

Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结无间距定向 耦合光开关模型分析

赵策洲* 刘恩科 李国正

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘 要 提出一种简便可行的 Ge_xSi_{1-x} 异质结无间距定向耦合光开关(BOA 型-Bifurcation Optical Active)模型分析方法。该方法采用等离子体色散效应分析了这种光开关的电学调制机理; 采用异质结超注原理分析了开关的电学性质; 并根据单模脊形波导理论和上述分析, 设计了利用双模干涉机制工作的 Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si 异质结 BOA 型光开关的结构参数和电学参数。

关键词 Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结, BOA 开关, 模型。

1 引 言

随着 Si 上异质外延生长 Ge_xSi_{1-x} 层和化学气相淀积(CVD)Ge_xSi_{1-x} 层技术的发展, 已经研制成损耗较小的光波导(在波长为 1.3 μm 时, 传输损耗 ≤ 2.5 + 1 dB/cm)^[1~3], 并用这些光波导制作导波光器件^[4~7]。由于在光开关器件中, 无间距定向耦合光开关(BOA 型)有其独特的优点^[8], 因此目前分别在 GaAs, Si 和 Si 中掺 Ge 材料中研制成了这种光开关^[7~9]。本文针对 1.3~1.6 μm 波长的 Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结 BOA 型光开关进行了理论分析, 并根据经典单模波导理论设计了 Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si 异质结开关的结构。

2 理论分析

对于双模干涉机制的 BOA 型光开关, 当光由一端耦合入基模后, 该基模 A 传输到单模波导 1 和单模波导 2 的交叉点处, 此处波导宽度增加一倍, 如图 1(a)所示, 其场宽也必然增大, 变成基模 B。由于基模 A 和 B 不满足场的连续性条件, 因此必然同时伴随另一模式——一阶模 c 的激发。这样在 2a 区域中便传输着零阶模和一阶模两个模式。这两个模式之间存在着传播常数差 $\Delta\beta_0 = \beta_{00} - \beta_{10}$, 如果 2a 区域长度 L 满足 $\Delta\beta_0 L = \pi$, 则这两个模式在传播到 2a 区域右端后, 恰好反相, 被单模波导 3 和 4 分割成图示状况, 模场 B₁ 和 C₁ 叠加为零, 仅由 4 端输出模场。但是, 如果这两个模式在 2a 区域内传播时, 由于电子注入, (如图 1(b)所示)引起等离子体色散效应^[7]使得其折射率发生变化, 则会引起这两个导模的附加传播常数 $\Delta\beta_{00}$ 和

* 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071.

收稿日期: 1994 年 1 月 9 日; 收到修改稿日期: 1994 年 3 月 9 日

$\Delta\beta_{01}$, 若

$$(\Delta\beta_{00} + \Delta\beta_{01} + \Delta\beta_0)L = 0 \text{ 或 } 2\pi \tag{1}$$

则模场由 3 端输出, 此时 4 端的模场叠加为零。这就是双模干涉机制的 BOA 型光开关的工作原理。

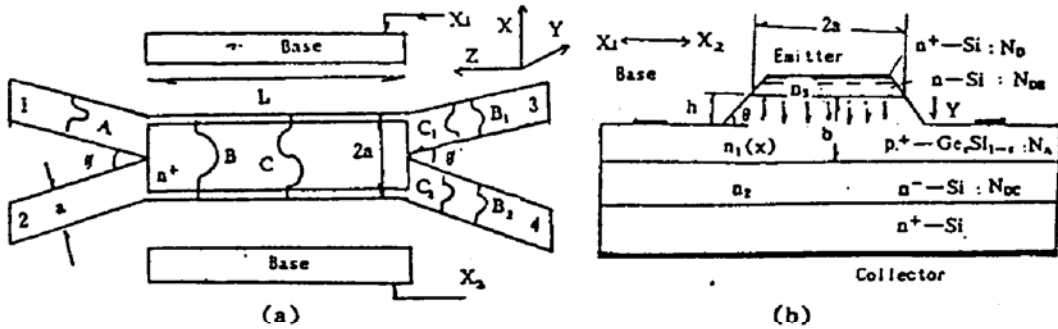


Fig. 1 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction BOA switch sketch

