

非对称法布里-伯罗腔光调制特性分析及高对比度 GaAs/AlGaAs 调制器

陈志标 高文智 陈弘达 吴荣汉

(集成光电子国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文分析了非对称法布里-伯罗腔(ASFP)调制特性,得出了反射率为零的条件。设计生长了常通和常关两种高对比度反射式调制器件,测量了它们的电调制反射谱,理论与实验比较符合。

PACC: 4265P, 4280K

1 引言

八十年代中期以来,一种利用量子限制 Stark 效应发展起来的多量子阱光调制器件获得了迅速的发展^[1~4]。该器件集光调制器和光探测器功能于一体,开关速度快,并且易于与电子元件集成,是发展光互连、光交换和光计算的基础性器件。该器件自发展以来人们致力于提高对比度^[5,6](在这里对比度被定义为高态和低态反射率之比,即为: R_{HI}/R_{LO}),降低插入损耗(插入损耗定义为 $10\log R_{HI}$)。要获得高的对比度最好的办法是使 R_{LO} 趋近于零。反射式调制器件包含了一个非对称法布里-伯罗腔(ASFP),为获得高对比度、低插入损耗,我们有必要分析 ASFP 腔达到反射率为零的条件。此外,外加电场的变化使吸收系数受到调制,因此我们也需要得出反射率的变化与吸收系数变化的关系。本文将讨论这些问题,并与实验进行对比。

2 ASFP 腔的相位平衡和振幅平衡

反射式多量子阱光调制器具有 pin 结构,如图 1 所示。其 i 区为不掺杂的本征层,n 区一般含有由 20 周期左右的 $\lambda/4$ 厚的 AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 构成的 DBR's (Distributed-Bragg-Reflectors) 组成的高反射率膜堆。光从 p 区垂直入射后,经过 i 区多量子阱的吸收又被 n 区高反膜堆反射,然后一部分又被顶部 GaAs/空气界面反射回来,光在腔内来回反射,由于顶部和底部反射率不一样,因而构成一个非对称腔。其顶部可以加增透膜降低反射率,也可以加几周期 DBR 以增大反射率。为了得出一个反射率的解析表达式,我们将量子阱反射式光调制器等效为一个三层膜,器件底部的

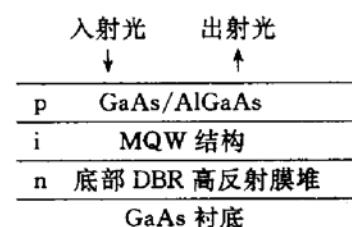


图 1 器件结构示意图

* 国家自然科学基金项目

陈志标 1970 年生,博士生,主要从事光调制器件,光双稳器件研制
1995 年 8 月 28 日收到初稿,1996 年 1 月 25 日收到修改稿

DBR 高反射膜堆被等效为底部高反射率层, 器件的 MQW 区被等效为具有复数折射率 $n_{MQW} - i\alpha\lambda/4\pi$ 的中间层(其中 α 为量子阱区的吸收系数, n_{MQW} 为量子阱区折射率的实部), 实际器件顶部 DBR 和空气层被等效为顶部等效折射率层, 等效折射率为 n_2 .

三层膜的反射率可表示为:

$$R = (B + F \sin^2 \theta) / (1 + F \sin^2 \theta) \quad (1)$$

其中

$$B = R_t (1 - R_a/R_t)^2 / (1 - R_a)^2$$

$$F = 4R_a / (1 - R_a)^2$$

而

$$R_a = \sqrt{R_t R_b e^{-ad}}$$

$$\theta = \frac{2\pi n_{MQW} d}{\lambda} + \frac{\omega}{2}$$

$$R_t = \left(\frac{n_2 - n_{MQW}}{n_2 + n_{MQW}} \right)^2$$

ω 为底部 DBR 相移; R_t 、 R_b 为顶部和底部的光强反射系数; d 为量子阱区总厚度

要使 R 为零, 必须满足下列两个条件, 即

$$\sin \theta = 0 \quad (2)$$

和

$$B = 0 \text{ 即 } ad = \frac{1}{2} \ln \frac{R_b}{R_t} \quad (3)$$

(2)式和(3)式具有明显的物理意义, (2)式表示从顶部反射到空气中的光与进入 ASFP 腔中吸收又被底部 DBR 反射到空气中的光相位相反, (3)式表示它们的振幅相等. 这样, 两类光相抵消, 使反射率为零. 满足相位平衡条件的波长即 ASFP 腔的模式波长. 在 ASFP 腔模式位置, 进入 ASFP 腔的光将在上下两界面来回反射, 使吸收增大, 相应地, 反射谱将在模式位置出现一个凹谷. 分析(1)式我们可知在模式位置当吸收变化时, R 变化最大, 因此器件应工作在模式位置.

图 2 分别为在模式位置, 顶部反射率从 0.05 变到 0.5 时反射率 R 与 ad 的关系曲线(底部反射率假定为 1). 设满足振幅平衡条件的 ad 等于 $a_0 d_0$, 当 $ad < a_0 d_0$ 时, R 上升, 当 $ad > a_0 d_0$ 时 R 也上升. 在 $ad < a_0 d_0$ 范围, 腔里吸收不足, 从腔里反射到空气中的光大于从顶部反射到空气中的光, 随着吸收减少, 两类光抵消减少, R 增大. 我们称 $ad < a_0 d_0$ 的情形为欠饱和, 在 $ad > a_0 d_0$ 范围, 腔里吸收很强, 使反射到空气中的光小于从顶部反射的光, 吸收越多, R 越大, 我们称这种情形为过饱和. 欠饱和和过饱和都使 R 上升, 但由图 2 可以看出, 欠饱和时, R 随 ad 的减少上升快, 而过饱和时, R 随 ad 的增大而上升慢, 而在平衡情形附近, R 几乎不随 ad 而变化, 因此为了增大高低态的反射率之差, 应避开平衡工作点 $a_0 d_0$, 使器件工作在 $ad < a_0 d_0$ 的区域.

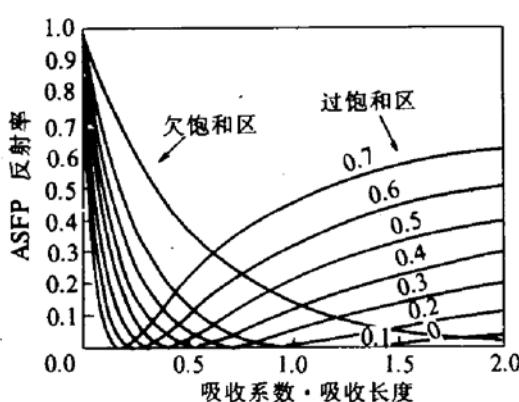


图 2 在模式波长位置 ASFP 腔反射率与吸收系数和吸收长度的乘积的关系

以顶部反射率为参数, 设定底部 DBR 反射率为 1 随 ad 的减少上升快, 而过饱和时, R 随 ad 的增大而上升慢, 而在平衡情形附近, R 几乎不随 ad 而变化, 因此为了增大高低态的反射率之差, 应避开平衡工作点 $a_0 d_0$, 使器件工作在 $ad < a_0 d_0$ 的区域.

