

多量子阱光波导传输特性分析*

马春生

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学分区 吉林大学电子工程系 长春 130023)

摘要 本文给出了普适于任意阱数的方波折射率分布的多量子阱光波导的模场分布函数和特征方程,并以 GaAs/AlGaAs 多量子阱光波导为例分析讨论了波导结构参量及折射率分布对其传输特性的影响.

EEACC: 4130,5240D; PACC: 6865

1 引言

随着 MBE 和 MOCVD 技术的发展,多量阱(MQW)光波导已经成为某些光电子器件的重要结构,如半导体激光器^[1],调制器^[2,3],开关^[4]等等.国内外对这种光波导的模场,传输,双折射等特性已进行了某些分析报道,所采用的方法有等效折射率法^[5-9],有限元法^[10,11],转移矩阵法^[7-9,12-15]等等.其中等效折射率法是一种简便的近似分析方法,但精度不够高;有限元法是一种精度较高的近似分析方法,但分析过程比较繁琐;转移矩阵法是一种精确的分析方法,但给出的特征方程缺乏明确的物理意义.

本文通过求解波动方程并利用波导边界条件,导出了普适于任意阱数的方波折射率分布的 MQW 光波导的模场分布函数和特征方程.这些公式以递推公式形式给出,是一组精确分析计算 MQW 光波导的模场分布和传输特性的公式,其中的特征方程形式规范,物理意义比较明显.文中实例分析了 GaAs/AlGaAs MQW 光波导的传输特性,给出了 TE₀ 和 TM₀ 基模有效折射率的具体计算结果,并讨论了某些波导结构参量及折射率分布对模传输特性的影响.

2 模场分布函数和特征方程

方波折射率分布的 MQW 光波导的横截面图如图 1 所示.令波导芯由 n 个折射率阱层和 $n-1$ 个折射率垒层组成,其折射率和厚度分别为 n_1, t_1 和 n_2, t_2 ,因此波导芯总厚度为 $t = nt_1 + (n-1)t_2 = (n-1)\Lambda + t_1$,式中 $\Lambda = t_1 + t_2$ 为周期长度,并令 $r = t_1/\Lambda$ 为阱层厚度在周期长度中所占的比率.波导芯两侧的包层介质的折射率分别为 n_0 和 n_3 ,令 $n_1 > n_0, n_2, n_3$,并令 $n_0 \geq n_3$.这里注意的是,垒层折射率 n_2 可大于,等于或小于包层折射率 n_0 ,即 $n_2 \geq n_0$ 或 $n_2 < n_0$.

* 国家自然科学基金资助项目

马春生 男,1945年生,副教授,从事专业为集成光电子学和导波光学
1993年12月2日收到初稿,1993年10月29日收到修改稿

令 $\Phi(x)$ 代表 TE 模的横向电场 $E(x)$ 或 TM 模的横向磁场 $H(x)$, N 为 TE 或 TM 模的有效折射率, 并令 $n_0 < N < n_1$, 则 $\Phi(x)$ 和 N 为下述波动方程的解.

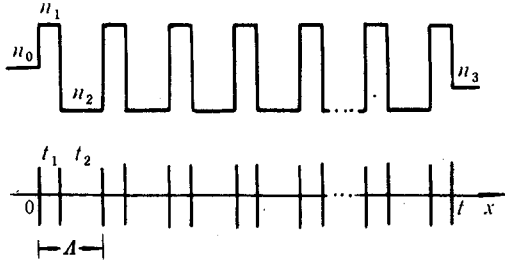


图 1 MQW 光波导的横截面及折射率分布图
 $n_1 > n_0, n_2, n_3; n_0 \geq n_3; n_0 \geq n_2$ 或 $n_0 < n_2$

$$\Phi''(x) + k_0^2(n_j^2 - N^2)\Phi(x) = 0 \quad (j = 0, 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中波数, λ_0 为真空中光波长. 令

$$T_j = \begin{cases} \gamma_j/\gamma_1 & (\text{TE 模}) \\ (n_1^2/n_j^2)(\gamma_j/\gamma_1) & (\text{TM 模}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \gamma_1 = k_0(n_1^2 - N^2)^{1/2}, \\ \gamma_2 = k_0|N^2 - n_2^2|^{1/2}, \\ \gamma_j = k_0(N^2 - n_j^2)^{1/2} \quad (j = 0, 3) \end{cases}$$

求解方程(1)并利用边界条件则可得到模场分布函数和模特征方程.

