

硅衬底上锗硅合金光波导设计 及工艺的优化考虑

赵鸿麟 潘 姬 冯 健 杨恩泽

(天津大学电子工程系, 天津 300072)

李德杰 吴伯瑜

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 报道用射频加热化学汽相沉积法制备 Si/GeSi/Si 大断面单模脊形光波导中设计和工艺的进一步完善。GeSi 合金层中 Ge 的含量 x 要满足脊形光波导是单模、光波导的数值、孔径接近单模光纤值、脊高小于临界厚度值等, 计算表明兼顾上述三项要求应取 $x = 1 \sim 3\%$; 脊的高与宽受大断面及单模的制约。Si 的晶体结构使脊的二个腐蚀侧壁是斜坡, 为此起始脊宽取 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 为宜; 腐蚀液、抛光液的选取要保证脊侧壁及波导端面的优良镜面。上述设计及工艺优化使光波导的实测性能显著提高, 离散性降低, 最佳传播损耗已降到 0.3 dB/cm 。

关键词 光波导, 化学汽相沉积法。

1 引 言

全硅光集成技术因其工艺和高度成熟的硅材料及微电子技术兼容等而呈光明前景。为了研制完全满足光集成要求的光波导十年来在理论及工艺方面均有重大突破^[1]。用多模平板波导可以制备单模脊形波导的理论为制备大断面单模脊形光波导提供理论基础^[2]。制备技术上初期的 n/n^+ 或 p/p^+ 工艺第一次实现了在硅中制得大断面单模脊形光波导, 但是传播损耗太大^[3]。后来的 SOI (Silicon-on-Insulator) (例如 SIMOX) 技术, 传播损耗降低了, 但数值孔径偏大^[4, 5]。近期国内外均已基本研制成功的硅衬底上锗硅合金光波导, 则保留了上述二种方法的优点, 又克服了它们的缺点^[6~8]。所以 GeSi 材料及其器件是当前活跃的课题之一。一般 GeSi 层的生长方法是 MBE 或超高真空 UHV-CVD、LPCVD 等^[9]。射频加热化学汽相沉积法虽其生长速度快, 但由于生成后的晶体过渡层宽而不宜制作超薄 GeSi 层。不过, 本研究生长数微米厚的 GeSi 层, 数百埃的过渡层影响不大, 其生长速度快的优点反而得以发挥。至今, 国内外经验证明, 性能最好的 GeSi 光波导是用射频加热化学汽相沉积法制取的^[6, 7]。

本文是对 GeSi 合金光波导的设计进一步深入, 工艺上进一步改进, 设计、工艺优化后制备的光波导的性能明显提高; 测量条件相同的情况下, 输出光场的峰值更高了, 插入损耗及传播损耗降低了, 离散性降低, 从而提高了成品率。

2 设计及工艺优化

2.1 GeSi 合金层中 Ge 含量 x 的优化

在文献[7]中已分析了制约 x 的因素之一——数值孔径。为了和单模光纤能够有效耦合，硅脊形光波导的数值孔径应是 0.2 左右。SIMOX 型光波导的主要缺点是波导层和覆盖层间的折射率差值 Δn 太大，从而数值孔径太大。适宜的 Δn 为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ，由 x 和 GeSi 层折射率的关系可知 $x < 10\%$ 都能满足上述 Δn 适宜值的要求。

再分析临界厚度对 x 的制约。在 Si 衬底上外延生长的 GeSi 合金层因 Ge 和 Si 晶格常数的失配而承受一定的应力。应力的大小决定于 x 及 GeSi 层厚度 T 。当 T 超过某一临界值 T_c ，大量产生失配位错破坏了材料的正常性能。

x 和临界厚度 T_c 间的关系国内已有详细的介绍^[5,10]、People 与 Bean 的经验式和实验结果较符合。

$$T_c (\text{nm}) = \frac{1.9 \times 10^{-3}}{f_m^2} \ln \left(\frac{T_c (\text{nm})}{0.4} \right) \quad (1)$$

式中 $f_m = 0.042x$ 是晶格失配率。如图 1 所示，当 $x = 0.03$ ， T_c 已降至 $12 \mu\text{m}$ 。制备大断面脊形光波导，脊高一般为 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ ，可见 $x = 3\%$ 作为上限是适宜的。锗含量 x 的优选范围是 $1 \sim 3\%$ 。

2.2 脊宽的优化

在文献[7]中已分析了脊宽对波导中光波导模的作用。模拟计算表明，当脊宽 $w = 8 \mu\text{m}$ ，是单模。当 $w = 12 \mu\text{m}$ 则为多模。（ $w = 9.3 \mu\text{m}$ 脊形光波导从单模转变为多模）。

