

多量子阱光学波导中的模式截止

刘育梁* 王启明

(中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

孙中禹

(空军电讯工程学院, 西安 710077)

摘 要 导出了由两种材料构成的多量子阱光波导的模式截止方程, 并讨论了 Si 衬底上生长的应变 Ge_xSi_{1-x}/Si 多量子阱光波导的模式截止特性。

关键词 光波导, 多量子阱, 模式截止。

从光传输的角度来看, 多量子阱往往扮演着光学波导的角色。因此, 掌握多量子阱波导的模式特性对实际器件的研制有着重要的作用。人们研究了多量子阱光波导的模场分布、有效吸收、双折射、表面模以及包层金属的影响^[1~4], 但有关高阶模式的截止问题尚未作过讨论。从器件的研制来看, 控制波导中的模式数量是极为重要的, 因此, 有必要对多量子阱光学波导的模式截止特性进行分析。本文首次讨论了由两种材料组成的多量子阱光波导的模式截止问题, 给出了模截止方程, 并就 Ge_xSi_{1-x}/Si 多量子阱光波导的高阶模进行了讨论。

1 多量子阱光波导的模截止方程

对于图 1 所示的 N 层平板波导, 其模式方程以写作^[4]

$$\gamma_i d_i - \Omega_{i-1} - \Omega_{i+1} - m\pi = 0 \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= (\beta^2 - k_0^2 n_1^2)^{1/2}, & \gamma_i &= (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}, \\ \gamma_N &= (\beta^2 - k_0^2 n_N^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

k_0 为真空波数, n_i 为第 i 层的折射率, β 为传播常数。 $m = 0, 1, \dots$ 为模阶数。 Ω_{i-1} 由下式得到

$$\text{tg } \Omega_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_{j+1}} \left(\frac{n_{j+1}}{n_j} \right)^{2p} \text{tg} (-\gamma_j d_j + \Omega_{j-1}),$$

$$\text{tg } \Omega_1 = (\gamma_1/\gamma_2) (n_2/n_1)^{2p}, \quad j \leq i-1 \quad (3)$$

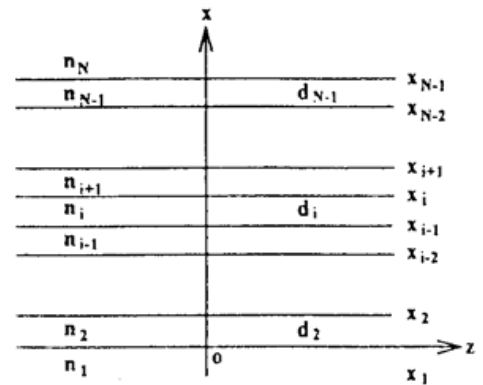


Fig. 1 Optical waveguide of N layers

* 现在通讯地址: 深圳科技工业园科发路华为技术有限公司, 中央研究部, 深圳 518057。

收稿日期: 1995 年 6 月 25 日; 收到修改稿日期: 1995 年 10 月 1 日

Ω_{i+1} 由下式得到

$$\operatorname{tg} \Omega_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_{j-1}} \left(\frac{n_{j-1}}{n_j} \right)^{2p} \operatorname{tg} (-\gamma_j d_j + \Omega_{j+1}), \quad \operatorname{tg} \Omega_N = (\gamma_N / \gamma_{N-1}) (n_{N-1} / n_N)^{2p}, \quad j \geq i + 1 \quad (4)$$

其中, d_j 为第 j 层的厚度, p 表征不同偏振光时边界条件的差异。对 TE 模 $p = 0$, 对 TM 模 $p = 1$ 。

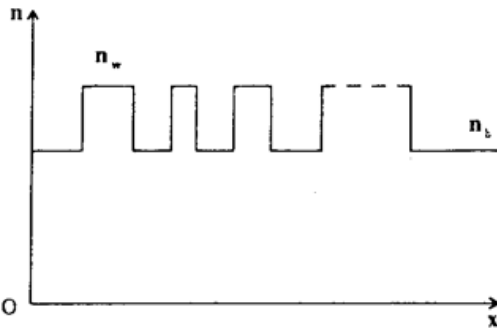


Fig. 2 Refractive index distribution of a multiple quantum well waveguide composed of two materials

考虑由两种材料交叠组成的多量子阱波导, 如图 2 所示, 设 $n_1 = n_3 = \dots = n_N = n_b$, $n_2 = n_4 = \dots = n_{N-1} = n_w$, 且 $n_w > n_b$, 则模方程在 i 为偶数时可能存在本征解。对于某一阶模(即某一个确定的 m), 本征解不只一个, 而是一系列子模式的集合, 它们分别对应于 $i = 2, 4, \dots, N - 1$ 。为便于区分, 可记 β 为 β_{vm} , 其中 $v = i/2 = 1, 2, 3, \dots$ 。当模式趋于截止时, $\beta_{vm} \rightarrow k_0 n_b$, 则有

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \dots = \gamma_N \rightarrow 0 \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \Omega_1 = (\gamma_1 / \gamma_2) (n_2 / n_1)^{2p} \rightarrow 0 \quad (6)$$

