

光学多层介质膜与多量子阱集成器件

林世鸣

(中国科学院半导体研究所, 北京)

1989年5月9日收到

本文采用光学传输矩阵元的方法设计了一种集成型反射式多量子阱器件, 并给出了理论计算结果. 采用 MOCVD 生长方法制作了该器件, 它由 n 型多层增透介质膜、 i 型多量子阱、 p 型多层高反射率介质膜所组成. 测试了该器件的光电流谱和反射率谱, 并与理论结果作了比较, 二者符合得很好. 这种器件可以发展成兼具调制、开关、双稳复合功能的反射式集成器件.

主题词 集成、多量子阱器件、调制器

一、引言

长期以来多层介质膜被广泛应用于光学元件的制作中, 它们通常采用沉积法镀于光学器件的表面上以制取抗反膜、光束分离器、光通滤波器和极化器等.

近年来, 由于半导体生长技术的进步, 采用 MBE 和 MOCVD 生长法可生长厚度精确控制的突变薄膜, 从而越来越广泛地用于制作各种半导体光电器件^[1]. 量子阱(层厚度 $d < 100 \text{ \AA}$) 和光学多层介质膜(层厚度 $d > 500 \text{ \AA}$) 都具有多层平板结构, 而且可以考虑工艺相容地生长在同一衬底上以制作各种光电集成器件^[2,3]. 本文中报道的集成型反射式多量子阱光调制器就是这样一种光电集成器件, 它将在双向光通信系统, 光开关阵列, 光学互联等方面得到广泛的应用. 在文中, 我们给出了该调制器的器件设计和特性测量结果, 通过对多层介质膜的测试, 我们讨论了 MOCVD 生长层均匀性的影响, 通过对调制器光电流谱和反射率谱的测量, 我们估算了它的调制率.

二、多层光学介质膜的反射系数

根据光学传输理论, 一个光学薄膜的传输性质可由 1 个光学矩阵来表征, 而当一个波长为 λ 的光入射到一个多层介质膜时(其各层对它是透明的), 其传输性质则由各层光学矩阵的乘积来表示^[4]:

$$\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \prod_{v=1}^m \begin{bmatrix} \cos(\delta_v) & i \sin(\delta_v)/Q_v \\ i Q_v \sin(\delta_v) & \cos(\delta_v) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ Q_{v+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中第 v 层膜传输相因子 $\delta_v = 2\pi Q_v d_v \cos(\theta_v)/\lambda$, 第 v 层膜光学容抗 Q_v 对于 TE 波可表为 $Q_v = n_v \cdot \cos(\theta_v)$, 对于 TM 波可表为 $Q_v = n_v/\cos(\theta_v)$. θ_v 为第 v 层折射角,

n_v 为第 v 层折射率. 多层膜的等效光学容抗 Q 可由 $Q = \mu_2/\mu_1$ 求出, 而它的反射率则为

$$R = [(\epsilon_0 - Q)/(\epsilon_0 + Q)] \cdot [(\epsilon_0 - Q)/(\epsilon_0 + Q)]^* \quad (2)$$

采用两种具有高、低折射率材料相间构成的层厚为 $1/4$ 波长的多层膜可以制得高反膜, 这是因为从每一个界面反射到前表面的光是同相相干增强的缘故. 考虑到我们目前采用 GaAlAs 材料系生长多量子阱器件, 我们选用同种材料系生长高反膜. 根据(1)、(2)式的计算机计算结果和用 MOCVD 法生长的高反膜测试结果示于图 1 中, 其结构示于图右侧: 它由 10 个周期的 AlAs ($721 \text{ \AA}$) 和 $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ ($614 \text{ \AA}$) 相间组成, 其中材料折射率取用已发表文献的数值^[5].

虽然理论计算表明两种材料的折射率相差越大, 层数越多, 多层膜的反射率也越大, 但是由于 GaAs 对 860 nm 波长的光 (器件的工作光波长) 是不透明的, 我们选择了 $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 而不是 GaAs 作为高折射率层的材料. 由图 1 可见, 计算结果和测试结果都表明高反射率只在 860 nm 附近约为 100 nm 有限波长区域内可以得到, 但测试结果略小于计算结果. 它的反射率可达 95% , 这一点测得值与计算值完全一致.

