

GeSi/Si 多量子阱光波导模特性分析和吸收层结构设计*

TN252

李娜 李宁 陆卫 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

李国正 刘恩科

(西安交通大学电子工程系, 陕西, 西安, 710049)

摘要 根据适用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模特征方程, 分析了在以 GeSi/Si 多量子阱为波导芯, Si 为覆盖层的光波导结构中, Ge 含量、周期数、占空度、厚度、折射率分布等参量对光波导传播常数的影响, 并结合吸收特点对 MQW 吸收层结构进行优化设计。

关键词 GeSi/Si 多量子阱, 光波导, 吸收层。

模特性

引言

随着 MBE 和 MOCVD 技术的发展, 多量子阱(MQW)光波导已经成为某些光电子器件的重要组成部分, 如半导体激光器、调制器、开关和探测器等等。目前 GeSi/Si 多量子阱主要用于 PIN 或 APD 探测器的吸收层^[1,2], 这是由于这种量子阱材料的禁带宽度具有随 Ge 含量而变的特点, 也是其越来越受到国内外学者重视的主要原因。具体地说, Ge 和 Si 均为间接能隙半导体, Ge 的导带底位于布里渊区的 L 点, Si 的导带底在 Δ 点, 它们的价带顶都在 Γ 点, 不受应力的 Ge_xSi_{1-x} 体合金的能隙介于 Si 和 Ge 能隙之间, 并随 x 而变。但在 Si 衬底上共度生长的 Ge_xSi_{1-x} 应变层在平行于生长表面方向上受到压缩应力, 而在垂直于生长表面方向上受到伸张应力, 各方向的晶格常数发生相应变化, 从而使晶体由立方对称降为正方对称, 这种对称性的降低引起导带由六度简并分裂为一个四度简并态和一个二度简并态, 其中四度简并态的能态下降, 同时重空穴带上移, 因此应变 Ge_xSi_{1-x} 层的能带变化主要在价带上, 其价带变化量 $\Delta E_v = 0.74x$ (eV), 从而使能

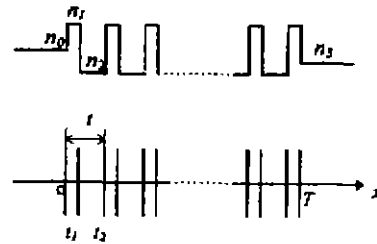


图 1 MQW 光波导的横截面及折射率分布图

Fig. 1 The schematic diagram of MQW optical waveguide and distribution of refractive index

* 国家自然科学基金(编号 69636040)资助项目
稿件收到日期 1997-09-22, 修改稿收到日期 1998-01-08

隙减小. 能隙 $E_g(x)$ 与锗含量 x 的关系可以描述为^[3]

$$E_g(x) = 1.12 - 0.74x(\text{eV}). \quad (1)$$

当锗含量 $x > 0.6$ 时, 此 $E_g(x)$ 值甚至小于锗的禁带宽度, 因此可作为红外光探测器的吸收材料. 如果探测波长 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 则要求 $x > 0.3$, 欲达到较好的效果, 一般取 $x = 0.6$. 由于临界厚度的限制, 单层应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层的厚度不能超过 7nm . 为了提高光通量, 则将数个 GeSe 层与 Si 层交互叠加形成较厚的多量子阱吸收层, 此吸收层作为波导芯, 与两边覆盖层一起构成一个平板波导, 如图 1 所示. 其中由 N 个 GeSi 层和 $(N-1)$ 个 Si 层组成, 其折射率和厚度分别为 n_1, t_1 和 n_2, t_2 , 波导芯总厚度 $T = Nt_1 + (N-1)t_2 = (N-1)t - t_1$, 式中 $t = t_1 + t_2$ 为周期长度.

1 模场分布函数和模特征方程

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

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

令 $T_j = \begin{cases} \gamma_j/\gamma_1, \\ (n_1^2/n_0^2)(\gamma_j/\gamma_1) \end{cases}, \gamma_1 = k_0(n_1^2 - N^2)^{1/2}, \gamma_2 = k_0(N^2 - n_2^2)^{1/2}, \gamma_j = k_0(N^2 - n_j^2)^{1/2} (j = 0, 3)$, 求解方程(2), 并利用边界条件则可得到模场分布函数和模特征方程^[4].