3 ASFP 腔的多层膜传输矩阵分析

三层膜模型虽然给出了一个解析表达式,但是比较简单,理论计算难于与实际器件的特性相吻合。反射式光调制器件是一个多层结构,因而为较为精确分析反射谱,最好采用多层膜传输矩阵法,每一层的传输矩阵可以写为:

$$\begin{bmatrix} \cos(kn_j d_j) & \frac{i}{n_j} \sin(kn_j d_j) \\ i n_j \sin(kn_j d_j) & \cos(kn_j k_j) \end{bmatrix},$$

其中 n_j 为第 j 层的折射率; d_j 为第 j 层的厚度; i 为虚数因子; k 为真空波数 $2\pi/\lambda$ 。在有吸收的 MQW 区, n_j 应是一个复数 $n_j = n_{MQW} - i\alpha\lambda/4\pi$, 其中 n_{MQW} 为折射率实部; α 为吸收系数。设第一层的传输矩阵为 M_1 , 第 j 层的传输矩阵为 M_j , 如果我们要计算从空气中射入, 然后经过第一层…… j 层直到第 N 层的反射率, 我们应先计算从空气中看这 N 层的等效折射率, 等效折射率设为 n_{eff} , 则有:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_{eff} \end{bmatrix} = M_1 \cdots M_j \cdots M_{N-1} \begin{bmatrix} 1 \\ n_N \end{bmatrix}$$

上面 $M_1 \cdots M_j \cdots M_{N-1}$ 为 $N-1$ 个矩阵的连乘。其中 n_N 为第 N 层的折射率, 得出 n_{eff} 后反射率 R 可以写为:

$$R = \left| \frac{1 - n_{eff}}{1 + n_{eff}} \right|^2$$

根据材料的具体结构, 我们可以计算出器件的反射谱特性。

4 高对比度的常通和常关型调制器件的设计

为了设计调制器, 我们必须知道所用的量子阱材料 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的吸收系数, 采用实验和理论计算相拟合的方法我们得出了 10nm 阵宽的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱的吸收谱。吸收系数是连续带的吸收和激子吸收两个部分的和, 根据实验得出的外场为零时激子峰附近和其短波方向的吸收系数^[7], 我们可以确定这两个部分的比例因子, 从而得出不同波长和不同电压下的吸收系数。吸收谱如图 3 所示。由图 3 可知, 如果调制器的工作波长在零电场时的激子峰(大约在 850nm)附近, 则随着电场的增大, 吸收系数减小, 反射率增大, 具有常关工作特性。如果工作波长选在零电场时激子峰的长波一侧(一般远于激子峰 6nm), 则电场增大时吸收系数增大, 反射率降低, 称为常通工作。按前面的分析, 在设计时使常通和常关型调制器件的低态反射率为零, 就可以使对比度达到很高的值。

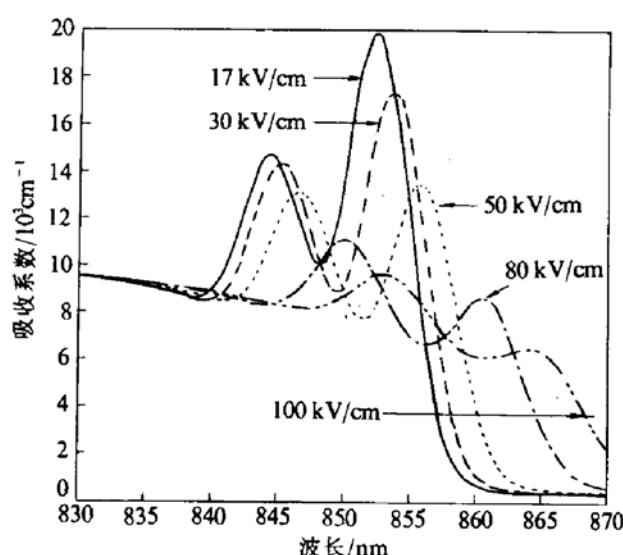


图 3 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱结构电吸收谱
阱宽 10nm; 垒宽 6nm.