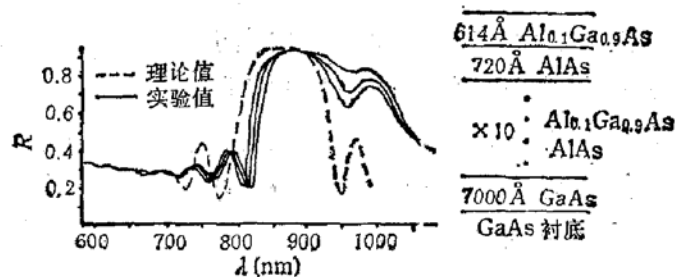


图 1 垂直入射的高反膜反射率谱的计算值和测量值, 右图是它的结构图

此外, 从图 1 还可看到, 实际测得的反射率曲线对比理论曲线偏于长波长一侧; 还有, 图中各测试曲线是在样片上的不同位置测得的结果, 它们之间最大的偏差为 10 nm , 这一点可结合图 2 给予解释. 图 2 给出的是多层膜反射率随 AlAs 层变化而变化的计算结果, 计算表明随着层厚的增加高反射率带移向长波长一侧, 其变化率约为 $6 \text{ nm (波长)}/10 \text{ \AA (厚度)}$, 对于 $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 层厚的变化亦有同样的结果. 由此可见, 上述测试结果对理论结果的偏差, 以及它们相互之间的偏差分别是由于实际生长层厚度大于设计值, 以及层厚不均匀所造成的. 根据计算结果, 推算该样片生长层厚的不均匀度小于 $20 \text{ \AA}$.

在器件的简单设计中, 当 $(n_h/n_l)^{2m} \cdot (n_s/n_0) \gg 1$ 时, 高反射率带宽和反射率极值可用下面两个公式来估算:

$$\text{带宽 } \Delta = (4\lambda/\pi) \sin^{-1}[(n_h - n_l)/(n_h + n_l)] \quad (3)$$

$$\text{极大值 } R = 1 - 4(n_l/n_h)^{2m} \cdot (n_0/n_s) \quad (4)$$

式中 n_h 和 n_l 分别表示高、低折射率层的折射率, m 是它的周期数, n_0 和 n_s 分别为入射介

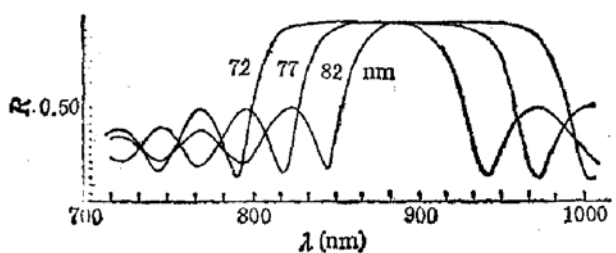


图 2 以 AlAs 厚度为参数的 $1/4$ 波长高反膜反射率谱计算值

质和衬底的介电常数。例如,由上二式可以简单地估算得:具有图 1 中结构的多层膜,其带宽为 91nm,反射率极值为 95%,可见这两个公式还是足够精确的。

三、集成型反射式多量子阱调制器的结构设计

集成型反射式多量子阱调制器被设计成由 n 型抗反膜、i 型多量子阱和 p 型高反膜组成的 pin 二极管结构,我们用 MOCVD 生长法在 10^{18}Si 掺杂的 n 型衬底上制作了该

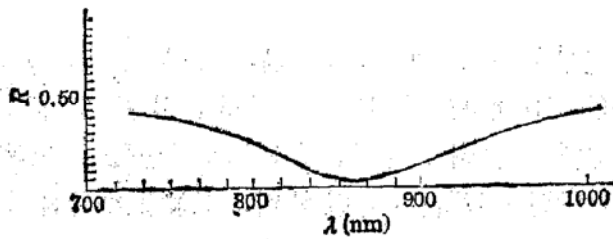


图 3 4 周期 1/4 波长增透膜反射率谱计算值

器件,这是一种倒结构的调制器。生长抗反膜是为了有助于器件在指定光波段上光的耦合,这儿为了简化制作过程,抗反膜 ($4 \times \text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$) 被设计得类似高反膜,即亦由具有低、高折射率相间的材料,以及 1/4 波长厚的周期双层构成,但其中低折射率层须作为第一层。抗反膜的传输特性示于图 3 中,其反射系数极小值被设计于 860 nm 波长处,因为激子吸收峰将处于该波长,光调制器将工作于该波长附近。

