

33-37

Si_{1-x}Ge_x/Si 定向耦合器的研制*

高勇** 李国正 刘恩科 赵策洲 刘西钉

(西安交通大学电子工程系, 陕西, 西安, 710049)

张翔九 卢学海 王迅

(上海复旦大学, 应用表面物理国家重点实验室, 上海, 200433)

A摘要 在运用 SiGe 脊形波导单模条件和有效折射率法分析 SiGe/Si 定向耦合器结构参数的基础上, 采用分子束外延和各向异性腐蚀技术制备出 Si_{1-x}Ge_x/Si (x=0.05) 单模定向耦合器, 在波长为 1.3μm 时, 平均插音小于 -18.1dB, 输出功率耦合效率达到 98.1%.

关键词 Si_{1-x}Ge_x, 光波导, 定向耦合器.

TN252

引言

硅锗材料

⑨

用 SiGe 材料制作的光波导和其它导波光器件的光传输损耗很小, 同时还可避免 SOI (Silicon-on-Insulator) 材料因波导层和衬底 SiO₂ 的大折射率差别引起的耦合失配. 1989 年, Sorey 首先用 CVD 方法研制成 Si_{1-x}Ge_x/Si 光波导^[1], 为 SiGe 材料在集成光学的应用迈出了关键的一步. 我们在 1994 年报道了用 MBE 技术制作传播损耗为 0.5dB/cm 的 Si_{1-x}Ge_x/Si 脊形单模光波导^[2]. 在此基础上, 本文介绍我们研制 SiGe 定向耦合器的工作.

1 理论分析

图 1(a) 和 (b) 分别是 Si_{1-x}Ge_x/Si 定向耦合器的结构和截面示意图. 当激光从定向耦合器的 A 端输入时, 选择合适的耦合间距 S 和耦合长度 L , 激光几乎全部从耦合器 C 端耦合出来. 单模定向耦合器要求耦合器的每个分支承载单模, 每一个分支相当于一个弯曲波导. 根据波导理论, 如果 SiGe 层的生长厚度低于某一临界值, 光的基模和其它高阶模会截止. 为此, 我们计算了波长为 1.3μm 时 TE 模和 TM 模截止厚度与 SiGe 层中 Ge 含量的关系曲线, 如图 2. 从图中根据给定的 Ge 含量, 在 y 方向模阶数 $\nu=0$ 和 $\nu=1$ 曲线间 (即单模区) 选取 SiGe 层生长厚度 d_1 . x 方向的模截止方程由文献 [3] 给出. 根据图 2 确定的 d_1 和版图选定的波导脊宽 W , 由该方程可决定参数 d_2 . 依据以上原则选定的 d_1 , W 和 d_2 可保证定向耦合器各个分支的单模传播特性.

* 国家自然科学基金资助项目

** 西安理工大学, 自动化系, 陕西, 西安, 710048

本文 1995 年 1 月 10 日收到, 修改稿 1995 年 5 月 10 日收到

当光功率为 P_1 的单模激光进入定向耦合器 A 端时(如图 1(a)),其输出端功率分配由下式决定:^[1]

$$\begin{aligned} P_2/P_1 &= \sin^2(KL), \\ P_3/P_1 &= \cos^2(KL). \end{aligned} \tag{1}$$

其中 K 为耦合系数, 达到 100% 能量转换的最短距离(即耦合长度)为 $L_c = \pi/2K$.

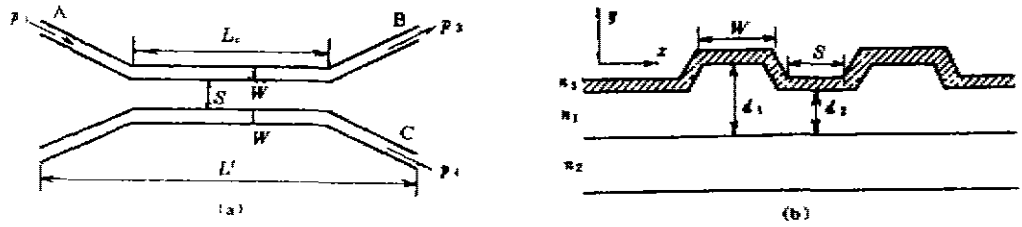


图 1 (a)定向耦合器结构, (b)定向耦合器截面示意图

Fig. 1 The structure (a) and cross section (b) of a single-mode directional coupler.