一般常关型调制器件的量子阱数目都取 50 个左右^[8,9],这是因为这些器件顶部都要镀减反膜,但这样作的结果基本消除了 ASFP 腔的作用,使低态反射率很难到零,得不到高的对比度.要获得高的对比度必须利用 ASFP 腔的调制作用.对于常关型器件,其吸收系数在激子峰附近约为 20000/cm,如果顶部为 GaAs/空气界面,其反射率为 0.3,从(3)式可知,达到零反射率所需的量子阱数为 30 个,大大少于一般的调制器件 50 个量子阱的数目,而且由于量子阱区厚度减薄,其工作电压也可望降低.对于常通型器件,其工作波长在激子峰的长波方面,其所对应的吸收系数在 6000~8000/cm 左右,要达到零的反射率所需的量子阱数为 75~100 个,这样 i 区整个的厚度大约为 1.5~1.9 μm(加上了势垒厚度 6nm 和上下覆盖层的厚度),按 80~100kV/cm 的电场计算,对应的外加电压约为 12~19V,所需电压是比较高的,因而我们还是采用了较少的量子阱(50 对),同时在顶部增加几周期 DBR 以增大反射率.对于 50 对量子阱,按(3)式,如果吸收系数取 7000/cm,则所需的顶部反射率约为 0.5. DBR 的顺序应该是高折射率的靠近空气界面,1 对 DBR 即为 1 对高低折射率相间的 $\lambda/4$ 波厚的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{AlAs}$,其中高折射率材料不用 GaAs 是为了避免其对入射光的吸收.计算 DBR 反射率同样采用多层膜传输矩阵法,入射介质为空气,出射介质为 MQW 区,下表是不同对数 DBR 的反射率.

DBR 对数	反射率	对应波长/nm
1	0.429	850
2	0.547	850
3	0.651	850
4	0.737	850
5	0.805	850

从上表可以看出,顶部反射率要达到 0.5,所需要的 DBR 对数为 2.设计的常通型器件 VL24 和常关型器件 VL23 的结构分别如图 4 和 5 所示.根据图示结果所计算的反射谱如图 6 和 7 所示,从图可知,它们的低态反射率均可到零,从而可达到很高的对比度,但是常关型器件的高态反射率比较低,插入损耗比常通型的大得多,这主要是因为常关型器件加电场和不加电场的吸收系数之比比常通型小的缘故.