根据(3)式

$$\operatorname{tg} \Omega_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_{j+1}} \left(\frac{n_{j+1}}{n_j} \right)^{2p} \frac{\operatorname{tg} \Omega_{j-1} - \operatorname{tg} (\gamma_j d_j)}{1 + \operatorname{tg} \Omega_{j-1} \operatorname{tg} (\gamma_j d_j)}, \quad j \leq i - 1 \quad (7)$$

从而

$$\Omega_2 \rightarrow -\pi/2, \quad \Omega_3 \rightarrow 0, \quad \dots, \quad \Omega_{i-1} \rightarrow 0 \quad (8)$$

同理

$$\Omega_N \rightarrow 0, \quad \Omega_{N-1} \rightarrow -\pi/2, \quad \dots, \quad \Omega_{i+1} \rightarrow 0 \quad (9)$$

由此得到模截止方程

$$d_i k_0 (n_w^2 - n_b^2)^{1/2} = m\pi \quad (10)$$

从截止方程可知,

1) 对于 0 阶模 $m = 0$, 欲使子模式 β_{vm} 截止, 必须有 $d_i = 0$, 其中 $i = 2v$ 。所以, 在实际的波导中, 0 阶模总是存在的。这和三层对称平板波导的情况一致;

2) 高阶模式 $\beta_{vm} (m > 0)$ 是否截止仅取决于第 v 个阱(亦即第 $i = 2v$ 层)的厚度和势垒、势阱的折射率的平方差, 而与其它势垒、势阱的厚度无关;

3) 阱的厚度越大, 可承载的模式越多;

4) TE 模和 TM 模的截止点相同。

3 应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 多量子阱光波导的高阶模式

在 Si 衬底上生长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 多量子阱波导的折射率分布为 $n_b = n_{\text{Si}} = 3.5$, 而 $n_w = n_{\text{GeSi}} = n_{\text{Si}} + x(n_{\text{Ge}} - n_{\text{Si}}) = 3.5 + 0.6x$ 。代入(10)式得到

$$d_i = \frac{m\lambda}{2 \sqrt{4.2x + 0.36x^2}} \quad (11)$$

其中 d_i 为第 i 层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 阱的厚度。图 3 给出了由(11)式得到的波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时的截止曲线 d_i

$\sim x$ 。另一方面应变的阱层厚度 d 必须小于临界厚度 h_c , 而 h_c 也是随 x 变化而变化的:

$$h_c(\text{nm}) = (1.007/x^2) \ln [h_c(\text{nm})/0.4] \quad (2)$$

图 3 也给出了临界厚度随组份比 x 的变化。从图中可以看出, $x > 0.1$ 时, 1 阶以上模式的截止厚度远远大于共度生长的临界厚度。所以, 在 Si 衬底上生长的应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ($x > 0.1$) 多量子阱波导中不可能存在波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的高阶模式, 而根据上一节的讨论, 基模总是存在的。

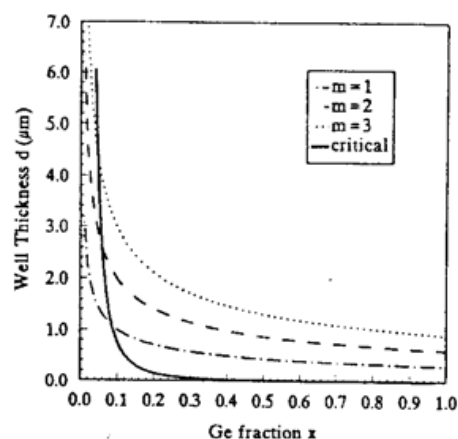


Fig. 3 Mode cutoff curves of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ multiple quantum well optical waveguides

结 论 本文的分析表明, 在由两种材料交叠构成的多量子阱光波导中, 基模总是存在的, 与某一个势阱相关的高阶模式是否截止仅取决于该阱的厚度以及势阱、势垒材料的折射率差别, 而与其它势阱和势垒的厚度无关。对于 Si 衬底上生长的应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ($x > 0.1$) 多量子阱波导来说, 当光波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, 不可能存在基模以上的高阶模式。

参 考 文 献

- [1] 马春生, 金属包层周期波导和多量子阱光波导的光学特性分析. 吉林大学自然科学学报(特刊), 1994, (7): 157~160
- [2] 马春生, 周期波导和多量子阱光波导的模吸收损耗. 吉林大学自然科学学报(特刊), 1994, (7): 161~164
- [3] Ma Chunsheng, Birefringence of (Al)GaAs/AlGaAs multiple quantum well optical waveguides. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, B3(4): 331~338
- [4] 刘育梁, 王启明, 杨沁清, $1.3 \mu\text{m}$ 锗硅波导探测器中的场分布与光吸收. 光子学报, 1995, 24(Z1): 33~38

Mode Cutoff of Multiple Quantum Well Optical Waveguides

Liu Yuliang Wang Qiming

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Sun Zhongyu

(Airforce College of Electronic Communication Engineering, Xian 710077)

(Received 25 June 1995; revised 1 October 1995)

Abstract The mode cutoff equation of the multiple quantum well optical waveguides composed of two materials is derived. The cutoff characteristic of the strained $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ multiple quantum well optical waveguides grown on Si substrate is analyzed.

Key words optical waveguides, multiple quantum wells, mode cutoff