

Si_{1-x}Ge_x/Si Y-分支波长信号分离器*李宝军 李国正^V 刘恩科

(西安交通大学微电子工程系, 陕西, 西安, 710049)

TN236

摘要 利用 Si_{1-x}Ge_x 的等离子体色散效应, 对 1.3 μm 和 1.55 μm 光通信波长的 Si 基 Si_{1-x}Ge_x 波长信号分离器进行了理论分析, 设计了结构参数和电学参数, 并分析了其分支特性。

关键词 Si_{1-x}Ge_x, 光波导, 波长信号分离器。

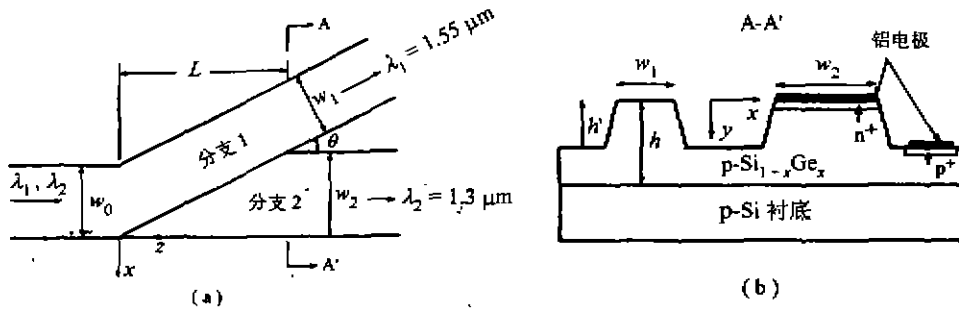
引言

波长信号分离器(WSD)是光通信和光信息处理系统中非常重要的器件, 它是将一束包含两种不同波长的光信号按波长分开为两路输出的滤波器。国外虽然出现了关于 1.3 μm 和 1.55 μm 的 WSD 的研究报道^[1-3], 但这些 WSD 都是以玻璃作为主要材料制成的, 难以与微电子器件集成在一起。随着光通信系统容量的不断扩大和光集成度的提高, 开发一种既适合于光通信系统、又能满足微电子和光电子器件大规模集成要求的 WSD 引起了关注。Si 是实现这种集成的最佳材料。以 Si 为主体的 Si_{1-x}Ge_x 合金除具有等离子体色散效应的特点外, 还因其晶格常数、禁带宽度、折射率等都随 Ge 组份 x 的变化而变化, 成为当今国际上最为活跃的课题之一, 已用于光电子器件(OEIC's)的研制中^[4], 并且用 Si_{1-x}Ge_x 合金制作的光波导具有很低的传播损耗($<0.5 \text{ dB/cm}$)^[5], 因而可望实现用 Si_{1-x}Ge_x 合金材料制作波导型 WSD 器件。为此, 本文利用 Si_{1-x}Ge_x 材料上述诸多优点和在研制光波导方面的成功, 对 1.3 μm 和 1.55 μm 的 Si_{1-x}Ge_x WSD 进行了系统的理论分析和优化设计, 为进一步的实验和研制奠定了基础。

1 理论分析

图 1(a)和(b)分别是波长 $\lambda=1.3, 1.55 \mu\text{m}$ 的 Si_{1-x}Ge_x Y 分支 WSD 的结构和截面示意图。它是在 p-Si(100)衬底上外延生长 p 型 Si_{1-x}Ge_x 波导形成的。图 1 中 w_1 和 w_2 分别是 Y 分支 1 和分支 2 的宽度, h 是波导的厚度, h' 是腐蚀深度。在图 1 所示的 WSD Y 分支 2 的 pn⁺结上加正向偏压 V 时, 就有大量的电子从 n⁺ 区注入到波导区。为了保持电中性, p 区就会积累等量的空穴 ΔN_A 。由于 n⁺ 层很薄, 因此 pn⁺ 的注入可看为是沿 y 方向的扩散和漂移。在大注入情况下, 注入到 p 区的电子浓度 $\Delta N_p(0)$ 很大, 接近或超过 p 区多子浓度 $p_{p0} \approx N_A$ ($N_A \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。注入的电子在 p 区边界处形成积累, 当它们向 p 区内部扩散时, 在电子扩散区内形成一定的浓度分布 $\Delta N_p(y)$ 。由于波导芯的厚度 h 远小于载流子的扩散长度, 因此将扩散区内电子的分布近似看为线性分布, 可得