目前在 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结上实现电光调制主要利用等离子体色散效应^[6-7]。该效应将引起 $2a$ 区域内 mn 阶模附加传播常数 $\Delta\beta_{mn}$ 为^[10]

$$\Delta\beta_{mn} = \frac{k_0^2 n_1(x) \Delta n_1(x) F_1 + F_2}{\beta_{mn} b (F_3 + F_4)} \tag{2}$$

式中 $n_1(x)$ 为波导芯折射率, 自变量 x 为异质结中锗的组分, $\Delta n_1(x)$ 为电子注入引起的波导芯折射率变化, 且 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空波数, λ_0 为真空波长, b 为脊高, 对于 E_{mn} 模

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= b^2/2 - [\cos(2G_4) - \cos(2G_2b + 2G_4)]/4G_4^2, & F_2 &= b[\sin(2G_2b + 2G_4)]/2G_2 \\ F_3 &= b - (\cos^2 G_4)/G_3 + [\cos^2(G_2b + G_4)]/G_1, & F_4 &= [\sin(2G_2b + 2G_4) - \sin(2G_4)]/2G_2 \\ G_1^2 &= k_0^2 [n_1^2(x) - n_2^2] - G_2^2, & G_3^2 &= k_0^2 [n_1^2(x) - n_3^2] - G_2^2, \\ \text{tg } G_4 &= -G_3/G_2, & \text{tg } (G_4 + G_2b) &= G_1/G_2. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

可以假设锗硅合金中等离子体色散性质与单晶硅相似^[7], 因此可推导出:

$$\Delta n_1(x) = -1.274 \times 10^{-21} \lambda_0^3 \Delta N_s / n_1(x) \tag{4}$$

式中 ΔN_s 为波导层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 电子浓度的平均改变量, 单位为 cm^{-3} , λ_0 单位为 μm 。

应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金的折射率 $n_1(x)$ 可通过大量的实验结果得到经验公式^{[1][11]}, 当锗的组分 $x \leq 0.2$ 时

$$n_1(x) = n_2 + 0.27x \tag{5}$$

式中 n_2 是无应变衬底硅的折射率, 如图 1(b) 所示。由异质结超注入原理^[12]可知, 图 1(b) 实际上也是一个异质结双极晶体管结构。在发射结界面 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结结构, 存在着导带的不连续性 ΔE_c 和价带的不连续性 ΔE_v 。由于无论 x 取值多大, ΔE_c ($\Delta E_c = 0.020 \text{ eV}$ ^[13]) 都可以和 kT (T 是绝对温度, k 为玻耳兹曼常数, 室温时 $kT = 0.026 \text{ eV}$) 比拟, 因此电子从硅中注入到 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层中的行为就可用同质结的情况来近似。由同质结晶体管理论可导出^[14]:

$$\Delta N_s(0) = [N_i^2(x) \exp(qV_{BE}/kT)] / N_A \tag{6}$$

它是 $Y = 0$ 处(发射结基区一侧)的注入电子浓度, 式中 V_{BE} 为发射结的偏压, q 为电子电量, $N_i(x)$ 为 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 本征载流子浓度。经过推导可知 $N_i(x)$ 与硅的本征载流子浓度 $N_i(\text{Si})$ 的关系

$$N_i(x) = \sqrt{A(x)} N_i(\text{Si}) \exp[(\Delta E_c + \Delta E_v)/2kT] \tag{7}$$