1.1 模场分布函数

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

式中 $\varphi(0)$ 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

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

$$\left. \begin{aligned} A_i + 1 &= C_i \text{ch} \gamma_2 t_2 + D_i \text{sh} \gamma_2 t_2, \\ B_i + 1 &= T_2 (C_i \text{sh} \gamma_2 t_2 + D_i \cos \gamma_2 t_2), \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N > n_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

或

$$\left. \begin{aligned} A_i + 1 &= C_i \cos \gamma_2 t_2 + D_i \sin \gamma_2 t_2, \\ A_i + 1 &= T_2 (-C_i \sin \gamma_2 t_2 + D_i \cos \gamma_2 t_2), \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N < n_2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

初始值为 $A_1=1, B_1=T_0$.

1.2 模特征方程

模特征方程为

$$tg\gamma_1 t_1 = (T_3 + T_2 P_{11}) / (1 - T_3 T_2 P_{11}), \quad (7)$$

式中 P_n 的递推公式为

$$Q_i = (1 + T_2 P_i tg\gamma_1 t_1) / (T_2 P_i - tg\gamma_1 t_1), \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= (1 + T_2 Q_i + h\gamma_2 t_2) / (T_2 Q_i + th\gamma_2 t_2), \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N > n_2) \\ \text{或} \\ P_{i-1} &= (1 - T_2 Q_i tg\gamma_2 t_2) / (T_2 Q_i + tg\gamma_2 t_2), \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, N < n_2) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

初始值为 $P_n = T/T_2$.

2 GeSi/Si 多量子阱模特性分析

对于 $1.3\mu\text{m}$ 的光波, 本征硅的折射率 n_{Si} 是 3.505, 锗的折射率 n_{Ge} 为 4.1, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金的折射率 ($x > 0.2$) 可通过线性插值得到

$$n_1 = n_{\text{GeSi}} = n_{\text{Si}} + x(n_{\text{Ge}} - n_{\text{Si}}) = n_{\text{Si}} + 0.59x \quad (10)$$

单层 GeSi 合金的厚度 h_c 低于临界厚度, 即 $t_1 > h_c$, 当 $x=0.6$ 时, $h_c=7\text{nm}$, 可取 $t_1=5\text{nm}$ 或 6nm ; $x=0.5$ 时, $h_c=10\text{nm}$, 可取 $t_1=8\text{nm}$ 或 9nm . 多量子阱层的总厚度同样要受到临界厚度的限制, 如下式^[5]:

$$H_c(\text{nm}) + \frac{1.33}{(rx)^2} \ln\left(\frac{H_c(\text{nm})}{0.4}\right). \quad (11)$$

其中 $r=t_1/t$ 为阱层厚度在周期长度中所占的比率即占空度. 图 2 反映出总临界厚度 H_c 与占空度 r 、阱层锗含量 x 的关系. 可见, Ge 含量越高, 占空度越大, 则 H_c 越小, 量子阱层的厚度取值也将比较小, 欲提高厚度则需适当降低占空度和锗含量, 但又会影响量子阱层的平均折射率 n_a , 如下式:

$$n_a = (n_1^2 r + (1-r)n_2^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

其中 x, r, n_a 之间的关系如图 3 所示. 当锗含量一定时, r 越小, 则平均折射率越小, 选择 r 在 0.2 附近比较合适.

根据模特征方程可进一步确定量子阱的周期数 N 对波导芯传播常数的影响, 如图 4 所示. 图中曲线显示出当周期数 N 从最小值 $N=1$ 逐渐增大时, 传播常数从最大值迅速减小, 当 N 到足够大时 ($N > 10$), 传播常数趋于稳定, 这时阱层厚度 t_1 和占空度 r 对传播常数影响也较小. 这说明当周期数足够大时, 多量子阱层的光场分布等效于平板波导的光场分布, 波导芯等效于 Ge 含量为 rx 的 GeSi 合金层, 其折射率为 n_a , 厚度为 $T=Nt_1/r$. 衬底为硅外延层或 GeSi 合金层 ($x=0.05$), 其上层为 p^+ 或 n^+ 硅覆盖层, 掺杂浓度在 10^{19} 数量级左右, 折射率 $n_3=3.48$. 对于这样的波导, 传播常数与波导芯厚度以及衬底折射率的更详细关系如图 5 所示. 由图可看出, 量子阱的周期数太大, 波导芯的总厚度可能会超过总临界厚度