i 型量子阱区的设计主要涉及阱宽、阱深、阱数和垒宽的选择,其计算原理如下^[4]:量子阱调制器的基础是量子限制 Stark 效应,即在外加电场下量子阱的量子化能级(包括二维激子)的能量和跃迁几率的变化。为此须解方程

$$H\psi = E\psi.$$

其中 H 是当电场 F 沿垂直于阱平面的 z 方向施加在量子阱材料上时的电子-空穴对有效质量哈密顿,它可以表示为:

$$\begin{aligned} H &= H_e + H_h + H_{eh} \\ &= -\frac{\hbar^2}{2m_{e\perp}^*} \frac{\partial^2}{\partial z_e^2} + V_e(z_e) + eFz_e \\ &\quad -\frac{\hbar^2}{2m_{h\perp}^*} \frac{\partial^2}{\partial z_h^2} + V_h(z_h) - eFz_h \\ &\quad -\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{e^2}{\varepsilon(|z_e - z_h|^2 + r^2)^{1/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \mu = \frac{m_{e\parallel}^* m_{h\parallel}^*}{m_{e\parallel}^* + m_{h\parallel}^*}$$

上式中 H_e 、 H_h 分别是电子、空穴在电场中的动、势能哈密顿, H_{eh} 则是二者相对运动和库仑作用的哈密顿。 z_e 、 z_h 是电子、空穴位置坐标的 z 轴分量, $V_e(z_e)$ 、 $V_h(z_h)$ 是限制电子和空穴的势垒, r 是电子、空穴在 x 、 y 平面上的相对位置, $m_{e\perp}^*$ 、 $m_{h\perp}^*$ 和 $m_{e\parallel}^*$ 、 $m_{h\parallel}^*$ 分别是电子、空穴在 z 方向和 x 、 y 平面上的有效质量。

$$\text{设 } \psi(z_e, z_h, r, F) = \psi_e(z_e, F) \cdot \psi_h(z_h, F) \cdot \psi_{eh}(r, F) \quad (6)$$

首先求 $\psi_e(z_e, F)$ 和 $\psi_h(z_h, F)$, 它们可由方程

$$\begin{cases} H_e \psi_e(z_e, F) = E_e \psi_e(z_e, F) \\ H_h \psi_h(z_h, F) = E_h \psi_h(z_h, F) \end{cases}$$

来确定. 为减少计算量宜采用无限深势阱近似, 同时为减少由此带来的误差而采用有效阱宽算法, 由此可得上式的解为

$$\begin{cases} \phi_c(z_c, F) = a_c(F)A_i(z_c) + b_c(F)B_i(z_c) \\ \phi_h(z_h, F) = a_h(F)A_i(z_h) + b_h(F)B_i(z_h) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $A_i(z)$ 、 $B_i(z)$ 分别是第一类、第二类 Airy 函数, 系数 a_c 、 b_c 、 a_h 、 b_h 可由边界条件和归一化条件确定, 从而得波函数 ϕ_c 和 ϕ_h .

然后求 $\phi_{eh}(r, F)$, 它可采用平面类氢原子 $1s$ 波函数的形式, 只是将玻尔半径换成激子半径 $\lambda(F)$: $\phi_{eh}(r, F) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{x} e^{-r/\lambda}$ (8)

将(7)、(8)式代入(6)式, 再代入 $\left\langle \phi \left| \frac{-e^2}{\epsilon(|z_c - z_h|^2 + r^2)^{3/2}} \right| \phi \right\rangle$ 对于 λ 进行变分, 可求激子束缚能, 进而确定给定电场 F 值下的激子能量. 当取导带价带能量不连续比为 57:43, $m_c^* = 0.0665m_0$, $m_{hh\perp}^* = 0.34m_0$, $m_{hh\parallel}^* = 0.1m_0$, $m_{hv\perp}^* = 0.094m_0$, $m_{hv\parallel}^* = 0.2m_0$, $L = 105 \text{ \AA}$, $V_c = 228 \text{ meV}$, $V_h = 172 \text{ meV}$, 可以计算得激子能级对外加电压的变化率为 $d\lambda/dV = 1.25 \text{ nm/V}$.