2.1 模场分布函数

$$\Phi(x)/\Phi(0) = \begin{cases} \exp(\gamma_0 x) & (x \leq 0) \\ \dots\dots \\ A_i \cos \gamma_1 [x - (i-1)\Delta] + B_i \sin \gamma_1 [x - (i-1)\Delta] \\ ((i-1)\Delta \leq x \leq (i-1)\Delta + t_1, i = 1, 2, \dots, n) \\ \dots\dots \\ \begin{cases} C_i \text{ch} \gamma_2 [x - (i-1)\Delta - t_1] + D_i \text{sh} \gamma_2 [x - (i-1)\Delta - t_1] & (N > n_2) \\ C_i \cos \gamma_2 [x - (i-1)\Delta - t_1] + D_i \sin \gamma_2 [x - (i-1)\Delta - t_1] & (N < n_2) \end{cases} \\ ((i-1)\Delta + t_1 \leq x \leq i\Delta, i = 1, 2, \dots, n-1) \\ \dots\dots \\ C_n \exp[-\gamma_3(x-t)] \quad (x \geq t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Phi(0)$ 为 $x=0$ 处的边界场强, 系数 A_i, B_i, C_i, D_i 的递推公式为

$$\begin{cases} C_i = A_i \cos \gamma_1 t_1 + B_i \sin \gamma_1 t_1 & (i = 1, 2, \dots, n) \\ D_i = (-A_i \sin \gamma_1 t_1 + B_i \cos \gamma_1 t_1) T_2 & (i = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A_{i+1} = C_i \text{ch} \gamma_2 t_2 + D_i \text{sh} \gamma_2 t_2 \\ B_{i+1} = T_2 (C_i \text{sh} \gamma_2 t_2 + D_i \text{ch} \gamma_2 t_2) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N > n_2) \quad (5)$$

或

$$\begin{cases} A_{i+1} = C_i \cos \gamma_2 t_2 + D_i \sin \gamma_2 t_2 \\ B_{i+1} = T_2 (-C_i \sin \gamma_2 t_2 + D_i \cos \gamma_2 t_2) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N < n_2) \quad (6)$$

初始值为 $A_1 = 1, B_1 = T_0$.

2.2 模特征方程

$$\text{tg} \gamma_1 t_1 = (T_3 + T_2 P_n) / (1 - T_3 T_2 P_n) \quad (7)$$

式中 P_n 的递推公式为

$$Q_i = (1 + T_2 P_i \operatorname{tg} \gamma_{1t_1}) / (T_2 P_i - \operatorname{tg} \gamma_{1t_1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

$$P_{i+1} = (1 + T_2 Q_i \operatorname{th} \gamma_{2t_2}) / (T_2 Q_i + \operatorname{th} \gamma_{2t_2}) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N > n_2) \quad (9)$$

或

$$P_{i+1} = (1 - T_2 Q_i \operatorname{tg} \gamma_{2t_2}) / (T_2 Q_i + \operatorname{tg} \gamma_{2t_2}) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N < n_2) \quad (10)$$

初始值为 $P_1 = T_0 / T_2$.

3 计算结果及讨论

作为实例本文计算了 GaAs/AlGaAs MQW 光波导 TE₀ 和 TM₀ 基模的有效折射率 N , 计算结果示于图 2 至图 6 中. 图中实线对应 TE₀ 模, 虚线对应 TM₀ 模. 计算中取真空中光波长 $\lambda_0 = 1.15 \mu\text{m}$.

图 2 至图 4 显示了某些波导结构参量对模有效折射率的影响. 取 GaAs 阱层折射率 $n_1 = 3.5$, AlGaAs 垒层折射率 $n_2 = 3.2$, 波导芯两侧为相同的 AlGaAs 包层, 其折射率 $n_0 = n_3 = 3.3$.