* 国家自然科学基金资助项目, 编号 69636040

图1 波长 $\lambda=1.3, 1.55\mu\text{m}$ 的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ Y分支WSD

(a) 顶视图 (b) 截面图

Fig. 1 Configuration of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ waveguide Y-branch WSD

(a) top view (b) A-A' cross-section view

$$\frac{d\Delta N_p(y)}{dy} = \frac{N_i(x)}{h} \exp\left(-\frac{qV}{2k_0T}\right), \quad (1)$$

因而有

$$d\Delta N_p(y) = d\Delta N_p(0)(1 - y/h), \quad (2)$$

式中 $d\Delta N_p(0)$ 满足

$$d\Delta N_p(0) = \frac{N_i^2(x)}{N_A} \exp(qV/k_0T), \quad (3)$$

它是 $y=0$ 处注入的电子浓度. 式中 V 为 pn^+ 结外加的正偏压, T 为绝对温度, k_0 为玻耳兹曼常数, $N_i(x)$ 是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的本征载流子浓度. 经推导, $N_i(x)$ 与Si的本征载流子浓度 $N_i(\text{Si})$ 关系为

$$N_i(x) = \sqrt{A(x)} N_i(\text{Si}) \exp(d\Delta E_v/2k_0T), \quad (4)$$

式(4)中 $N_i(\text{Si})=1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ($T=300\text{K}$), ΔE_v 为导带的不连续性, $x < 0.5$ 时

$$\Delta E_v = 0.74x, \quad (5)$$

$A(x)$ 是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金与单晶Si的总有效状态密度之比值,即

$$A(x) = (N_c N_v)_{\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x} / (N_c N_v)_{\text{Si}}. \quad (6)$$

大注入时,p区增加的空穴浓度 ΔN_h 将超过p区原有的空穴浓度,p区增加的电子浓度 ΔN_e 和空穴浓度 ΔN_h 将引起 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金材料的折射率变化. 由于 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金材料中Ge的组份很小($x \leq 10\%$),因而, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金仍以Si为主体,其等离子体色散效应可用下面著名的关系式^[6]表示:

$$\Delta n = -\frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{e^*}} + \frac{\Delta N_h}{m_{h^*}} \right), \quad (7)$$

式(7)中: $n=n_{\text{Si}}+0.18x$ 是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率, q 是电子电荷, c 是光速, ϵ_0 是真空介电常数, λ 是波长, ΔN_e 和 ΔN_h 分别是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中电子和空穴的浓度变化. m_{e^*} 和 m_{h^*} 分别是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中电子和空穴的电导有效质量,由下式确定:

$$m_{\text{ce}}^* = m_{\text{ce}(\text{Si})}^*(1-x) + m_{\text{ce}(\text{Ge})}^*x, \quad (8)$$

$$m_{\text{ch}}^* = m_{\text{ch}(\text{Si})}^*(1-x) + m_{\text{ch}(\text{Ge})}^*x. \quad (9)$$

由此可见,当 WSD 分支 2 中自由载流子浓度增大时,引起材料折射率变小($n-\Delta n$).在相同注入载流子浓度下,波长 λ 越大,折射率的变化越大.当注入的载流子引起分支 2 的折射率变小后,波长为 $\lambda_1=1.55\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.3\mu\text{m}$ 的两种光就在 WSD 分支 1 和分支 2 的两交界处发生反射或折射.由 Snell 定律可知,这两种光在两分支界面处发生全反射时的临界角 φ_1 和 φ_2 是不同的,由于 $\varphi_1 < \varphi_2$,所以,若入射角满足 $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$,则可使 $1.3\mu\text{m}$ 的光折射,而波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的光发生全反射.