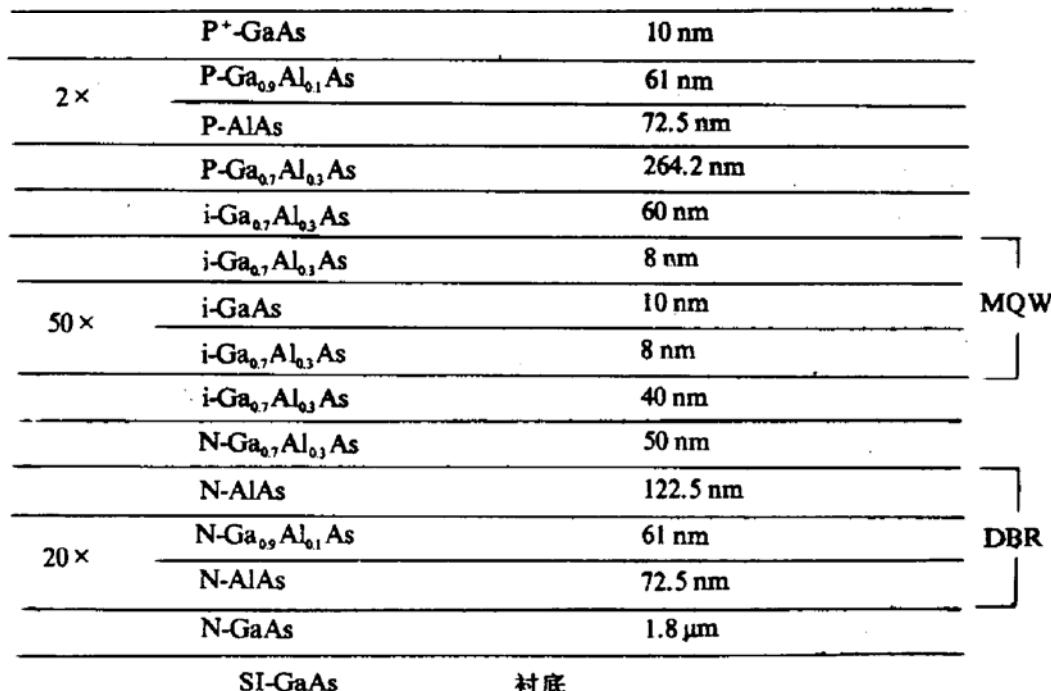


图 4 VL24 结构

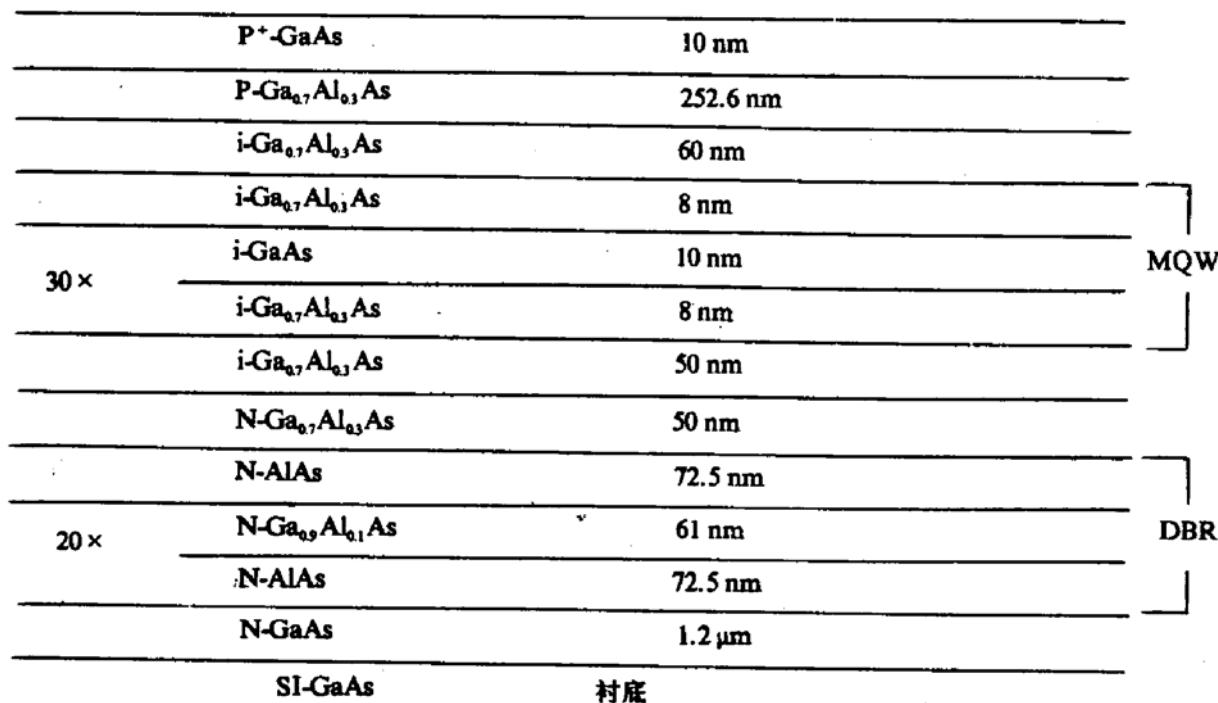


图 5 VL23 结构

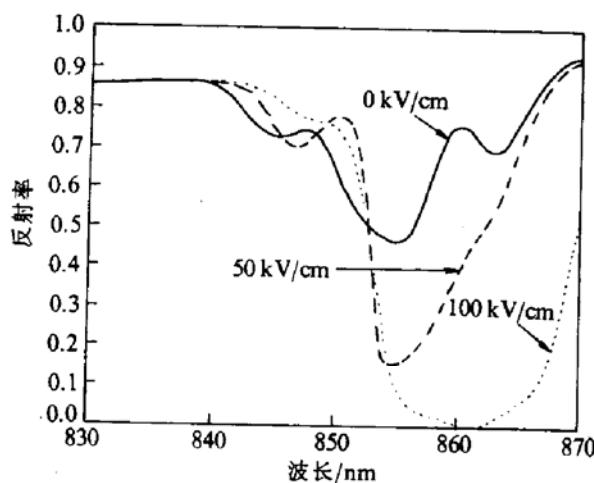


图 6 VL24 理论反射谱图

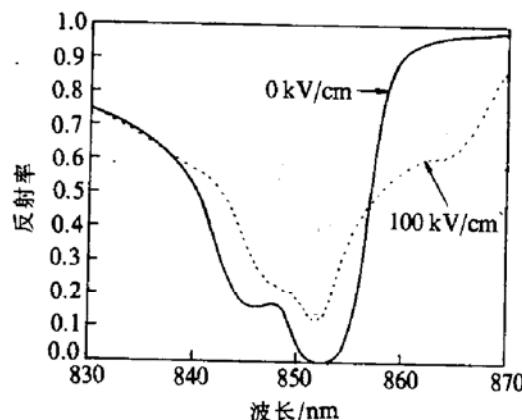


图 7 VL23 理论反射谱

5 VL23、VL24 电场调制反射谱的测量

我们制成的光调制器件台面大小为 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, 窗口面积为 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, 图 8 和图 9 分别为常通和常关器件的反射谱。无外加电场时激子峰的位置都在 860nm, 与实际设计的 850nm 相比激子峰偏向了长波方向, 这说明材料在生长时阱宽变宽。图 8 中 ASFP 的模式在 867nm。外加电场为零时, 高态反射率 $R_{HI} = 43\%$, 5V 或 8V 时, 低态反射率 $R_{LO} = 4\%$, 对比度大约为 10。低态反射率没有达到设计的零值, 这一方面是因为阱宽比实际宽引起吸收系数的减少^[10], 另外一个方面则可能是顶部 DBR 的反射率比设计值低。图 9 中常类型器件的高态反射率为 22%, 低态反射率为 5%, 也没有达到零的反射率, 主要是因为阱宽比实际宽引起吸收系数的减少, 另外一个原因则可能是因为 ASFP 腔的模式没有与激子峰真正