图 2 显示了阱数 n 对基模有效折射率 N 的影响, 取比率 $r = 0.5$, 即阱层厚度与垒层厚度相等, $t_1 = t_2$, 并取波导芯总厚度 $t = 0.5, 1.0, 1.5 \mu\text{m}$. 可以看出在波导芯总厚度 t 固定的条件下, 当阱数 n 从最小值 $n=1$ 增大时, 模有效折射率 N 将从最大值迅速地减小. 但当阱数 n 增加到足够大时, 模有效折射率 N 则变化得很缓慢, 并趋于某一常数. 此时由于波导芯总厚度 t 固定, 当阱数 n 很小时, 量子阱结构中的周期长度 Λ 很大, 此时量子阱效应相当弱. 随着

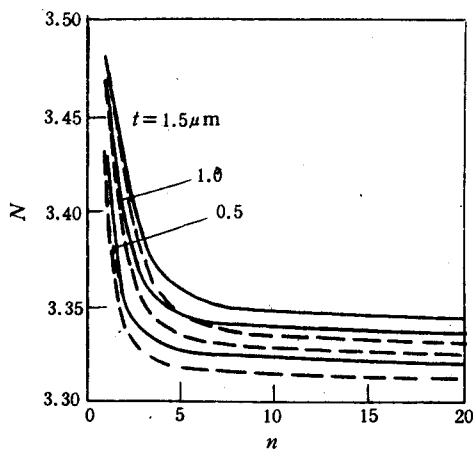


图 2 当波导芯总厚度 t 和比率 r 固定时, 基模有效折射率 N 随阱数 n 的变化曲线 ($r = 0.5$)
——TE₀ 模 ---TM₀ 模

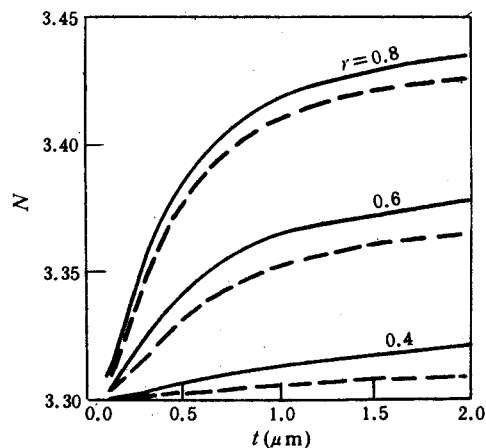


图 3 当阱数 n 和比率 r 固定时, 模有效折射率 N 随波导芯总厚度 t 的变化曲线 ($n = 15$)
——TE₀ 模 ---TM₀ 模

阱数 n 的增大, 周期长度 Λ 随之减小, 量子阱效应迅速地变强, 并很快地趋于一个稳态. 因此当阱数 n 很大时, 其数目的改变将不再影响波导所形成的量子阱效应稳态. 所以当波导芯总厚度 t 固定时, 为了在波导中形成较强的量子阱效应, 阱数 n 不能过小, 而阱数 n 过大亦

非必要。

图3显示了波导芯总厚度 t 对基模有效折射率 N 的影响,取阶数 $n=15$,并取比率 $r=0.4, 0.6, 0.8$ 。可以看出模有效折射率 N 随波导芯总厚度 t 的增大而增大。此时由于阶数 n 固定,当波导芯总厚度 t 增大时,周期长度随之增大,而使波导中的量子阱效应减弱。因此当阶数 n 选定后,应尽量选择较小的波导芯总厚度 t ,使周期长度 Δ 尽量减小以获得较强的量子阱效应。

图4显示了比率 r 对基模有效折射率 N 的影响,取阶数 $n=15$,并取周期长度 $\Delta=0.02, 0.03, 0.05, 0.10\mu\text{m}$ 。可以看出模有效折射率 N 随比率 r 的增大而增大。还可看出当比率 r 增大时,TE₀与TM₀基模之间的有效折射率差形成一个由小变大而后再变小的变化过程,并且在此变化过程中必然存在一个极大值。对于过小或过大的比率 r ,TE₀与TM₀基模之间的有效折射率差较小。因此若选择比率 r 的值处于0.5—0.7之间,可望能获得较大的模式双折射。