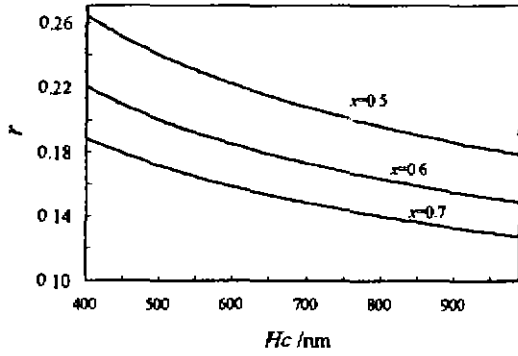


图 2 占空度 r 与总临界厚度 H_c 的关系
Fig. 2 Relationship between the duty cycle r and the total critical thickness H_c .

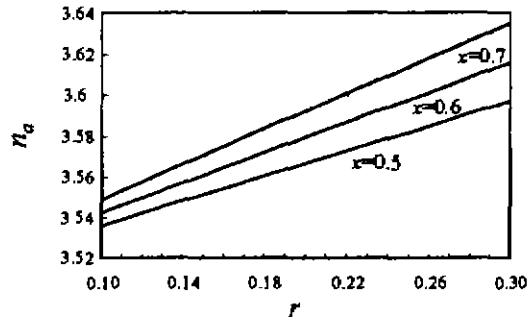


图 3 MQW 吸收层平均折射率 n_a 与占空度 r 关系
Fig. 3 Relationship between the average refractive index n_a and the duty cycle r

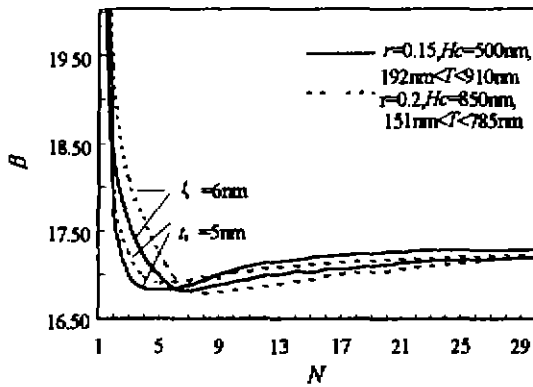


图 4 MQW 光波导基模的传播常数 β 随周期数 N 的变化曲线 ($x=0.6$)
Fig. 4 The propagation constant β as a function of the periods number N

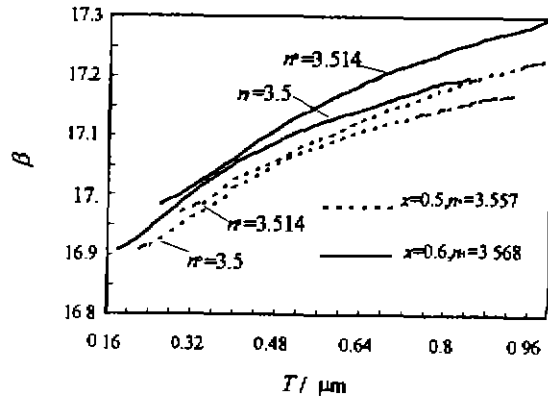


图 5 MQW 波导的传播常数 β 与总厚度 T 的关系曲线
Fig. 5 The propagation constant β as a function of the total thickness T

H_c , 并且影响波导的单模性. 而且当厚度较大时, 衬底的折射率对波特性的影响也比较明显 ($n_0=3.5$ 对应硅外延层, $n_0=3.514$ 对应 GeSi 合金层衬底). 由以上诸因素所确定的传播常数反映出 MQW 光波导与其他集成光学器件如波导、耦合器等进行光学耦合时的光传输情况, 以及各因素对耦合效率的影响.