2 设计和结果

对 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光,当注入载流子浓度引起 Si_{1-x}Ge_x 合金中电子和空穴的浓度变化 $\Delta N_c (= \Delta N_v) = 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 时,根据式(7)~(9)计算出由等离子体色散效应所引起的折射率变化为 10^{-2} 量级的 $x=0.03\sim 0.06$.考虑到工艺条件及波导与光纤数值孔径匹配等问题,选取 $x=0.05$.从而得到波长为 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 时, Si_{1-x}Ge_x 折射率的变化 Δn 分别为 0.0143 和 0.0205.再由 $\sin\varphi = 1 - \Delta n/n$ 得出波长为 $1.55\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$ 的光在 WSD 的两分支界面处发生全反射的临界角分别为 $\varphi_1 = 83.70^\circ$ 和 $\varphi_2 = 84.88^\circ$,所以,当入射角满足 $83.70^\circ < \varphi < 84.88^\circ$ 时可实现 $\lambda_1 = 1.55\mu\text{m}$ 的光发生全反射,而 $\lambda_2 = 1.3\mu\text{m}$ 的光被折射.因而取 $\varphi = \varphi_1 + (\varphi_2 - \varphi_1)/2 = 84.29^\circ$,从而得到 WSD 的分支角 $\theta = 5.7^\circ$,再由式(1)~(6)得到 pn⁺ 结上所加的正向偏压 $V = 0.97\text{V}$,由图 1 中的几何关系 $L = w/\text{tg}\theta$ 计算得到 WSD 的分支区长度 $L = 110.2\mu\text{m}$.根据对脊形 Si_{1-x}Ge_x/Si 光波导的研究报道^[7,8]和对其单模截止特性的分析,当 $x = 0.05$ 时,较理想的波导脊高和腐蚀深度分别为 $3\mu\text{m}$ 和 $2.6\mu\text{m}$.对应于 $\lambda_1 = 1.55\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2 = 1.3\mu\text{m}$ 波长的波导脊宽分别为 $8.5\mu\text{m}$ 和 $11\mu\text{m}$.表 1 是 Si_{1-x}Ge_x 光波导 Y 分支 WSD 的结构参数和电学参数.

表 1 Si_{1-x}Ge_x/Si 光波导 Y 分支 WSD 的结构参数和电学参数
Table 1 Structure parameters and electricity parameters of
Si_{1-x}Ge_x/Si optical waveguide Y-branch WSD

参数	x	$h(\mu\text{m})$	$h'(\mu\text{m})$	$w_1(\mu\text{m})$	$w_2(\mu\text{m})$	$\theta(^{\circ})$	$L(\mu\text{m})$	$V(\text{V})$
值	0.05	3	2.6	8.5	11	5.7	110.2	0.97

3 分支特性

Si_{1-x}Ge_x/Si 光波导 Y 分支 WSD 的分支区长度为 $110.2\mu\text{m}$,远大于波长 1.3 和 $1.55\mu\text{m}$,因此可将反射区视为无限长^[9].在发生全反射时,只考虑光波与导波模式的耦合.通过解 Maxwell 方程,并利用 Fresnel 公式,可得到波长分别为 1.3 和 $1.55\mu\text{m}$ 的光波沿分支 2 的透射率 P 和分支 1 的反射率 R 分别为^[10]:

$$P = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta n}{n}\right)^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}, \quad (10)$$

$$R = \frac{\sin \frac{\theta}{2} - \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta n}{n}\right)^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}{\sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta n}{n}\right)^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}, \quad (11)$$

串音:

$$C = 10 \log(P/R) \text{ 和 } C = 10 \log(R/P); \quad (12)$$

损耗:

$$L = 10 \log(1/R) \text{ 和 } L = 10 \log(1/P); \quad (13)$$

消光比:

$$E = 10 \log P \text{ 和 } E = 10 \log R. \quad (14)$$

图 2, 3 分别是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ WSD 的串音、损耗和消光比与分支角 θ 的关系. 从图 2 和 3 看出, 随着分支角的增大, 串音会降低, 但波导的损耗增大; 若分支角较小, 虽然可减小波导的损耗, 但串音又会增大, 并且对 $1.3\mu\text{m}$ 波长的消光比会增大, 而对 $1.55\mu\text{m}$ 波长的消光比降低. 另外, 从实用性考虑, 波导的串音和损耗应分别小于 -20dB 和 1dB , 消光比应大于 20dB . 因此, 综合考虑以上各因素可知, 对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导 WSD, 5.7° 的分支角是很好的. 对 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的串音、损耗、消光比分别为 -26dB 、 2.4dB/cm 、 20dB 和 -14.5dB 、 1.4dB/cm 、 38dB .