式中 $A(x)$ 为 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 和 Si 的总有效状态密度的比值, 当 $x = 0.05$ 时, 室温下 $A(x) = 0.62^{[15]}$, $N_i(\text{Si}) = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; $x \leq 0.5$ 时

$$\Delta E_v = 0.74 x^{[15]} \quad (8)$$

由于可使波导芯厚度 b 远小于少数载流子(电子)的扩散长度, 因此 Y 方向 $Y = 0 \sim b$ 范围内注入的载流子分布可以近似线性分布, 当 $V_{CB} \gg KT/q$ 时^[14]

$$\Delta N_s(Y) = \Delta N_s(0)(1 - Y/b) \quad (9)$$

不妨取注入的平均电子浓度 ΔN_s 为

$$\Delta N_s = \Delta N_s(h) = \Delta N_s(0)(1 - h/b) \quad (10)$$

由于空穴从锗硅应变层中注入到硅中除了要克服异质结势垒外还要克服 ΔE_v 台阶。因此空穴的注入作用可以忽略, 发射结电流密度 J_s 主要是电子注入电流, 当 $V_{CB} \gg kT/q$ 时, 经过推导可得

$$J_s = \frac{qD_n(x)N_i^2(x)}{bN_A} \exp(qV_{CB}/KT) \quad (11)$$

式中 $D_n(x)$ 为 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层中电子的扩散常数, $D_n(x) = (kT/q)\mu_n(x)$, $\mu_n(x)$ 为 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层中电子的迁移率, 可由文献[16,17]确定。

3 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结单模脊形波导截止特性分析

BOA 型光开关要求双模干涉区(2a 区)以外的波导区为单模波导, 因此波导芯的厚度受到同材料同厚度的平板波导截止方程的限制^[10], 对于单模波导要求^[18]

$$b < [n_1^2(x) - n_2^2]^{-1/2} \pi / k_0 \quad (12)$$

另一方面, 由于锗硅应变材料是一种亚稳态材料, 存在一临界厚度 b_c , 因此必须使应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层(波导芯)厚度 b 小于这个临界厚度, 由文献[1]和文献[19]可知, $x = 0.05$ 时, $b_c > 5 \mu\text{m}$ 。图 2 所示的脊形波导的 E_{mn}^* 模满足方程^[10]

$$\frac{4k_0 R_2}{R_1} \left[\left(\frac{aR_1}{2} + 1 \right) R_3 - \text{tg}^{-1} R_3 \right] = 2m\pi \quad (13)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{k_0 \text{tg} \theta}{(n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + k_0 b} \\ R_2 &= \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + k_0 b} \\ R_3 &= [(1 - R_1 h / \text{tg} \theta)^{-2} - 1]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中, n, m 分别为 Y, X 方向导模的阶数。

4 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 结构 BOA 型光开关设计举例

对于锗组分 $x = 0.05$ 的应变材料, 在波长 λ_0 为 $1.32 \mu\text{m}$ 时, 由于硅的本征折射率 $n_2 = 3.505$, 因此这时由(5)式可得 $n_1 = 3.5185$ 。在单模 $\text{Si}/\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ 脊形应变波导设计中, 可采

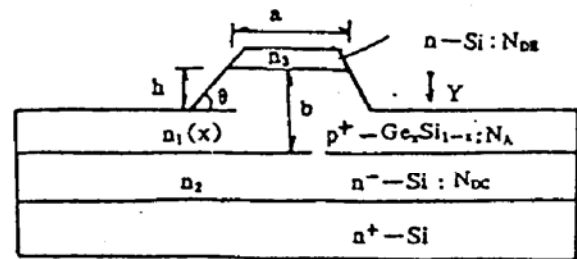


Fig. 2 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction rib waveguide

用常规硅工艺在晶向为〈100〉的 n^+ -Si 衬底上外延生长 $10\ \mu\text{m}$ 厚的 n^- -Si, 其掺杂浓度 $N_{DC} = 3 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, 因此 n_2 可近似等于本征硅的折射率。再在 n^- -Si 上采用快速辐射加热超低压 CVD(RRH/VLR CVD) 技术分别生长一层掺杂浓度为 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, 锗组分 $x = 0.05$, 厚度 $b = 2\ \mu\text{m}$ (由 (12) 式确定) 的 $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ 波导层和厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 n^- -Si (掺杂浓度 $N_{DB} = 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$, 因此 $n_3 = 3.505$) 覆盖层。最后采用 70% 的 KOH (氢氧化钾) 各向异性腐蚀法, 腐蚀出梯形截面脊形波导, 其 $\theta = 54.7^\circ$ [11]。对于 E_{00}^+ 模, 当 $a = 6\ \mu\text{m}$ 时, 由截止方程 (13) 可确定 $h = 0.5\ \mu\text{m}$, 从而确定出腐蚀深度为 $1\ \mu\text{m}$, 因此完全确定了该单模脊形波导的所有结构参数。接下来对 Si/ $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ /Si 结构 BOA 型光开关进行设计。

