

硅衬底上锗硅合金光波导的研制

潘 姬 赵鸿麟 杨恩泽

李德杰 吴伯瑜

(天津大学电子工程系, 天津 300072) (清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 报道锗硅合金在 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 的脊形单模光波导的设计、工艺及测量结果. 这种光波导的传播损耗已达 0.7 dB/cm . 脊形的高 $4 \sim 8 \mu\text{m}$, 宽 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 均和单模光纤芯径相当. 此外, 其数值孔径在光波导的输入、输出端均能和单模光纤匹配, 它已满足硅光集成对光波导的要求. 文中最后报道了用这种锗硅合金光波导试制 Y 分支器, 并观察到二支分路输出的单模光斑.

关键词 硅光集成, 锗硅光波导.

1 引 言

在二类硅光集成技术中^[1,2], 全硅或硅中的光集成技术能直接应用现已高度成熟的硅单晶材料及集成电路加工技术. 自 85 年首篇文章发表后^[3], 人们对硅光波导及光开关等光器件的研究同时展开的^[4,5]. 但很快发现硅中光波导的制备技术远未成熟. 80 年代末至 90 年代初致力于更新硅光波导的制备方法. 经过数次重大技术突破, 目前已能制备符合光集成要求的全硅光波导.

初期的硅光波导是在低阻硅单晶片上用化学汽相外延法生长 $n/n^+(p/p^+)$ 外延硅光波导, 但因衬底的高载流子浓度吸收光能量使传播损耗过大而无实用价值. 改进的 SIMOX 结构硅光波导得到发展^[6,7]. 研究表明, 它大幅度降低了传播损耗并接近实用水平, 然而, 其输出端因数值孔径太大不能和光纤良好匹配.

目前研制的锗硅合金光波导^[8], 不仅保留 $n/n^+(p/p^+)$ 光波导及 SIMOX 光波导的优点, 而且克服了 SIMOX 光波导数值孔径过大的缺点. 这种锗硅合金光波导已具备光集成技术所要求的特性: 传播损耗 $< 1 \text{ dB/cm}$; 大断面, 脊的高和宽均和单模光纤芯径相当; 单模光波导; 数值孔径在光波导输入输出端都能和光纤匹配.

2 理论分析

锗硅合金脊形光波导断面图如图 1 所示. 脊的高宽均约 $5 \sim 10 \mu\text{m}$, 即所谓大断面. 外脊高 $rb > b/2$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 光波集中在脊形内传播并只传播基模. 厚度为内脊高 b 的 GeSi 层用常规汽相外延法生长. 制成的光波导其数值孔径也能和光纤匹配. 其设计的理论依据为

1) 脊形光波导的单模条件^[9].

脊形波导是三维的:当光波沿 z 方向传播时,光场强度也是 x, y 的函数. 单模脊形波导要求在 x 及 y 方向均只能传播基模. 在 x (垂直)方向,为了不传播高阶模,可以简单地令腐蚀深度控制在 $0.5 \leq r < 1.0$. 因为只要 $r \geq 0.5$, 则二侧平板波导基模的有效折射率一定高于脊形中部高阶模(含一阶模)的有效折射率,高阶模成为漏模. 本文由于制得的折射率差很小, r 值采用浅腐蚀. 一般, $0.8 \leq r \leq 0.9$. Y (水平)方向的情况复杂一些. 脊形波导可以看成由三个平板波导组成,中间一个高 b 宽 a 的平板波导及二侧二个高 rb 的平板波导. 光波在脊形中传播时其上部受二侧壁的约束,其下部则和二侧的平板波导的导模相互作用. 这种作用是共振或导模匹配的作用. 定量描述这种作用要引入有效波导参数 V :

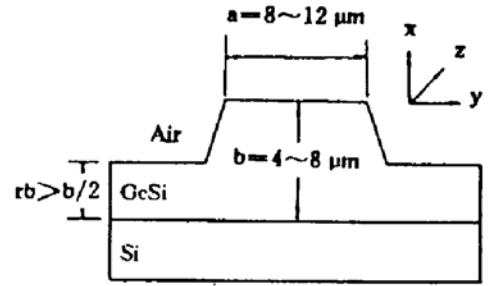


Fig. 1 Cross section of ridge optical waveguide

$$V = \frac{\pi}{2} \frac{aw_1}{b} \sqrt{\delta} \tag{1}$$

$$\delta = \left(\frac{w_2}{rw_1}\right)^2 - 1 \tag{2}$$

式中 w_1 及 w_2 分别为中间平板波导及二侧平板波导的波导高度参数,其值分别由其相应的高度及折射率决定. V 的物理意义是波导传播光波的能力,当 $r \geq 0.5$ 并且

$$V < V_c = \frac{\pi}{2}(1 + 0.3 \sqrt{\delta}) \tag{3}$$

时,波导中除基模外,所有高阶模都停止传播. 上式代入(1)式经整理得到简明的单模条件为

$$(a/b) \leq 0.3 + (r/\sqrt{1-r^2}) \tag{4}$$

上述脊形光波导的单模条件表明,对厚度 b 高达 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的多模平板光波导,可以通过控制 a/b 及腐蚀深度 $(1-r)b$ 制备大断面单模脊形光波导.

2) 硅光波导的数值孔径.

单模光纤的数值孔径 $NA \approx 0.2$. 对称光波导的数值孔径为:

$$\sin \phi = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}/n_0 \tag{5}$$

n_1 为波导层折射率, n_2 为衬底折射率, $n_0 = 1$. 对 n_1, n_2 的实际范围, (5)式可近似为:

$$NA = \sin \phi \sim (2n_2 \Delta n)^{1/2} \tag{6}$$

$\Delta n = n_1 - n_2$. $n_2 = 3.5$ 代入(6)式,得硅光波导的 NA 和 Δn 的关系如图 2 所示. 图 2 表明, $\Delta n = 10^{-2} \sim 10^{-3}$, 光波导的 NA 才能和单模光纤匹配,对 SIMOX 光波导, $n_1 = 3.5, n_2 = 1.46, NA \sim 3.0$, 和单模光纤严重失配. 下面的分析证明锗硅光波导的 Δn 满足在上述范围内的要求.

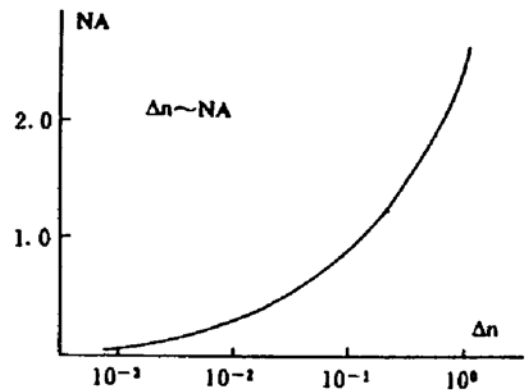


Fig. 2 The relationship between NA and Δn for Si waveguide

3) 锗硅光波导对合金层的特定要求. 本文研究用锗硅合金层制备大断面脊形光波导,厚度高

达 $4\sim 8\ \mu\text{m}$. 不同于锗硅超晶格层.

锗硅光波导中, 波导层和其下覆盖层 Si 间的折射率差 $\Delta n = \Delta n_c + \Delta n_s$. 式中 Δn_c 是因含锗量 x 变化引起的折射率变化. 已经证明^[10], 含锗量不超过 20% 时, $\Delta n_c = 0.086x$. x 是锗的克分子比例. Δn_s 是应力引起的折射率变化, 其值在 10^{-3} 到 10^{-2} 之间, 根据这些结果, 制备锗硅光波导, 锗硅合金层的含锗量 $x < 10\%$ 就够. 锗硅层是含锗量不高的合金层, 其中的锗和硅的晶格失配率为 4.2%, 含锗量为 x 时, 合金层的晶格失配率为 $0.042x$. 由于 x 值不大, 合金层中晶格失配率不严重. 合金层和衬底的介面有应力存在. 锗硅合金层较厚, 离界面的距离增加, 应力会逐步缓释. 这些情况决定了制备锗硅波导层, 不需采用分子束外延工艺, 而可以用成本较低的化学汽相外延法.

3 工艺过程

图 3 是锗硅光波导制备工艺流程图. 衬底是 n 型 $\langle 100 \rangle$ 硅单晶片, $\rho > 30\ \Omega \cdot \text{cm}$. 第二步是常规化学汽相外延. 外延过程中掺锗, 形成锗硅合金层. 含锗量低于 10%, 厚度 $4\sim 8\ \mu\text{m}$. 至此锗硅平板波导形成. 后面淀积 SiO_2 , 光刻及定向腐蚀三步, 是将锗硅平板波导制成单模脊形波导, 其脊宽取 $8\sim 12\ \mu\text{m}$. 测量前的最后一步是端面抛光, 是例行的精密工艺, 要求垂直且镜面.

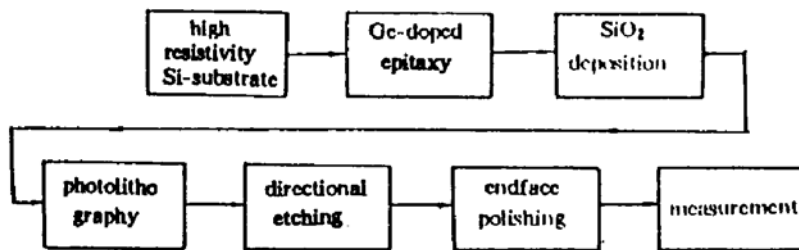


Fig. 3 Flow diagram for manufacturing GeSi/Si waveguides

4 测量结果

实验分别测量了波长 $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ 的光波经光波导输出后的光场分布、模斑及在光波导中的传播损耗. * 测量装置为 $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ 的激光和另一束红色激光经定向耦合器送入同一单模光纤. 在红光引导下 $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ 的光波经端面耦合输入光波导. 锗硅光波导的长度为 $1\sim 2\ \text{cm}$. 测量光场及模斑时, 光波导输出的光波经聚光镜送往红外摄像管, 然后分别输入监视器及示波器^[8].

图 4 是 $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ 光波经锗硅光波导的输出波形, (a) 为光场分布 (一个尖峰), (b) 模斑 (一个圆斑). 这些结果表明研制的锗硅脊形光波导已成功地输出单模光波. 与 SIMOX 光波导的输出波形^[8] 比较, 脊形光波导的光场分布变高变陡, 模斑的发散性显著变小. 说明锗硅光波导的性能如理论分析那样提高了.

传播损耗的测量是光波从光波导输出时再耦合进光功率计, 光波导的传播损耗 L 为:

* 测量工作主要是在清华大学集成光电子学国家重点联合实验室中进行的

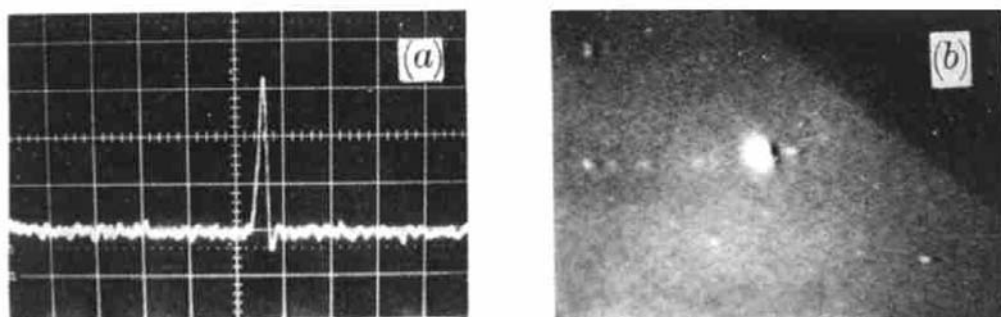


Fig. 4 Output waveform after passing through GeSi_4 waveguide for $1.3 \mu\text{m}$ wavelength

(a) distribution of optical field (b) the mode spot

$$L = -\frac{4.3}{z_1 - z_2} \ln(p_2/p_1) \text{ dB/cm} \quad (7)$$

z_1 、 z_2 为光波导长度， p_1 、 p_2 为相应输出光功率，测量前选取脊高相同长度相差较大的二片或三片样品组成一组，对每组样品中同一脊宽波导进行多点测量得 p_1 、 p_2 平均值并代入(7)式计算部分典型结果，如图 5 所示。这些结果表明，光波导传播损耗值的最佳值均已小于 1 dB/cm 。但数据分散性比较严重，传播损耗值大于 1 dB/cm 也有相当数量。

这种测量方法得到的传播损耗值不包括耦合损耗，但对良好、稳定的耦合提出较高的要求。一般，影响稳定耦合的主要因素是端面抛光质量。上述测量中数据的分散性，作者认为其原因可能主要也是由于抛光质量不均匀引入耦合损耗的波动。目前实验采用 $400\times$ 显微镜检查抛光质量，如何进一步提高抛光，保证端面的镜面质量有待继续探索。

这了检测锗硅单模脊形光波导的实用性。采用本文研制的锗硅单模脊形光波导，试制了锗硅 Y 分支器。分支器的输入及二支输出光波导，其分支夹角为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 。二支输出间的距离为 $200 \mu\text{m}$ 。图 6 是这种锗硅 Y 分支器的输出模斑。模斑表明，试制的锗硅 Y 分支器其二路输出端已成功地输出单模光波。

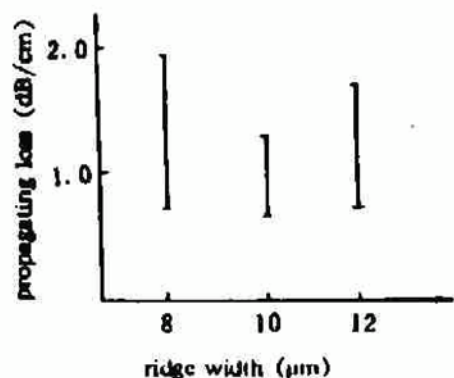


Fig. 5 Distribution of propagating loss



Fig. 6 Output pattern from GeSi Y splitter

结 论 在高阻 Si 衬底上，用轻掺杂锗的化学汽相外延法已研制成功锗硅大断面单模脊形光波导。这种光波导的传播损耗已达到小于 1 dB/cm ，具备 SIMOX 光波导的各项优点外，同时在光波导的输入输出端均能光纤模斑匹配。并用其试制锗硅 Y 分支器，在二支分路的终端成功地输出均匀的单模光波。

参 考 文 献

- [1] F. S. Hickernell, Optical waveguide on silicon. *Solid State Tech.*, 1988, **31**: 83~88
- [2] R. A. Soref, J. P. Lorenzo, Silicon guided-wave optics. *Solid State Tech.*, 1988, **31**(11): 95~98
- [3] R. A. Soref *et al.*, Single-crystal silicon; A new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(21): 953~954
- [4] R. A. Soref *et al.*, 1.3 μm electro-optic silicon switch. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(1): 6~8
- [5] 赵鸿麟, 潘 姬, 杨恩泽, 全硅光波导及光开关研究进展. 吉林大学自然科学学报, 1990 特刊, 160~161
- [6] B. L. Weiss *et al.*, Optical waveguides in SIMOX structure. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1991, **3**(1): 19~21
- [7] Pan Ji, Zhao Honglin, Yang Enze, Optical singlemode rib waveguides in SIMOX structure. *The 4th Sino-Japanese Joint Meeting on Optical Fibre Science and Electromagnetic Theory (OFSET' 93)*, 1993, 103~108
- [8] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz *et al.*, Silicon germanium optical waveguides with 0.5 dB/cm losses for single mode fibre optical system. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2): 159~160
- [9] R. A. Soref, J. Schmidtchen *et al.*, Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(8): 1971~1974
- [10] R. A. Soref, F. Namavar *et al.*, Optical waveguiding in an epitaxial layer of silicon-germanium grown on silicon. *Proc. SPIE.*, 1989, **1177**: 175~184

Fabrication of Silicon-Based GeSi Alloy Optical Waveguides

Pan Ji Zhao Honglin Yang Enze

(Department of Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072)

Li Dejie Wu Boyu

Department of Electronics Engineering, Qinghua University, Beijing 100084)

(Received 7 December 1993; revised 16 February 1994)

Abstract The new development in silicon optical integration, and the design and processes of fabricating GeSi/Si single-mode rib waveguide at the wavelength $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ is reported. The propagating loss of the waveguide has reached 0.7 dB/cm. The height and width of the waveguide are 4~8 μm and 8~12 μm respectively. The size of them are comparable to those of single-mode fibre cores. Besides, the numerical aperture of the waveguide at the ends are also matched to the fibre. The fabricated waveguide meets all the demands of silicon optical integration. Finally, the single mode outputs from a Y-power-divider prepared by the GeSi-Si rib waveguides discribed above is shown.

Key words silicon optical integration, GeSi-Si waveguide.