基于上述计算设计多量子阱区具有 $60 \times 105 \text{ \AA GaAs}/60 \text{ \AA Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的结构, 其中势垒宽度的选择基于避免阱间耦合的考虑, 阱数的选择出于具有足够的有效工作区域的考虑.

P 型高反膜如前所述具有多层 $\text{AlAs}/\text{Ga}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{As}$ 周期双层的结构, 但由于这时的人射介质不是空气而是多量子阱材料, 如若采用前述的 10 周期结构, 其反射率将不再为 95%, 而要下降为 85%, 因此层数增为 12 周期. 最后再生长一层 P 型 GaAs 在 P 型高反膜上以便于作 P 型电极, 另一电极则由 n 型衬底直接引出, 并施一反偏电压于器件上, 测得上述器件的击穿电压大于 30V.

四、集成型反射式多量子阱调制器的特性测试

基于公式(1)和(2), 我们对该器件的传输特性进行了理论计算. 其中多量子阱区本是具有 60 个周期的双层结构的多层膜, 但是我们的计算表明, 如若把它视为具有等效折射率 $n_{\text{eff}} = (n_w \cdot d_w + n_b \cdot d_b)/(d_w + d_b)$ 的均匀介质 (上式中 n_w 、 d_w 和 n_b 、 d_b 分别是阱区和垒区的折射率和宽度), 并不影响计算结果, 于是这就很大地减少了计算量.

图 4 同时给出了器件的结构图, 器件传输特性的理论计算结果和实验测量结果. 由于在计算中多量子阱材料被看成为透明的介质, 因而在波长大于 860 nm 的波长区计算结果和实验结果是相符的. 至于在波长小于 860 nm 的波长区, 激子和能带间的吸收将起决定性的作用, 特别是位于 860 nm 波长的反射率的急剧减少是由激子吸收引起的, 其中谷 α 和 β 相应于电子从导带分别向重空穴带和轻空穴带的跃迁.

图 5 给出了该器件在不同反偏电压下的光电流谱和反射率谱的实验测量结果, 根据此图既可看到该器件所具有的调制作用, 又可解释调制作用的由来. 由光电流谱可见, 当一个反偏电压 (图中 -15V) 加到器件两端时, 由于外电场中的量子 stark 效应, 激子吸