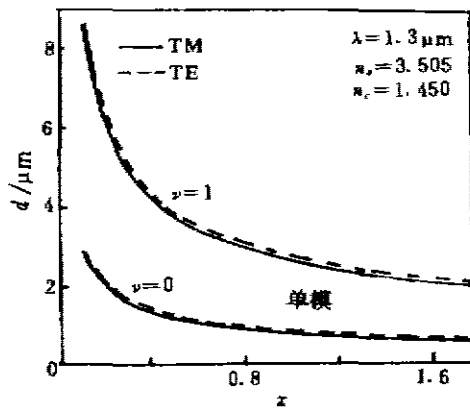


图 2 SiGe 定向耦合器中 TE 和 TM 单模截止厚度与锗含量的关系曲线
Fig. 2 Mode cut-off thickness vs Ge fraction for SiGe directional coupler for TE and TM single mode beam

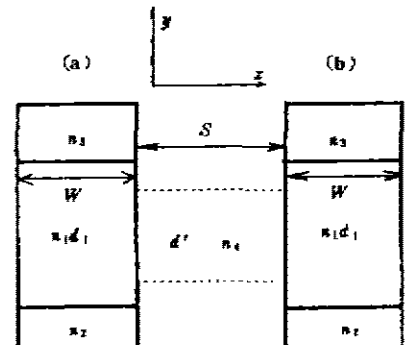


图 3 Si_{1-x}Ge_x/Si 定向耦合器等效结构
Fig. 3 The effective structure of SiGe/Si directional coupler

当 $d_2/d_1 \geq 0.5$ 时, 可将梯形脊形波导视为矩形脊形波导^[5], 由有效折射率法, 定向耦合器的等效结构如图 3 所示. 图中 n_4 由下式确定:

$$n_4 = (N_1^2 - N_2^2 + n_1^2)^{1/2}, \tag{2}$$

式中 N_1 是厚度为 d_1 、折射率分布为 n_3, n_1 和 n_2 的平板波导的有效折射率; N_2 是厚度为 d_2 、折射率分布为 n_3, n_1 和 n_2 的平板波导的有效折射率. 当 y 方向远离截止时, 对于 E_{mod} 模, 有^[6]

$$N_j^2 = n_1^2 - \frac{(n+1)^2 \pi^2}{[kd_j + (n_1^2 - n_2^2)^{-\frac{1}{2}} + (n_1^2 - n_3^2)^{-\frac{1}{2}}]^2}, \quad j=1, 2 \quad (3)$$

式中 k 为真空波数, n 为 y 方向导模阶数.

由场型分析可求解图 3 所示的定向耦合器 E_{2m} 模的本征值方程^[7]

$$K_y d_1 = n\pi + \operatorname{tg}^{-1} \frac{[(n_1^2 - n_2^2)k^2 - K_y^2]^{1/2}}{K_y} + \operatorname{tg}^{-1} \frac{[(n_1^2 - n_3^2)k^2 - K_y^2]^{1/2}}{K_y}. \quad (4)$$

对于偶模, 有

$$K_x W = m\pi + \operatorname{tg}^{-1} \frac{K_{4x} \eta_{14}}{K_x} + \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{K_{4x} \eta_{14}}{K_x} \operatorname{th} \left(\frac{K_{4x} S}{2} \right) \right]; \quad (5)$$

对于奇模, 有

$$K_x W = m\pi + \operatorname{tg}^{-1} \frac{K_{4x} \eta_{14}}{K_x} + \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{K_{4x} \eta_{14}}{K_x} \operatorname{cth} \left(\frac{K_{4x} S}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