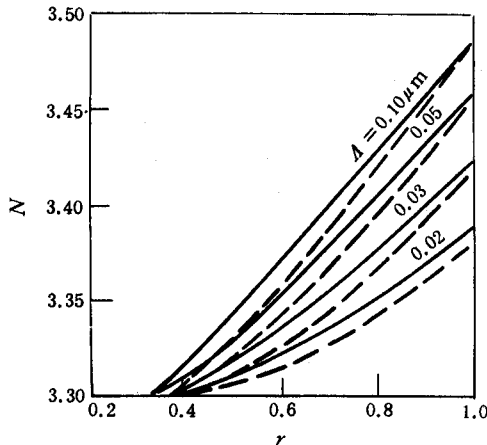


图4 当阶数 n 和周期长度 Δ 固定时,基模有效折射率 N 随比率 r 的变化曲线
 $n=15$ — TE₀模 --- TM₀模

图5和图6显示了垒层折射率和波导芯两侧包层折射率对模有效折射率的影响。此时取阶数 $n=15$,波导芯总厚度 $t=1.5\mu\text{m}$,比率 $r=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 。

图5显示了AlGaAs垒层折射率 n_2 对基模有效折射率 N 的影响,取AlGaAs包层折射率 $n_0=n_3=3.3$,GaAs阱层折射率 $n_1=3.5$ 。可以看出模有效折射率 N 随垒层折射率 n_2 的增加而增大。此时由于阱层折射率 n_1 固定,当垒层折射率 n_2 减小时,量子阱结构中的折射率势阱随之变深,而使波导中的量子阱效应增强。但对于较小的比率 r ,垒层折射率 n_2 不能无限制地减小,当 n_2 减小到一定程度时,将出现反波导现象而使导模截止。考虑到这一点及模式双折射特性,比率 r 可在0.5—0.6范围内取值,此时并可

保证垒层折射率 n_2 具有较大的值使其处在AlGaAs折射率的变化范围之内。

图6显示了AlGaAs包层折射率 $n_0=n_3$ 对基模有效折射率 N 的影响,取GaAs阱层折射率 $n_1=3.5$,AlGaAs垒层折射率 $n_2=3.2$ 。可以看出模有效折射率 N 随芯两侧包层折射率 $n_0=n_3$ 的增大而增大,但变化很缓慢,只是临近模的上截止点时才有明显的变化,并在远离模上截止点的广泛范围内模有效折射率 N 趋于饱和。这是因为当芯两侧包层折射率发生变化时,其作用只是改变了波导芯中两个边阱的深度。当阶数 n 较大时,边阱深度的改变对波导中形成的量子阱效应在整体上不会产生较大的影响。当芯两侧包层折射率 $n_0=n_3$ 增大到一定值时,波导中也将出现反波导现象而使导模截止,这就是模上截止点形成的原因。上述分析表明,当波导芯中含有的势阱和势垒的数目较大时,芯两侧包层折射率的改变对波导的量子阱效应以及模的传输特性的影响较弱。

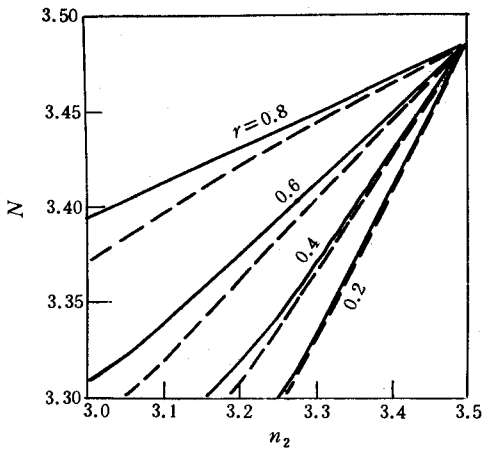


图5 当阱层折射率 n_1 和芯两侧包层折射率 $n_0=n_3$ 固定时,基模有效折射率 N 随垒层折射率 n_2 的变化曲线($n_1=3.5, n_0=n_3=3.3$)
——TE₀ 模 ---TM₀ 模