在双模干涉区 (也是电光调制区), 梯形截面脊形波导的 E_{mn}^+ 模的模方程为 [10]

$$\frac{4k_0}{R_1} [(aR_1 + 1)(n_1^2 - R_2^2 - N_{mn}^2)^{1/2}] - R_2 \text{tg}^{-1} \left[\frac{(n_1^2 - R_2^2 - N_{mn}^2)^{1/2}}{R_2} \right] = 2(m+1)\pi \quad (15)$$

式中 N_{mn} 为 mn 阶导模的有效折射率。 mn 阶导模的传播常数 β_{mn} 与其有效折射率 N_{mn} 的关系为 $\beta_{mn} = k_0 N_{mn}$, 因此 $\Delta\beta_0 = \beta_{00} - \beta_{10} = k_0(N_{00} - N_{10})$ 。对 (15) 式进行数值计算, 并代入单模脊形波导参数, 则双模干涉区 E_{00}^+ 与 E_{01}^+ 模传播常数之差 $\Delta\beta_0 = 3.92 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}$ 。因此确定该干涉区的长度 $L = 802\ \mu\text{m}$ 。由 (1) 式可得实现光开关作用时, 这两个导模的附加传播常数的变化为 $\Delta\beta_{00} + \Delta\beta_{01} = -\Delta\beta_0$, 代入 (2) 式并联立 (3) 式, 由数值计算可得该 BOA 型光开关实现光开关作用所要求的波导芯折射率变化为 $\Delta n_1 = -9.98 \times 10^{-4}$ 。因此由 (4) 式可得这时异质结注入到波导芯的平均电子浓度 $\Delta N_E = 1.58 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 。又根据 (6) ~ (10) 式可得达到 ΔN_E 所加于异质结上的正向偏压 $V_{BE} = 0.87\ \text{V}$ 。不妨取 $V_{CB} = 4\ \text{V}$ 。最后由 (11) 式可得实现开关作用时的电流密度 $J_E = 3.87\ \text{KA}/\text{cm}^2$ 。为了最大限度地减小模式的转换和辐射损耗, 选择波导分支角 $\theta' = 3 \sim 4^\circ$ [20]。另外, 为了形成发射区欧姆接触, 电光调制区上用离子注入方式注入磷原子, 峰值深度 $\leq 0.2\ \mu\text{m}$, 浓度 $N_D = 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$, 如图 1(b) 所示。表 1 列出了 Si/ $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ /Si 结构 BOA 型光开关的结构参数和电学参数。

Table 1 The structure parameters and electricity parameters of the $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ /Si heterojunction BOA optical switch

parameters	$2a$	b	h	L	N_A	N_{DB}	N_{DC}	J_E	V_{BE}	θ	θ'	V_{CB}
value	12 μm	2 μm	0.5 μm	802 μm	10^{18} cm^{-3}	10^{17} cm^{-3}	3×10^{18} cm^{-3}	3.8 k/cm^2	0.87 V	54.7°	$3 \sim 4^\circ$	4V

结 论 首次分析了 Si/ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si 双异质结双极晶体结构 BOA 型光开关模型。并对该开关的纵向结构参数, 横向结构参数及电学参数进行了分析和设计, 因此从理论上证明了 Si/ $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ /Si 结构 BOA 型光开关的实用性和可行性。