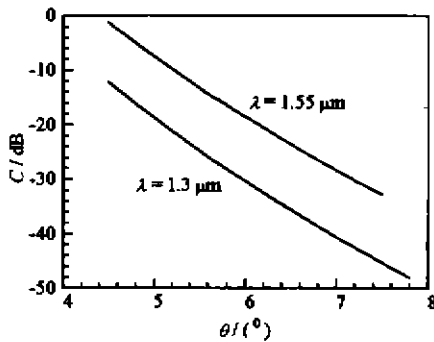


图 2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ WSD 的串音与分支角的关系
Fig. 2 Crosstalk versus branch angle
for the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ WSD

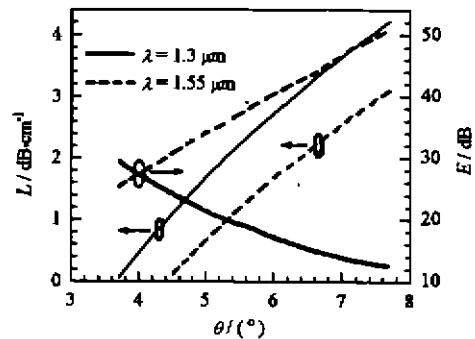


图 3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ WSD 的波导损耗
和消光比与分支角的关系
Fig. 3 Waveguide loss and extinction
ratio versus branch angle for
the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ WSD

4 结论

利用 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的等离子体色散效应特性, 对 Si 衬底上的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 波长信号分离器经理

论分析和设计得出:(1) Ge 含量 $x=0.05$, 波导的脊高和腐蚀深度分别为 $3\mu\text{m}$ 和 $2.6\mu\text{m}$. 对应于 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的波导脊宽分别为 $11\mu\text{m}$ 和 $8.5\mu\text{m}$. 分支角 $\theta=5.7^\circ$, 分支区长度 $L=110.2\mu\text{m}$, 要实现 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的波长信号分离, pn⁺ 结上所需加的正向偏压值为 0.97V ; (2) 在分支角 $\theta=5.7^\circ$ 时, 这种结构的波长信号分离器对 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的串音、损耗、消光比分别为 -26dB/cm 、 2.4dB/cm 、 20dB 和 -14.5dB 、 14.4dB 、 38dB .

参考文献

- 1 Goto N, Yip G L. *Electron. Lett.*, 1990, 26(2):102~103
- 2 Xiang F, Yip G L. *JPR Tech. Dig.*, 1994, 3(2):130~132
- 3 Xiang F, Yip G L. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, 14(7):1690~1694
- 4 Soref R A. *Proc. IEEE*, 1993, 81(12):1687~1706
- 5 Schmidtchen J, Schuppert B, Splett A, et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, 4(8):875~877
- 6 Soref R A, Bennett B R. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, 23(1):123~126
- 7 Naval L, Jalali B, Gomelsky L, et al. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, 24(5):787~797
- 8 高 勇, 李国正, 刘恩科, 等. *光学学报*, 1995, 15(12):1707~1711
- 9 Shimomura K, Suematsu Y, Arai S. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, 26(5):883~892
- 10 李宝军, 刘恩科. *半导体学报*, 1997, 18(4):281~285

Y-BRANCH WAVELENGTH SIGNAL DIVIDER ON Si_{1-x}Ge_x/Si*

Li Baojun Li Gozheng Liu Enke

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

Abstract Based on the plasma dispersion effect of Si_{1-x}Ge_x, a systematic analysis and optimizing design were reported for the Si_{1-x}Ge_x wavelength-signal divider for the operation of optical communication wavelengths $\lambda=1.3$ and $1.55\mu\text{m}$. On the basis of theoretical analysis, the structure parameters and electricity parameters of the WSD were designed and the branching characteristics were analyzed. The wavelength separation was demonstrated by crosstalks, waveguide losses and extinction ratios.

Key words Si_{1-x}Ge_x, optical waveguide, wavelength, signal divider.

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