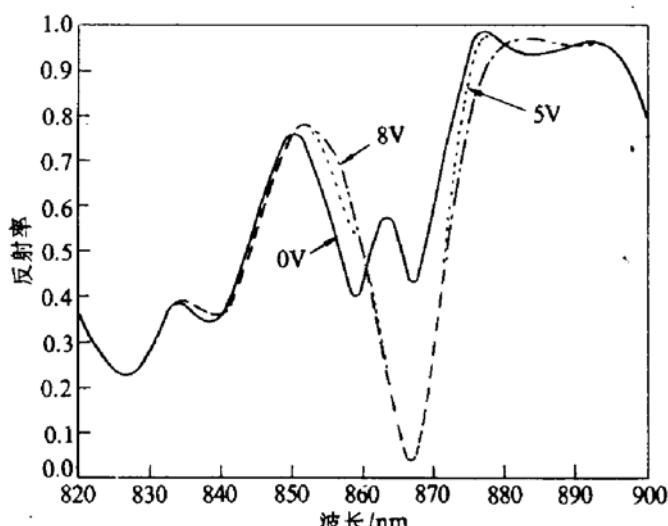


图 8 VL24 器件实测反射谱

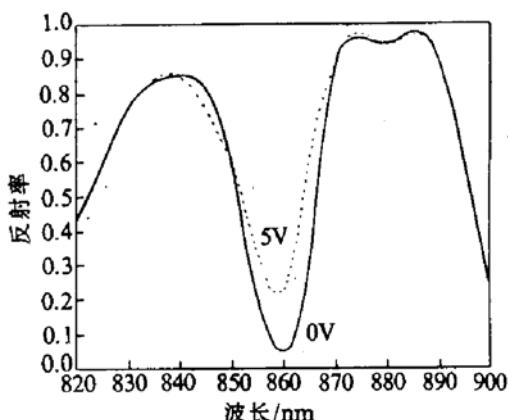


图 9 VL23 器件实测反射谱图

重合,事实上采用微区光反射谱方法对 VL23 生长片测定反射率的均匀性时,在生长片的某些位置的确得到了零的反射率,此时应是模式与激子峰恰好重合的情形.

6 讨论

本文分析了 ASFP 腔的调制特性,利用三层膜模型得出了反射率为零的条件,更为精确的传输矩阵法计算也表明适当的器件设计可以使低态反射率到零,从而获得高对比度的器件,据此我们设计了常通和常关两种高对比度的器件. 实际测量常通型达到了较高的对比度(~ 10)和较低的低态反射率(4%). 但低态反射率没有达到设计的零值,这主要是因为材料生长均匀性有一定的偏差,阱宽变宽了,激子峰由设计的 850nm 变到了 860nm,从而引起吸收系数的下降,低态反射率的升高. 另外也可能是顶部 DBR 的反射率比理论计算值低. 常关型虽然测到了接近零的反射率,但需要外加电场为零时的激子峰与模式的真正重合,分析表明它们之间偏离几纳米就可使低态反射率由零上升到 5%,而事实上由于材料生长会引入误差,要使之真正重合是很困难的,因而从这点来说,常关型难于达到零的反射率. 对于常通型器件来说,由于我们可以通过改变电压来改变吸收系数,使之满足振幅平衡条件,因而常通型容易做到高的对比度. 事实上常通型调制器工作区域的吸收系数可在 0~7000/cm 变化,我们设计器件时使之在 3000~5000/cm 就满足振幅平衡条件,这样即使材料生长有误差,比如模式偏离或者激子峰的偏离使得平衡条件改变,但通过电压的调制我们却可以改变吸收系数使之重新满足平衡条件,达到零的反射率. 为此,我们需要在顶部加更多对数的 DBR 或者增加量子阱的数目,进一步的实验研究正在进行之中.

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, J. E. Henry *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**: 821~823.
- [2] A. L. Lentine, H. S. Hinton, D. A. B. Miller *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**: 51~53.
- [3] Frederick B. McCormick, Tom J. Cloonan, Anthony L. Lentine *et al.*, *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8): 1601.
- [4] A. V. Krishnamoorthy, A. L. Lentine *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(11): 1288.

- [5] K.-K. Law, M. Whitehead *et al.*, Electron. Lett., 1991, **27**(20):1863.
- [6] Kechong Hu, Li Chen *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**(9):1108.
- [7] D. S. Gerber, G. N. Maracas, IEEE J. Quantum Electron., 1993, **29**(10):2589.
- [8] A. L. Lentine, H. S. Hinton *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1989, **25**:1928~1936.
- [9] F. B. McCormick, T. J. Cloonan *et al.*, Appl. Opt., 1993, **32**(26):5153.
- [10] G. Lengyel, Kevin W. Jolley *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1990, **26**(2):296.

Modulation Characteristics Analysis of Asymmetric Fabry-Perot Cavity and GaAs/AlGaAs Modulator With High Contrast Ratio

Chen Zhibiao, Gao Wenzhi, Chen Hongda and Wu Ronghan

(National Integrated Optoelectronics Laboratory, and Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 28 August 1995, revised manuscript received 25 January 1996

Abstract Modulation characteristics of ASFP cavity are analysed and the conditions of zero reflectivity of ASFP cavity are provided. The devices with high contrast ratio under normally-on and normally-off operation are designed and compared with theoretical calculation by measuring reflectance spectra under applied electric field.

PACC: 4265P, 4280K