3 结构与设计

在模特性分析的基础上, 再从 GeSi/Si MQW 的红外吸收的方面进行分析. 量子阱有效吸收系数^[6]可定义为

$$\alpha_{eff} = r\Gamma\alpha, \tag{13}$$

其中 α 为实际吸收系数, 其值为 $20\sim 100\text{cm}^{-1}$, 在此取 $\alpha=100\text{cm}^{-1}$. Γ 为波导限制因子, 在这

里可表示为

$$\Gamma = 2\pi^2 \left(\frac{\Gamma^2}{\lambda} \right) (n_x^2 + n_0^2). \quad (14)$$

利用式(12)~(14)即可得出有效吸收系数与周期数、Ge 含量 x 以及占空度 r 的关系,如图 6 所示. 计算表明相对于最大限制因子,有效吸收系数不超过 20cm^{-1} ,因此 $x=0.6$ 时对应的最大周期数为 23,厚度为 920nm .

综合上述各因素,在满足临界厚度,波导单模性,最大吸收的条件下,折衷确定各项参数如表 1.

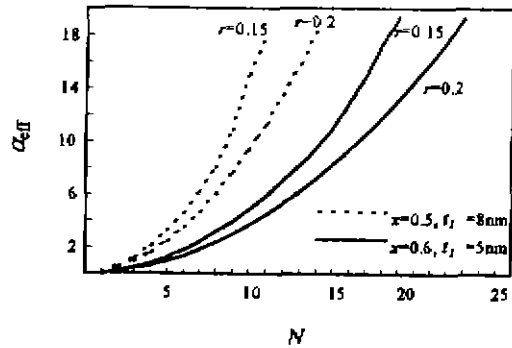


图 6 有效吸收 α_{eff} 与周期数 N 的关系曲线
Fig. 6 Relationship of the effective absorption coefficient α_{eff} with the period number N

表 1 Ge_xSi_{1-x}/Si 多量子阱探测器吸收层结构参数

Table 1 Parameters of absorbing layer in Ge_xSi_{1-x}/Si multi-quantum well detector

阱层锗含量 x	阱层折射率 n_1	垒层折射率 n_2	阱层厚度 $t_1(\text{nm})$	占空度 r	垒层厚度 $t_2(\text{nm})$	平均折射率 n_a	总临界厚度 $H_c(\text{nm})$	周期数 N	量子阱层厚度 $T(\text{nm})$
0.5	3.80	3.502	9nm	0.17	44	3.557	1100	13	700
0.6	3.86	3.502	5nm	0.17	25	3.568	730	20	600

4 结论

以上利用模场分布函数和模特征方程详细分析了 GeSi/Si 多量子阱波导各项参数的关系,并在此基础上,优化设计了波导探测器吸收层的结构,为此类器件的研制提供了理论依据和参考数据.

REFERENCES

- 1 Temkin H, Pearsall T P, Bean J C, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(15): 963
- 2 Temkin H, Antreasyan A, Olsson N A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(13): 809~811
- 3 Suresh C Jain. *Germanium-silicon strained layer and heterostructures*. Insted. USA: Academic Press, 1994
- 4 Ma C S. *Journal of Semiconductors*(马春生, *半导体学报*), 1995, **16**(3): 161~165
- 5 Roosevelt People. *IEEE of Quantum Electronics*, 1986, QE-22(9): 1690~1710
- 6 Luryt S, Pearsall T P, Temkin H, et al. *IEEE Electron Device Letters*, 1986, EDL-7(2): 104~107

ANALYSIS AND OPTIMUM DESIGN ON GeSi/Si MQW OPTICAL WAVEGUIDE AND ABSORPTION LAYER*

LI Na LI Ning LU Wei SHEN Xue-Chu(S. C. Shen)

*(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

LI Guo-Zheng LIU En-Ke

(Department of Electronic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract According to the field distribution function and mode property equation in MQW optical waveguide, the influence of Ge composition, period number and depth on plate waveguide mode property was analyzed. The waveguide was formed by GeSi/Si MQW core and Si cover. GeSi/Si MQW absorber layer structure was optimally designed.

Key words GeSi/Si MQW, optical waveguide, absorption layer.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1997-09-22, revised 1998-01-08