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, F. Namavar, J. P. Lorenzo, Optical waveguiding in a single-crystal layer of germanium silicon grown on silicon. *Opt. Lett.*, 1990, 15(5): 270~272
- [2] Y. M. Liu, P. R. Prucnal, Deeply-etched singlemode GeSi rib waveguides for silicon-based optoelectronic integration. *Electron. Lett.*, 1992, 28(15): 1434~1435
- [3] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer et al., Silicon germanium optical waveguides with 0.5 dB/cm losses for singlemode fibre optic systems. *Electron. Lett.*, 1992, 28(2): 159~160
- [4] H. Temkin, A. Antreasyan, N. A. Olsson et al., $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ rib waveguide avalanche photodetectors for $1.3\ \mu\text{m}$

- operation. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(13): 809~811
- [5] Robert A. Mayer, K. H. Jung Dim-Lee Kwong, J. C. Campbell *et al.*, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ optical directional coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(24): 2744~2745
- [6] R. D. Lareau, L. Friedman, R. A. Soref, Waveguided electro-optical intensity modulation in a $\text{Si}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Heterojunction bipolar transistor. *Electron. Lett.*, 1990, 26(20): 1653~1654
- [7] U. Fischer, B. Schuppert, K. Petermann, Integrated optical switches in silicon based on SiGe -waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(7): 785~787
- [8] 冯浩, 李锡华, 王明华等, GaAs 对称定向耦合光开关的研究. 半导体学报, 1993, 14(5): 286~291
- [9] Liu Enke, Liu Yuliang, Zhang Shengliang, Li Guozheng, 1.52 μm silicon 2×2 electrooptic switch, photonics' 92, *The 2nd IEEE international workshop on photonic networks, components, and applications*, J. Chrostowski, J. Terry, Editors. (OCRI, Ottawa, Ontario, Canada), 1992, : 3.10.1-3.10.4
- [10] 刘育梁, 刘恩科, 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子体色散效应. 光学学报, 1991, 11(8): 727~732
- [11] A. Splett, J. Schmidtched, B. Schupper *et al.*, Low loss optical ridge waveguides in a strained GeSi epitaxial layer grown on silicon. *Electron. Lett.*, 1990, 26(14): 1035~1036
- [12] 虞丽生, 半导体异质结物理, 北京, 北京科学技术出版社, 1990: 84~85
- [13] Roosevelt People, Physics and applications of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(9): 1696~1710
- [14] J. C. Sturm, E. J. Prinz, P. M. Garone *et al.*, Band-gap shifts in silicon-germanium heterojunction bipolar transistors. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(26): 2707~2709
- [15] E. P. Prinz, P. M. Garone, P. V. Schwartz *et al.*, The effect of base-emitter spacers and strain-dependent densities of states in $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ heterojunction Bipolar transistors. in *IEDM Tech. Dig.*, 1989: 639~642
- [16] Tajinder Manku, A. Nathan, Electron drift mobility model for devices based on unstrained and coherently strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ grown on $\langle 001 \rangle$ silicon substrate. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1992, ED-39(9): 2082~2089
- [17] T. Won, H. Morkoc, High-speed performance of $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ heterojunction bipolar transistors. *IEEE Electron Device Letters*, 1989, 10(1): 33~35
- [18] 金峰, 范俊清, 集成光学, 上册, 北京, 北京国防工业出版社, 1981: 24
- [19] I. J. Fritz, Role of experimental resolution in measurements of critical layer thickness for strained-layer epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(14): 1080~1082
- [20] 刘育梁, 刘恩科, 刘志敏等, 大截面单模半导体脊形波导传输特性. 光学学报, 1994, 14(3): 292~295

Modeling Analysis of the $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Heterojunction Zero-Gap Directional Coupler Switch

Zhao Cezhou Liu Enke Li Guozheng

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

(Received 9 January 1994; revised 9 March 1994)

Abstract A simple and practical modeling of the $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction zero-gap directional coupler switch (BOA type-Bifurcation Optique Active) is proposed. The electro-optic modulating mechanism of the zero-gap directional coupler switch is discussed by the plasma dispersion effect. The electricity character of the switch is analysed by the heterojunction ultra high injection principle. On the basis of the analysis and the theory of the classical single-mode optical waveguide, structure parameters and electricity parameters of the $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ heterojunction BOA switch with double-mode interference mechanism are designed.

Key words $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction, BOA switch, modeling.