如所周知，实际制得的硅脊形光波导的脊宽不是常数，而是从上往下逐渐变宽的，如图 2 所示。这是因为化等腐蚀形成脊时硅晶体的结构使脊的二侧面是坡面，坡度是 54.7° 。由此可见，掩膜版上设计的脊宽值是实际脊宽的起始值。在对称 GeSi 光波导中，GeSi 层上面还有约 $3 \mu\text{m}$ 的 Si 覆盖层。这时若设计 $w = 8 \mu\text{m}$ ，则 $w + \Delta w > 12 \mu\text{m}$ ，制得的脊形光波导多模。据上述分析，脊宽 w 的优化起始值是 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 。

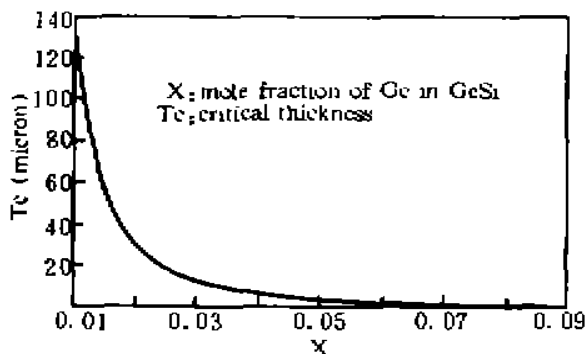


Fig. 1 T_c & x relationship

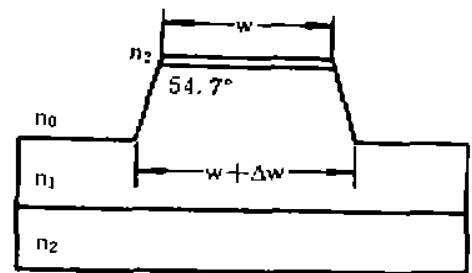


Fig. 2 Diagram of rib broadening

2.3 改善脊侧面、光波导端面的镜面水平

硅脊形光波导中的脊形是在平板波导上用各向异性腐蚀液刻蚀得到的，输入输出端面是研磨抛光得到的。刻蚀面及抛光面的镜面水平是光器件质量的关键之一。化等腐蚀面的平整度密切依赖化等腐蚀速度，降低腐蚀速度能改善平整度。为此，将刻脊腐蚀液改用腐蚀速度慢些的腐蚀液；抛光端面的工序在研磨、化等抛光后均加强镜检。化学抛光、镜检合格后，再进行水抛光。脊侧面及光波导端面的制备经上述改进后，肉眼就能觉察更加平亮了。经微观

检查则更显示其区别。

3 实验结果及讨论

图 3 是工艺优化前后 GeSi/Si 脊形光波导的干涉显微镜下显微照片(500 倍), 二道平行黑线间距离是脊宽, 平行黑线本身粗是腐蚀斜面, 平行黑线和下面的大黑区交接处是光的入射端面。很明显, 优化后由于改进了腐蚀及抛光技术, 入射端面及腐蚀区的提高了平整度。



Fig. 3 Microscopic photo of GeSi/Si waveguide
a) before optimization, (b) after optimization

本实验的光场及损耗等测量方法及条件均同文献[5, 7]。图 4 是优化前后脊形单模光波导的输出光场分布。优化后的光场峰值明显提高了。

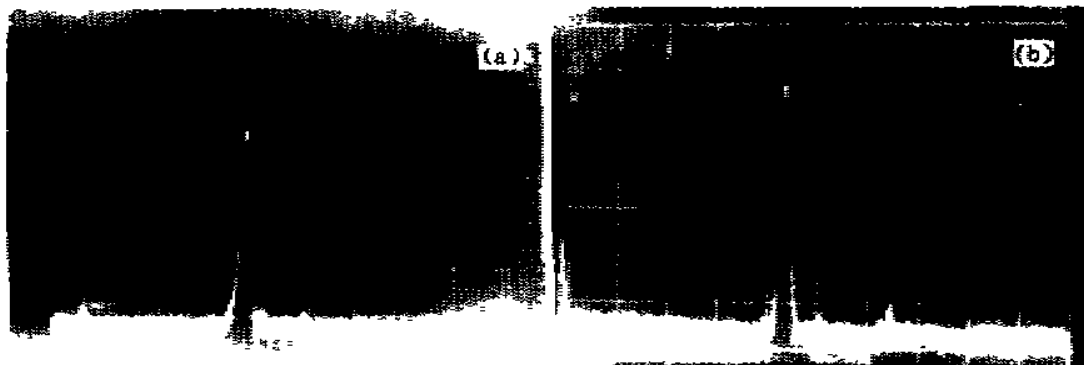


Fig. 4 Output field of GeSi/Si rib wave guide at 1.3 μm
a) before optimization, (b) after optimization