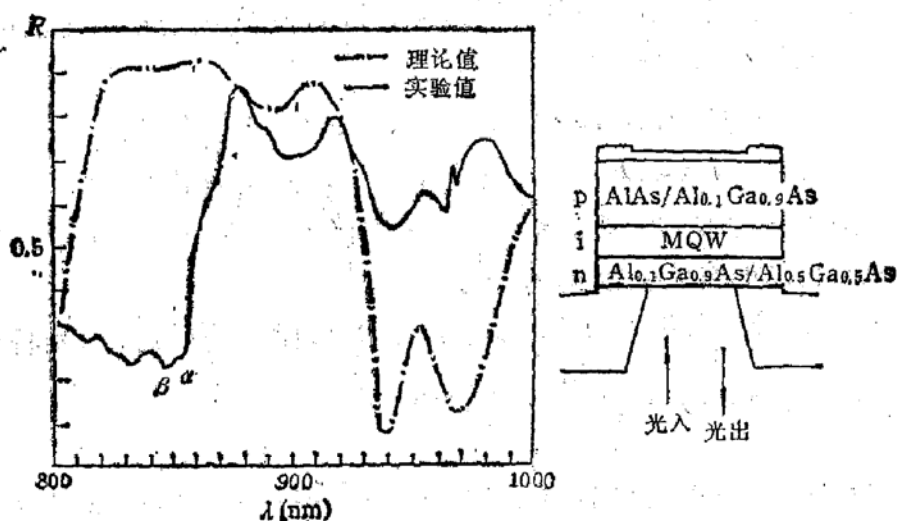


图4 集成反射式多量子阱器件反射率谱计算值和测量值,右图是器件结构

收峰将要向长波侧移动,它引起了相应波长处(如图中 $\lambda = 870 \text{ nm}$ 处)反射率的减少,从而实现了反射光对入射光的吸收调制^[6,7]。另外由图还可看到,这种调制器在不同的工作光波段可以实现两种有区别的调制作用:在 $850-857 \text{ nm}$ 波长区,偏置电压的增加导致反射率的增加,因此这是一种正调制的作用;而在 $857-890 \text{ nm}$ 波长区,偏置电压的增加导致反射率的减少,因此是一种负调制作用。这种不同调制作用的存在使这种器件可以发展成为开关和双稳器件,关于这种器件的开关和双稳特性我们另文讨论。根据实验结果,在这两个波长区域内,当反偏压由 0 V 上升到 15 V 时,该

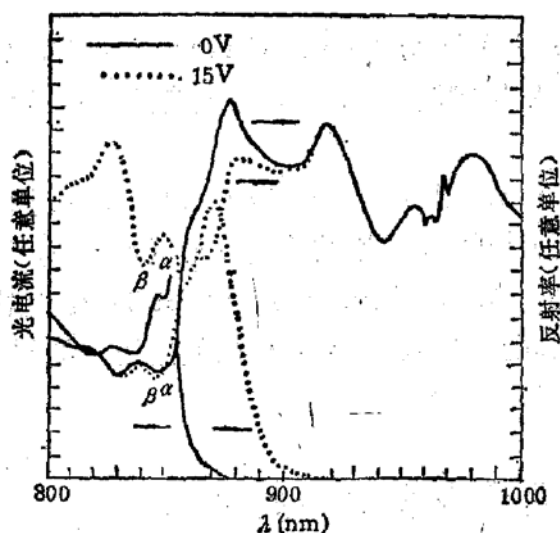


图5 集成反射式多量子阱器件在不同反偏电压下测得的光电流谱和反射率谱

器件的反射率的变化(调制率)都可达到 2.2 dB 。

五、结 论

由于光学多层介质膜和量子阱都具有多层平板结构,并且可以工艺相容地生长在同一衬底上以制作各种光电集成器件,从而使一些透射式器件成为反射式器件,因此它将成为光电集成的一种重要结构形式。光学传输矩阵元的方法可以适用于此类器件的设计,本文报道了用 MOCVD 生长法制作的此类器件,并给出了它的光电流谱和反射率谱的测试结果,这个结果与理论计算符合得很好。在反射率谱上观察到了该器件的正调制作用和负调制作用,因此这种器件可以作为兼具调制、开关、双稳复合功能的器件使用。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus, J. R. A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *IEEE J. QE-21*, 1462 (1985).
- [2] R. L. Thornton, R. D. Burnham, and W. Streifer, *Appl. Phys. Lett.*, 45, 1028 (1984).
- [3] G. D. Boyd, D. A. B. Miller, and D. S. Chemla, S. L. McCall, A. C. Gossard, and J. H. English, *Appl. Phys. Lett.*, 50, 1119 (1987).
- [4] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, (1980, 6th Ed)
- [5] A. N. Pikhtin and A. D. Yaskov, *Sov. Phys. Semicond.*, 14, 389 (1980).
- [6] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, *Phys. Rev.*, B32, 1043 (1985).
- [7] P. J. Braddley, P. Wheatley, G. Parry, J. E. Midwinter, I. Mistry, J. S. Roberts, *Electronics Letters*, 23, 213 (1987).

Integrated Devices with Optical Dielectric Layers and Multiple Quantum Wells

Lin Shiming

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The optical transmission matrix method has been used to design an integrated reflection MQW device. The device was made in a MOCVD equipment by growing an MQW between a high-reflectance stack and anti-reflectance layers. The photocurrent and reflectivity spectra of the device have been measured and compared with the theoretical calculation results. Close agreement was demonstrated among them. It can be expected to make an integrated reflection device with complex functions, such as modulation, switching and bistability.

Key words Integration, MQW device, Modulator