耗,并可在一定的调制电压下获得较大的反射率差.

将 GaAs 系材料换成 InP 系材料或采用 GaAs/GaInNAs 多量子阱吸收层,可使器件的工作波长拓展到长波长波段.

## 参考文献

- [1] Sun Yang, Wang Wei, Chen Weixi, et al. High extinction ratio polarization independent EA modulator. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(11): 1374
- [2] Wang Zhangtao, Fan Zhongchao, Xia Jinsong, et al. SOI thermo-optic modulator. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(10): 1315 (in Chinese) [王章涛, 樊中朝, 夏金松, 等. SOI 热光调制器. 半导体学报, 2004, 25(10): 1315]
- [3] Yang Xiaohong, Du Yun, Shi Zhiwen, et al. Mach-Zehnder electro-optic polymer modulator with corona poled core layer. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(8): 971
- [4] Loka H S, Smith P W E. Ultrafast all-optical switching with an asymmetric Fabry-Perot device using low-temperature-grown GaAs: material and device issues. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(1): 100
- [5] Marris D, Cordat A, Pascal D, et al. Design of a Si-Ge-Si quantum-well optical modulator. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2003, 9(3): 747
- [6] Wang Qin, Junique S, Agren D, et al. Fabry-Perot electroabsorption modulators for high-speed free-space optical communication. IEEE Photonics Technol Lett, 2004, 16(6): 1471
- [7] Yang Xiaohong, Liang Kun, Han Qin, et al. Resonant-cavity enhanced optical modulator with ultrathin active layer. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(10): 1196 (in Chinese) [杨晓红, 梁琨, 韩勤, 等. 超薄有源层谐振增强型调制器. 光子学报, 2004, 33(10): 1196]
- [8] Unlu M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic device. J Appl Phys, 1995, 78(2): 607
- [9] Law K K, Merz J L, Coldren L A. Superlattice surface-normal asymmetric Fabry-Perot reflection modulators: optical modulation and switching. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(2): 727
- [10] Wherrett B S. Fabry-Perot bistable cavity optimization on reflection. IEEE J Quantum Electron, 1984, 20(6): 646
- [11] Garmire E. Criteria for optical bistability in a lossy saturating Fabry-Perot. IEEE J Quantum Electron, 1989, 25(3): 289
- [12] Yan R H, Simes R J, Coldren L A. Surface-Normal electroabsorption reflection modulators using asymmetric Fabry-Perot structures. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27(2): 1922
- [13] Gerber D S, Droopad R, Maracas G N. A GaAs/AlGaAs asymmetric Fabry-Perot reflection modulator with very high contrast ratio. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(1): 55
- [14] Wei Guanghui, Yan Jixiang, Ha Liuzhu, et al. Matrix optics. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995 (in Chinese) [魏光辉, 阎吉祥, 哈流柱, 等. 矩阵光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995]
- [15] Ren Xiaomin, Campbell J C. Theory and simulations of tunable two-mirror and three-mirror resonant-cavity photodetectors with a build-in liquid-crystal layer. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(11): 1903

## Theoretical Analysis of a Novel Resonant Cavity Enhanced Modulator with High Extinction Ratio and Low Insertion Loss<sup>\*</sup>

Zhou Zhen<sup>†</sup>, Yu Chongxiu, and Ma Jianxin

(Key Laboratory of Optical Communication & Lightwave Technologies of the Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Beijing University of Post & Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A novel type of resonant cavity enhanced (RCE) modulator, which is composed of a symmetric RCE modulator and an asymmetric F-P cavity, is proposed. The analysis shows that this RCE modulator combines the advantages of symmetric and asymmetric RCE modulators and thus can easily achieve a high extinction ratio and low insertion loss simultaneously. This modulator has a larger variable reflection region under a certain modulation voltage.

**Key words:** resonant cavity enhanced modulator; extinction ratio; insertion loss

**EEACC:** 1250

**Article ID:** 0253-4177(2006)07-1305-05

---

<sup>\*</sup>Project supported by the Found for PhD Research of School of Electronic Engineering of Beijing University of Post & Telecommunications

<sup>†</sup>Corresponding author. Email:zhou405@263.net

Received 28 October 2005, revised manuscript received 7 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics