

# 超薄有源层谐振腔增强型调制器\*

杨晓红 梁 琨 韩 勤 牛智川 杜 云 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

**摘 要** 提出利用超薄有源层制备高性能谐振腔增强型(RCE)半导体电吸收调制器件的可能性,并与波导型器件进行性能对比;对透射和反射两种类型器件优化分析了器件结构,进行了性能比较,结果表明:在插入损耗相当的情况下,反射式器件具有更高的调制对比度。

**关键词** 调制器;量子阱;RCE

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## 0 引言

目前,半导体电吸收型(EA)调制器有波导型和垂直型两个主要类型.其基本原理都是利用量子限制 Stark 效应(QCSE),通过电场改变多量子阱(MQW)有源区的吸收系数,从而对光进行强度调制.波导型 EA 调制器的研究多集中在与多量子阱激光器的集成方面,研究比较成熟,在中长距离高速光通讯传输系统中,已得到广泛应用<sup>[1]</sup>.垂直腔型调制器在上世纪 90 年代有过研究,主要对象是工作在短波波段的 GaAs 基大周期多量子阱的非对称谐振腔调制器件和自电光器件(SEED)<sup>[2]</sup>.对于可用于光通讯波段的 GaAs 基高性能超薄有源层 RCE 电光调制器尚未见报道.

本文所说的薄层有源区,是指 RCE 型调制器的吸收层只有一到几对量子阱,利用 QCSE 效应和腔的选模增强效应,使器件在一定电压调制下的光调制对比度达到最大.与大周期数 MQW 调制器相比,其特点是:无需几十甚至上百对的量子阱,使材料生长简化,应变条件放宽;器件调制电压降低,调制频率提高;器件的电致折射率的改变对有效腔长和模式位置的影响可以忽略不计.在 GaAs 基长波长材料,如 GaInNAs 等出现之后,RCE 型调制器可能作为外调制器,在光通讯广泛领域得到重要应用.

## 1 RCE 调制器的基本结构

RCE 调制器结构和 RCE 探测器的结构非常相似,由顶部及底部 DBR 镜面和中间的量子阱吸收层组成,如图 1 所示.调制器主要的参数是消光比、插入损耗,以及调制电压和调制频率.高性能调制器件要求在较小的调制电压下有较大的消光比和小的

插入损耗.按初始状态为关态或开态来分,RCE 调制器可以分为常通类和常关类.为提高消光比,对于对称量子阱结构(本文主要针对对称量子阱分析),设计的 RCE 调制器为常通类,其模式波长在激子吸收峰的长波一侧,此时器件有源区的吸收较小,出射光强接近入射光强;当施加一小的偏压时,由于 QCSE 效应,激子吸收峰红移,使激子峰值波长向模式波长接近,有源区的吸收急剧增强,出射光减小甚至接近于零,达到高对比度光调制.在量子阱结构的选择上,尽可能增大量子阱中阱垒的导带差,使得激子峰增强,并且在一定电场下保持激子峰的半宽.利用 GaAs/AlAs 作为 DBR 材料,InGa(N)As/GaAs MQW 为有源层,可以突破 GaAs 基器件的波长限制,使工作波长拓展到光通讯波段.

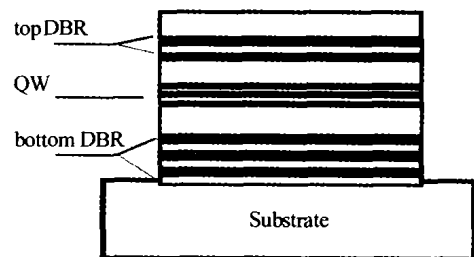


图 1 RCE 调制器的基本结构  
Fig. 1 Schematic structure of RCE modulator

## 2 RCE 与波导型电吸收调制器的比较

与波导式电吸收调制器相比,RCE 调制器具有独特的器件结构和优点,我们主要以调制对比度和插入损耗两个参数的理论对比进行说明.其中,RCE 器件以反射式工作为例.按一般的定义,消光比为开态出射光与关态出射光之比,即

$$Ratio_{on/off} = \frac{P_{out}(0)}{P_{out}(V)} = \frac{P_{out}(\alpha_0 d)}{P_{out}(\alpha_v d)}$$
$$Ratio_{on/off}(\text{dB}) = 10\log(Ratio_{on/off}) = 10\log[P_{out}(\alpha_0 d)] - 10\log[P_{out}(\alpha_v d)]$$

式中  $P_{out}(\alpha_0 d)$  为开态出射光功率,  $P_{out}(\alpha_v d)$  为关态出射光功率,  $\alpha$  为调制吸收区的有效吸收系数,  $d$  为

\*国家自然科学基金(60137020)和国家“973 计划”(TG2000036603,2001CB309506)资助项目  
Tel:010-82304343 Email:xhyang@red.semi.ac.cn  
收稿日期:2003-08-12

器件吸收层的长度(或厚度).

对于长度为  $L$  的波导型电吸收调制器, 出射功率为  $P_{out}(V) = P_{in}e^{-\alpha(V)L}$ , 假设  $P_{in}$  为 1, 如以 dB 表示出射光功率, 那么出射光功率随吸收长度  $\alpha L$  呈线性变化, 器件的消光比(dB 为单位)随吸收系数也是线性变化, 如图 2(a) 所示(坐标为左下坐标); 对于有源区为  $d$  的 RCE 型器件, 出射光功率随吸收长度呈非线性变化, 器件的消光比有类似的非线性变化规律, 在谐振吸收峰位置有急剧的增大, 如图 2(b) 所示(坐标为右上坐标). 对于  $L$  为  $100 \mu\text{m}$  左右, 开态有效吸收系数  $\alpha_0$  为  $0.1/\mu\text{m}$ , 关态有效吸收系数  $\alpha_c$  为  $0.5/\mu\text{m}$  的波导型器件, 开态的吸收损耗较大, 但是由于器件有很长的吸收长度, 所以可以达到很高的调制对比度; 对于一个顶部 DBR 为 14 对, 底部 DBR 为 32.5 对, 吸收层厚度  $d = 10.8 \text{ nm}$ , 开态吸收系数  $\alpha_0$  为  $0.2/\mu\text{m}$ , 关态吸收系数  $\alpha_c$  为  $1/\mu\text{m}$  的 RCE 器件, 器件的开态吸收损耗较小, 插入损耗为  $-2.64 \text{ dB}$ , 并且由于关态时的谐振吸收, 器件在理论上同样可以达到  $> 70 \text{ dB}$  的消光比.

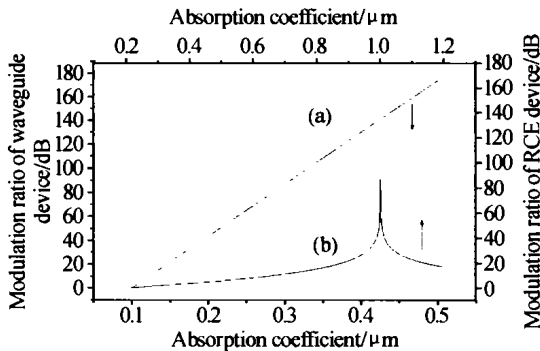


图 2 (a) 长度为  $100 \mu\text{m}$  波导型器件的插入损耗吸收系数  $\alpha$  的变化, 吸收系数从  $0.1/\mu\text{m} \sim 0.5/\mu\text{m}$ , (b) RCE 型器件的插入损耗随有效吸收系数  $\alpha$  的变化, 吸收系数从  $0.2/\mu\text{m} \sim 1/\mu\text{m}$

Fig. 2 (a) The insertion loss of waveguide modulator as a function of absorption coefficient, in the range of  $0.1/\mu\text{m} \sim 0.5/\mu\text{m}$ , (b) The insertion loss of RCE modulator as a function of absorption coefficient, in the range of  $0.2/\mu\text{m} \sim 1/\mu\text{m}$

由于 RCE 调制器的吸收层厚度很小, 器件可在较小调制电压下达到高对比度调制. 此外由于缩小了器件尺寸, RCE 调制器可以达到很高的调制带宽; 其分析方法与 RCE 探测器的方法相同, 在此不作赘述<sup>[3]</sup>. 综上所述, 理论上, RCE 调制器件可以具有较低的插入损耗, 利用电调制谐振吸收的急剧变化获得高消光比, 同时保持宽带调制.

### 3 RCE 调制器器件结构优化选择

RCE 调制器可以有反射式和透射式两种工作方式. 一般而言, 对于具有高反射 DBR 的器件, 反射式较为常见, 易于得到较高的调制对比度. 本文

对二者分别作出理论计算和各自的优化分析. 在设计中, 选择出射光强随吸收系数变化率为最大的结构作为最佳 RCE 腔结构, 再选择合适的吸收层厚度, 使得吸收长度和 RCE 腔结构匹配, 达到最佳调制. 插入损耗也是必须考虑的一个参数, 它和调制消光比是一对相互制约的变量, 在设计中要求在一一定的透过率下, 使调制深度尽可能大.

理论计算 RCE 器件的透射率和反射率随 DBR 反射率及有源区吸收系数的变化时, 将 RCE 腔的 DBR 都等效为具有一定反射率的镜面, 得到一个近似的解析公式. 计算中利用了  $R + T + A = 1$  的关系, 并设器件入射表面的等效反射率为  $R$ , 等效透射率为  $T$ , 有源层的等效吸收率  $A$ , 三者的表述式分别为

$$R = \frac{R_t(1 - \sqrt{R_b/R_t}e^{-\alpha d})^2}{(1 - \sqrt{R_t R_b}e^{-\alpha d})^2} \quad (1)$$

$$A = \frac{(1 + R_b e^{-\alpha d})(1 - R)(1 - e^{-\alpha d})}{(1 - \sqrt{R_t R_b}e^{-\alpha d})^2} \quad (2)$$

$$T = 1 - R - A \quad (3)$$

式中  $R_t, R_b$  分别为顶部、底部 DBR 反射镜的反射率,  $\alpha$  和  $d$  分别为有源层吸收系数和吸收长度.

在计算中, 利用多层膜的特征矩阵法计算具体的透射和反射率. 在量子阱周期数少于 3 对时, 需要精确设计有源层使之位于腔中驻波峰值处, 使调制吸收达到最大效率. 在所有的理论计算中, 都忽略了有源层之外的 Space 层和 DBR 层的吸收. 在此近似下, 特征矩阵法的计算结果与上面的解析算法得到的结果非常接近.

#### 3.1 反射型器件的结构分析与优化

利用式(1)~(3), 对反射式器件的反射率随吸收系数的变化进行了详细计算, 得到反射型器件的结构特点:

1) 从图 3(a) 可以看到, 在反射率趋近于零的部分, 随着底部 DBR 反射率的增大, 曲线斜率增大. 工作在此范围的器件将随底部 DBR 反射率的增大而具有更高的调制对比度和更小的插入损耗, 所以优化器件的底部 DBR 反射率很大(一般  $> 99\%$ ).

2) 在底部 DBR 对数一定时, 随顶部 DBR 对数的增加, 器件反射率最小点的归一化吸收长度( $\alpha d$ ) 减小, 亦即, 有源区量子阱总厚度越小的器件, 需要更多的 DBR 对数以达到高调制的要求. 图 3(b) 中给出底部 DBR 为 32.5 对( $R = 0.99989$ ) 时, 在反射率最小点的吸收长度( $\alpha d$ ) 随顶部 DBR 对数增加而减小, 此时对于薄吸收层(较少量子阱对数)的器件, 更有利于降低器件的调制电压.

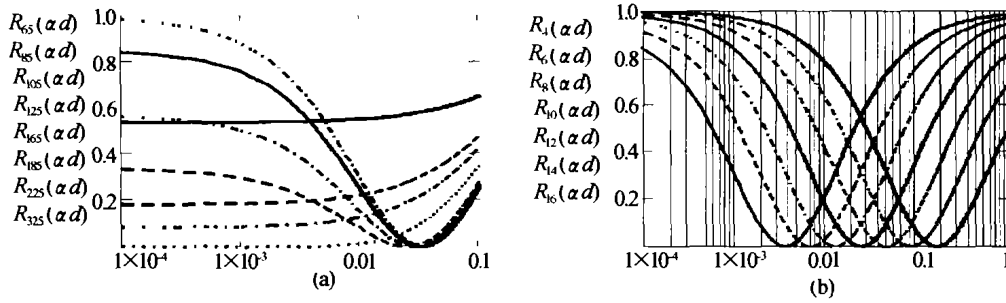


图3 (a)顶部 DBR 为 9 对时,底部 DBR 对数逐渐增加时器件反射率的变化,(b)底部 DBR 为 32.5 对时,顶部 DBR 对数分别为 0~18 对时器件反射率随归一化吸收长度的变化  
 Fig. 3 The reflectance of the device with different Bottom DBR pairs, the top DBR is of 9 pairs, (b) The reflectance of the device with top DBR from 0~18 pairs, the bottom DBR is 32.5 pairs

通过以上的结构分析,容易得到几个优化的器件实例. DBR 材料选为 GaAs/AlAs, 假定电调制使吸收系数从  $0.2/\mu\text{m}$  变化到  $1/\mu\text{m}$ , 在插入损耗大致相等的情况下 ( $-2 \sim -3$  dB, 忽略耦合损耗), 不同量子阱对数的器件都可以达到很高的消光比, 即使在

一个 QW 的情况下器件仍然可以达到 30 dB 的对比度, 具体数据计算结果由表 1 给出. 所以采用单量子阱反射式调制器是可行的, 这将大大减小调制电压 (达到与波导型调制器相当的水平甚至更小), 同时可提高调制频率.

表 1 各种腔面反射率的 RCE 调制器的优化后结构

底部 DBR	顶部 DBR	量子阱(周期数 × 阱宽 nm)	达到最小反射时的 $ad$	$R_1$	$R_2$	消光比		插入损耗
				吸收系数 $1/\mu\text{m}$	吸收系数 $0.2/\mu\text{m}$	$R_2/R_1$	dB	
32.5	0	$87 \times 6.9$	0.610289	$1.341544\text{E-}9$	0.43377	3.23336E8	85.096	-2.47007
	10	$3 \times 7.5$	0.024388	$8.619407\text{E-}6$	0.4402	51070.7982	47.08	-2.51967
	12	$2 \times 8.75$	0.012877	$1.239473\text{E-}5$	0.438454	35374.2276	45.48	-2.50615
	14	$2 \times 5.4$	0.006787	$1.918379\text{E-}4$	0.43074	2245.33317	33.51	-2.44689
	16	$1 \times 4.55$	0.003567	$1.30893\text{E-}4$	0.42169	3221.63905	35.080	-2.37839

3.2 透射型器件的结构优化及与反射式器件比较

利用与反射式器件相仿的理论分析, 得到不同 DBR 和 QW 量子阱参数的透射器件结果, 优化规律如下

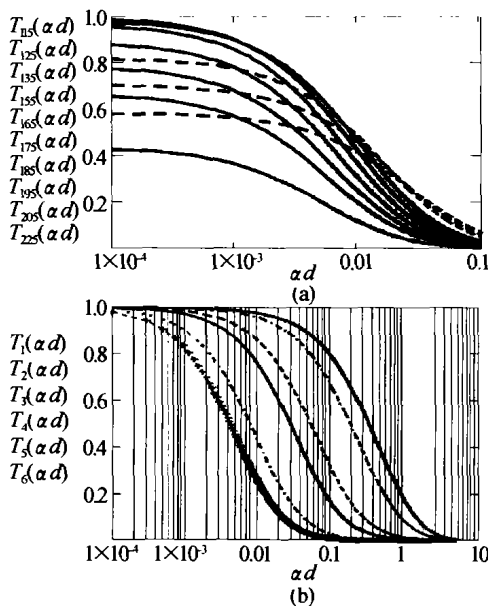


图4 (a)顶部 DBR 为 13 ( $R=0.98136$ ) 对时,底部 DBR 对数为 11.5~22.5 对时的器件透射曲线,(b)优化的透射式器件的透射率随  $ad$  的变化  
 Fig. 4 (a) The transmittance of devices with different bottom DBR number, the top DBR is of 13 pairs, (b) The transmittance of optimized devices as a function of  $ad$

1) 不论吸收层的结构如何, 透射型器件最佳结构的底部 DBR 反射率与顶部 DBR 反射率应相等. 如图 4(a) 所示,  $T_{16.5}$  表示底部 DBR 为 16.5 对, 与 13 对顶部 DBR 大致相等. 底部 DBR 反射率大于或小于顶部 DBR 反射率时, 器件的透过率减小且随归一化吸收长度的变化减缓.