表 1 比较了工艺优化前后光波导性能的变化, 给出了优化前后插入损耗及传播损耗的测量值。无论是插入损耗的平均值或最佳值, 损耗值都减少了, 即性能改善了一分贝左右, 测量插入损耗的样品其长度都约 1 cm, 所以 1 dB 的改善量是耦合损耗及传播损耗共同减少的关系。当然也可能主要是耦合损耗减少的贡献。传播损耗中引人注意的是, 优化后的平均值及最佳值都比优化前有明显改善, 优化后平均值达 0.3 dB/cm, 比优化前改进了 0.3 dB/cm, 平均值也小于 1 dB/cm 的实用标准。这次工艺优化研究的结果也使成品率提高了, 一批结果出来, 不合格的光波导显著减少。表 1 给出了十多个样品的标准偏差。优化后的标准偏差 0.19 明显小于优化前的 0.27。

Table 1. Comparison of the losses before and after optimization

| | inserting loss (dB) | | propagation loss (dB/cm) | | |
|---------------------|---------------------|---------------|--------------------------|---------------|---------|
| | average value | optimal value | average value | optimal value | deviant |
| before optimization | 4.86 | 4.38 | 1.09 | 0.6 | 0.27 |
| after optimization | 3.87 | 3.25 | 0.72 | 0.3 | 0.19 |

从光波导的显微照片, 输出光场分布、插入损耗及传播损耗的测量值和成品率, 都说明本研究的 GeSi 光波导的工艺优化措施的综合效果很好, 它为硅光集成技术用于批量制备光波导提供了科学技术依据。

结 论 在 Si 衬底上外延生长 GeSi 层, 辐射加热化学汽相沉积法不是主流, 因它不宜制备超薄 GeSi 层。在硅光波导技术中, 它却获得成功, 其原因是 GeSi 合金光波导中, Ge 的含量很低(1~3%), 可生长数微米厚而不超过临界厚度。这恰好又满足 GeSi 光波导的大断面要求, 同时, 射频加热化学汽相沉积法生长速度快的优点又得以发挥。目前国内外的实验结果都已证实射频加热化学汽相沉积法是制备 GeSi/Si 光波导的优越方法。

本研究对 Si 衬底上 GeSi 合金光波导的制备工艺采取了一些优化措施。全面提高了光波导的性能, 例如输出单模光场峰值很高, 损耗值也已降到实用水平以内。尤其是, 光波导的成品率提高了。这些结果象征着在实验中制备 GeSi/Si 光波导的技术逐渐成熟。

参 考 文 献

- [1] 赵鸿麟, 全硅光集成技术的发展. 世界电子快讯, 1994, 9: 30
- [2] R. A. Soref, J. Schmidthen, K. Petermann, Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(8): 1971~1974
- [3] R. A. Soref, J. P. Loenzo, All-Si active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(6): 873~879
- [4] J. Schmidthen, A. Splett, B. Schuppert et al., Low loss singlemode optical waveguides with large cross-section in silicon-on-insulator. *Electron. Lett.*, 1991, 27(16): 1486~1488
- [5] 潘 姬, 赵鸿麟, 杨恩泽等, 硅 SIMOX 单模脊形光波导研制. 半导体学报, 1994, 15(2): 115~118
- [6] S. F. Peaarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer et al., Silicon germanium optical waveguides with 0.5 dB/cm losses for single mode fiber optical system. *Electron. Lett.*, 1992, 28(2): 159~160
- [7] 潘 姬, 赵鸿麟, 杨恩泽等, 硅衬底上锗硅合金光波导的研制. 光学学报, 1994, 14(6): 603~606
- [8] 潘 姬, 赵鸿麟, 杨恩泽等, 硅光波导的束传播法设计及制备. 光学学报, 1995, 15(3): 337~341
- [9] 罗江财, Ge_xSi_{1-x}/Si 应变层和超晶格及其临界厚度. 半导体光电, 1993, 14(1): 35~40

The Optimization of Processes for Si-Based GeSi Alloy Optical Waveguides

Zhao Honglin Pan Ji Feng Jian Huang Weizhi
(Department of Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(Received 6 March 1995; revised 27 April 1995)

Abstract The optimization for fabricating large cross-section Si/GeSi/Si single-mode rib waveguides with RF-heated CVD method is discussed. The optimal fraction x of Ge in GeSi layer defined by the necessity of single-mode, numerical aperture and critical thickness is between 1~3%. The height and width of rib must be also limited by the single-mode and large cross-section, The etched rib side walls are slope due to the Si crystal structure. The best initial width of rib is 5~6 μm . The etching and polishing solutions must ensure the rib side walls and end faces to be mirror. The measured results show that the performance of the optical waveguides improved remarkably. The output light field is increased and the propagation losses is less than 0.5 dB/cm.

Key words optical waveguide, CVD.