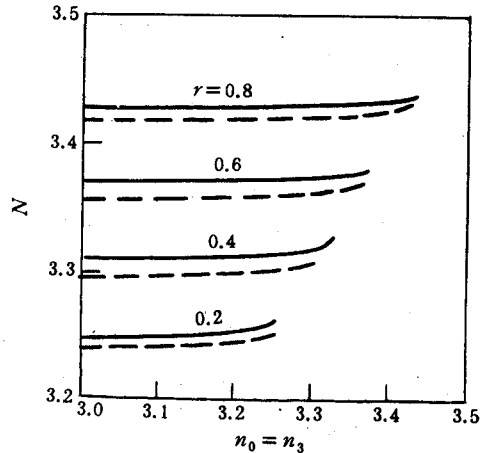


图6 当阱层折射率 n_1 和垒层折射率 n_2 固定时,基模有效折射率 N 随芯两侧包层折射率 $n_0=n_3$ 的变化曲线($n_1=3.5, n_2=3.2$)
——TE₀ 模 ---TM₀ 模

4 结束语

对于具有任意阱数的方波折射率分布的 MQW 光波导,本文给出了形式规范的模场分布函数和特征方程.与其它某些文献给出的分析方法和公式相比,这组公式普适性强,物理意义明显.利用这组公式可对 MQW 光波导的模场及传输特性进行较为简捷的分析与计算,并能得到精确的计算结果,其精度是其它某些近似的方法如等效折射率法和有限元法所不能比拟和无法达到的.文中详细地分析和讨论了 GaAs/AlGaAs MQW 光波导中波导结构参量及折射率分布对模有效折射率的影响.这些分析和讨论对深入研究 MQW 光波导的模式特性具有一定的参考价值.

参 考 文 献

- [1] Y. K. Chen and M. C. Wu, IEEE J. Quantum Electron., 1992, QE-28:2176.
- [2] T. H. Wood, J. Lightwave Tech., 1988, 6:743.
- [3] J. E. Zucker, M. Wegener, K. L. Jones, T. Y. Chang, N. Sauer and D. S. Chemla, Appl. Phys. Lett., 1990, 56:1951.
- [4] L. Tsang and S. L. Chuang, J. Lightwave Tech., 1988, 6:832.
- [5] J. P. van der Ziel, M. Ilegems and R. M. Mikulyak, Appl. Phys. Lett., 1976, 28:735.
- [6] W. Streifer, D. R. Scifres and R. D. Burnham, Appl. Opt., 1979, 18:3547.
- [7] S. Ohke, T. Umeda and Y. Cho, Opt. Commun., 1985, 56:235.
- [8] S. Ohke, T. Umeda and Y. Cho, Opt. Commun., 1989, 70:92.
- [9] M. Kumar, J. T. Boyd, H. E. Jackson and B. L. Weiss, IEEE J. Quantum Electron., 1992, QE-28:1678.
- [10] B. L. Weiss and A. P. Zhao, IEEE Photon. Tech. Lett., 1990, 2:801.
- [11] A. P. Zhao, S. R. Cvetkovic and M. Punjani, IEEE J. Quantum Electron., 1992, QE-28:573.

- [12] L. M. Walpita, J. Opt. Soc. Am. A, 1985, **2**, 595.
- [13] L. M. Walpita, Japan. J. Appl. Phys. , 1985, **24**, L472.
- [14] I. M. Skinner, R. Shail and B. L. Weiss, IEEE J. Quantum Electron. , 1989, **QE-25**: 6.
- [15] J. Kraus and P. P. Deimel, IEEE J. Quantum Electron. , 1990, **QE-26**: 824.

Propagation Properties of Multiple Quantum Well Optical Waveguides

Ma Chunsheng

*(National Integrated Optoelectronics Laboratory Jilin University Region,
Department of Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130023
Received 2 July 1993, revised manuscript received 29 October 1993)*

Abstract General formulae describing field distributions and eigenvalue equations are presented for both TE and TM modes of the multiple quantum well optical waveguide with arbitrary well number and with periodic square wave refractive index profile. The calculations of the mode effective refractive index are carried out and the effects of the structural parameters and the refractive index profile on the mode propagation properties are analyzed and discussed for GaAs/AlGaAs multiple quantum well optical waveguides.

EEACC: 4130,5240D; **PACC:** 6865