式中 m 为 x 方向导模阶数, 且

$$\left. \begin{aligned} \eta_{14} &= n_1^2 / n_4^2, \\ K_{4x} &= [(n_1^2 - n_4^2)k^2 - K_x^2]^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因此定向耦合器 z 方向的传输常数为

$$K_z = (n_2^2 k^2 - K_x^2 - K_y^2)^{1/2}. \quad (8)$$

求解式(4)和(5), 可得偶模的传播常数, 记为 K_e . 求解式(4)和(6)可得奇模的传播常数, 记为 K_o . 耦合长度 L_c 为

$$L_c = \pi / (K_e - K_o). \quad (9)$$

对于 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 的光波, 衬底 p^- -Si 的折射率 $n_2 = 3.505$, 波导上盖层的 SiO_2 的折射率 $n_3 = 1.45$; SiGe 层的 Ge 含量为 0.05 时, 折射率 $n_1 = 3.514$. 根据图 2 曲线选定 $d_1 = 3 \mu\text{m}$ (在单模区范围), 由给定的 d_1 和脊宽 W_2 , 由文献[3]可确定 d_2 , 给定耦合间距 S 可确定耦合长度 L_c . 由此, SiGe/Si 定向耦合器的结构尺寸可全部确定, 如表 1 所示.

表 1 SiGe/Si 定向耦合器结构尺寸 ($x = 0.05, d_1 = 3 \mu\text{m}$)
Table 1 The sizes of SiGe/Si directional coupler

$W(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$S(\mu\text{m})$	$L_c(\mu\text{m})$
4	2.15	3	3280
6	2.45	3	3570

2 SiGe/Si 定向耦合器的制作与测试

首先在 $p^-(100)$ Si 衬底上采用分子束外延方法生长厚度为 $3 \mu\text{m}$ 的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层 ($x = 0.05$), 该过程在复旦大学应用表面物理重点实验室进行, 生长温度为 $400 \sim 600 \text{C}$, 生长室真空度为 $4 \sim 6.7 \times 10^{-9} \text{Pa}$. 再采用常规光刻工艺用 KOH 溶液腐蚀出定向耦合器的图形, 腐

蚀液比例为 $\text{KOH} : \text{H}_2\text{O} = 7 : 3$, 腐蚀温度在 80°C 左右. 为了监控单模特性, 在定向耦合器旁侧陪衬有单条波导. 整个工艺过程为制掩膜版 \rightarrow 低温氧化 \rightarrow 光刻 \rightarrow 各向异性腐蚀 \rightarrow 二次低温氧化 \rightarrow 划片 \rightarrow 端面机械抛光.

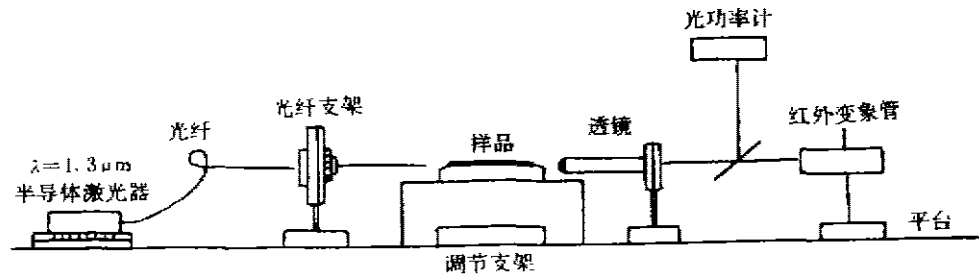


图4 SiGe/Si 定向耦合器测试系统

Fig. 4 SiGe/Si directional coupler measurement system



图5 (a)耦合长度为 L_c 时 C 端输出光斑,
b)耦合长度为 $L_c/2$ 时 B、C 端输出光斑

Fig. 5 The near-field pattern of
the directional coupler when the
coupling length is L_c (a) and $L_c/2$ (b)

在全部工艺过程中应避免高温, 否则会使 SiGe 层的应变完全释放, 产生大量失配位错, 严重影响器件的性能. 掩膜版脊宽 W 、耦合间距 S 以及耦合长度 L_c 均由表 1 给出. 定向耦合器的总长度 L' 和分支角 θ (如图 1(a)) 分别为 5.9mm 和 $1.5 \sim 2^\circ$. 为了便于测试, 版图上设计有耦合长度为 $L_c/2$ 、其它结构参数不变的定向耦合器图形.