2) 具有不同 DBR 反射率的器件, 其透过率随吸收系数的变化规律一致. 如图 4(b) 所示,  $T_1 \sim T_5$  表示不同顶部/底部 DBR 结构优化后的器件透过率, 分别为  $1/4.5, 3/6.5, 7/10.5, 9/12.5, 13/16.5, 15/18.5$ . 在腔体结构中, DBR 反射率越高, RCE 效果越强, 关态对应的归一化吸收长度越小, 也就是说需要更少的量子阱对数达到相同调制深度.

根据上面的规律性分析, 我们用传输矩阵方法得到几个优化设计的透射型器件实例. DBR 材料仍为 GaAs/AlAs, 每个量子阱吸收层厚 10 nm, 垒的宽度为 20 nm, 吸收系数从  $0.2/\mu\text{m}$  变化到  $1/\mu\text{m}$ . 从表 2 中可以看到, 透射式器件同样可以在有源区只有几对 QW 的情况下工作; 但是在透过率大致相等的情况下 (亦即插入损耗大致相当的情况下), 透射式的调制对比度比反射式器件小很多: 反射式器件的对比度  $> 30$  dB, 而透射式器件对比度  $< 12$  dB. 所以比较而言, 反射式器件具有更好的调制参数. 但

表 2 各种腔面反射率的透射型 RCE 调制器的优化后结构

顶部 DBR 对数	量子阱 对数	底部 DBR 对 数	$T_1$	$T_2$	消光比		插入损耗
			吸收系数 $1/\mu\text{m}$	吸收系数 $0.2/\mu\text{m}$	$T_2/T_1$	$10\log(T_2/T_1)$	
1	200	4.5	0.047427	0.424257	8.94547	9.51603	-2.39771
7	50	10.5	0.036983	0.298643	8.07514	9.0715	-1.54061
9	30	13.5	0.022104	0.227667	10.29981	10.12829	-1.12195
13	9	16.5	0.022667	0.220893	9.745136	9.887879	-1.08403
15	5	18.5	0.01802	0.273747	15.19129	11.81595	-1.38912

透射式器件的光纤耦合、封装和调试都比较容易实现,对于反射式器件则需要特殊的光纤或微透镜完成光的高效耦合。

#### 4 结论

本文提出和分析了超薄有源层 RCE 型调制器,利用简化的等效镜面方法和传输矩阵法对反射式和透射式器件分别进行结构优化分析,论证了反射式器件相对于透射式器件可以具有更高的调制对比度。通过与波导型电吸收器件的比较,可以认为:反射式 RCE 型调制器可以在达到高对比度调制的同时减小器件的插入损耗。选择 GaAs 基长波长有源层材

料制备通讯波段的 RCE 型反射式电光调制器件具有很大吸引力和优越性。

#### 参考文献

- 1 Newey J. Optical modulators get ready for a high-speed network future, compound semiconductors. 2002. march
- 2 Lentine A L, Goossen K W, Walker J A, et al. High-speed optoelectronic VLSI switching chip with >4000 optical I/O based on flip-chip bonding of MQW modulators and detectors to silicon CMOS. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electron*, 1996, 2(1):77
- 3 Selim ünü M, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic device. *J Appl Phys*, 1995, 78(2):607

## Resonant-cavity Enhanced Optical Modulator with Ultrathin Active Layer

Yang Xiaohong, Liang Kun, Han Qin, Niu Zhichuan, Du Yun, Wu Ronghan

*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

Received date:2003-08-12

**Abstract** A resonant-cavity enhanced optical modulator is proposed, with an ultrathin active layer in the cavity. This kind of device has been compared with normal waveguide EA modulator, and the device structures are optimized theoretically. The two kinds of device of transmission and reflection mode are compared, the results showed that the reflection device has higher extinction ratio in same level of insertion loss.

**Keywords** Optical modulator; Quantum wells; RCE



Yang Xiaohong was born in 1973. She is now working in the Institute of Semiconductors, the Chinese Academic of Sciences as a post doctor. Her current research interest is focused on semiconductor opto-electronics devices.