定向耦合器的测试系统见图 4. 由半导体激光器发出波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的红外激光束耦合到器件的抛光输入端面, 经过器

件的输出光由透镜耦合到红外变像管和光功率计进行观察和测量. 首先测试陪衬单条波导, 结果表明光的传输呈现单模特性. 由光功率计初步测量和计算得出该单条波导的平均传输损耗约为 0.5dB/cm . 对 SiGe/Si 定向耦合器光斑的测量发现: 当输入光从定向耦合器的 A 端输入时, 耦合长度为 $L_c (=3570\mu\text{m})$ 的定向耦合器只有一个输出端 C 有光斑, 如图 5(a); 而耦合长度为 $L_c/2$ 的器件则有两个强度相近的光斑同时在 B、C 端出现, 如图 5(b). 经光功率计测量: B 端输出光功率为 $132\mu\text{W}$ (5 次取平均), C 端输出光功率为 $129\mu\text{W}$, 说明这时器件两个输出端功率输出相近, 验证了设计的可行性. 当脊宽 $W=6\mu\text{m}$ 、 L_c 为 $3570\mu\text{m}$ 、 $S=3\mu\text{m}$ 时, 测得 SiGe/Si 定向耦合器的 $P_4=255\mu\text{W}$, $P_3=5\mu\text{W}$, 输出功率耦合效率 $P_4/(P_3+P_4)=98.1\%$, 平均串音 $10 \log P_3/P_4$ 为 -17.1dB , 实现了定向耦合器的功能. 初步测定该定向耦合器平均插入损耗为 3.8dB , 更精确的损耗值需用锁向放大器、示波器、Ge 光电探测器组成的测试系统作进一步测量.

参考文献

- 1 Soref R A, Namavar F, Lorenzo J P. *Optics Letters*, 1990, 15(5): 270~272
- 2 Gao Yong, Liu Enke *et al.* *Chinese Phys. Lett.*, 1994, 11(12): 734~736
- 3 刘育梁, 刘恩科. *光学学报*, 1991, 11(8): 727~732
- 4 冯 浩, 李锡华, 王明华, 等. *半导体学报*, 1993, 14(5): 286~291
- 5 Schidtchen J, Splett A, Schuppert B, *et al.* *Electronics Letters*, 1991, 27(16): 1486~1487
- 6 马春生, 刘式墟. *电子学报*, 1989, 17(5): 85~90
- 7 易有胡, 张玉田, 陈德昭, 等. 1991 光电子器件与集成技术年会论文集, 北京: 清华大学出版社, 周炳昆主编, 1992, 451~457

DEVELOPMENT OF SiGe/Si DIRECTIONAL COUPLER*

Gao Yong** Li Guozheng Liu Enke Zhao Cezhou Liu Xiding

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

Zhang Xiangjiu Lu Xuekun Wang Xun

(*National Key Laboratory of Applied Surface physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Abstract Based on the analysis of structural parameters of SiGe/Si directional coupler by using SiGe ridge waveguides single mode conditions and the effective index methods, the SiGe/Si ($x=0.05$) directional coupler was fabricated by MBE method and by using KOH anisotropic etching. The average coupling efficiency is 98.1% at $\lambda=1.3\mu\text{m}$. The average crosstalk is below -18.6dB .

Key words Si_{1-x}Ge_x, optical waveguide directional coupler.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China

** Department of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China