

硅 SIMOX 单模脊形光波导研制*

潘 姬 谭 雁 栗国星 赵鸿麟 杨恩泽

(天津大学电子工程系 天津 300072)

摘要 本文描述硅光波导技术的重大突破:(1)用 SIMOX 技术代替传统的硅外延型光波导,解决了衬底吸收光波,从而显著改善了光波导的传播损耗。(2)在理论及实验上均已解决调整脊形的高宽比(高宽均能达 10 微米左右),制取单模脊形光波导。这种光波导的下覆盖层是 SiO_2 , 传播损耗小;断面积大,和单模光纤耦合良好。满足了光集成技术中对光波导的几项重要要求。

EEACC: 4130, 4140

1 引言

全硅光集成技术自 80 年代中期间世以来,制备性能符合要求的硅光波导始终是一主题。初期的 $\lambda = 1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的硅光波导,是在低阻的硅单晶片上外延生长高阻硅单晶层形成的,称为硅外延型光波导^[1-3]。这种制备技术由于波导(外延层)的下覆盖层是硅衬底,它们之间的折射率相差很小(10^{-3}),衬底不能有效扼制光波穿入而损耗。经过数年努力,这种外延型硅光波导的传播损耗,最佳报道值为 $10 \sim 15 \text{dB/cm}$, 远大于光集成的实际要求。

SIMOX(Separation by IMplantated OXYgen) 硅光波导在硅表面下形成 SiO_2 埋层后再外延生长波导层,克服了硅外延型光波导的缺点^[4]。但出现新问题:如要制备单模平板波导,波导层厚度只能是 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$, 和单模光纤芯径严重失配。经过一段时间的探索,终于发现:如果制备脊形光波导,则可以通过调节脊形的高宽比制得大断面的单模脊形光波导。硅光集成技术迈出可贵的一步^[5]。

本文首先简单介绍脊形光波导几何参数和导模性质的理论关系,然后报告在 SIMOX 平板光波导上制备脊形单模光波导的工艺及测量结果。实验结果表明研制是成功的。

2 脊形单模光波导条件^[5]

图 1 是 SIMOX 脊形光波导结构图。 n_1 是外延法生长的波导层。采用掩蔽腐蚀生成的波导厚度及脊宽为方便标为 $2b\lambda$ 及 $2a\lambda$, λ 是真空中光波波长。波导层腐蚀后剩下的

* 国家自然科学基金资助项目。

本文 1992 年 7 月 7 日收到,修改稿 1992 年 9 月 5 日收到

厚度为脊的基底高, $2br\lambda$ 。这种 SIMOX 脊形光波导的下覆盖层是 SiO_2 , 上覆盖层是空气。

70 年代中期的脊形波导理论已说明有可能制备大断面单模脊形光波导^[6]。

脊形波导是三维的。光沿 Z 正方向传播时, 光场强度也是 X、Y 的函数。脊形波导中的导模用 HE_{nm} 或 EH_{nm} 表示, $n, m = 0, 1, 2, \dots$, 分别表示 x 和 Y 方向导模阶数。

限定 $r \geq 0.5$, 则波导中传播的光波, 垂直 x 方向只能是基模。例如 HE_{10} 或 EH_{10} 要在波导中传播。这种导模在 x 方向是一阶模, 有二个峰值。下一个波峰分布在基底平板波导内, 向二侧泄漏而无法传播。所以能在脊形波导中传播的只能是 HE_{0m} 或 EH_{0m} , $n = 0$ 。

Y 方向也能只传播单模。脊形光波导可以看成由三个平板波导组成, 中间一个厚度 $2b\lambda$ 和二侧二个厚 $2br\lambda$ 。在中间传播的光波, 其上部分要受二侧壁的约束, 其下部分和二侧平板波导中的导模相互作用, 共振或导模匹配的作用, 和厚度及折射率等结构参数有关。

理论分析表明, 在 $r \geq 0.5$ 的前提下, 结构参数满足一定条件时, Y 方向也只能导单模, $m = 0$ 。综合 x 方向及 Y 方向的单模条件, 脊形光波导传播单模光波的条件是

$$\frac{a}{b} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

此式表明制备高、宽均近似 10 微米的脊形单模光波导是可能的。

3 脊形光波导制备

本实验的目的是制备硅 SIMOX 单模脊形光波导。制备过程分二阶段: 第一阶段制备 SIMOX 平板波导, 由图2前四道工艺组成; 第二阶段是在平板波导上制备脊形波导, 由 5 至 7 三道工艺完成。各道工艺的主要参数如下。

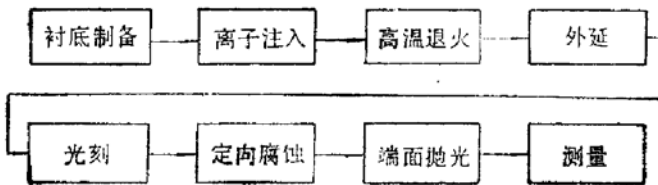


图 2 硅 SIMOX 脊形光波导制备工艺流程

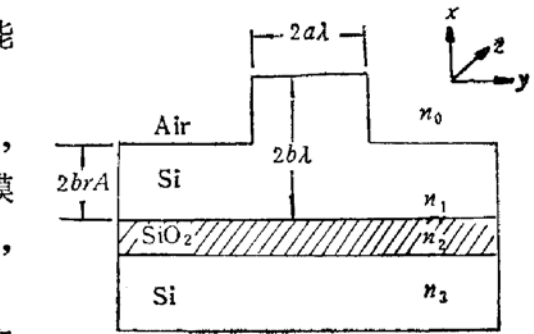


图 1 脊形波导结构

制备 SIMOX 平板波导, 由图2前四道工艺组成; 第二阶段是在平板波导上制备脊形波导, 由 5 至 7 三道工艺完成。各道工艺的主要参数如下。

衬底是n型硅单晶片, 晶向 $\langle 100 \rangle$ 。氧离子注入能量是 160 keV, 剂量为 $1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 。离子注入后的退火条件是

氮气保护下 1260°C , 24 小时。退火后硅表面下 $1600 \sim 1900 \text{ \AA}$ 处形成 $3000 \sim 3500 \text{ \AA}$ 的 SiO_2 层^[7]。 SiO_2 埋层形成后波导层的制作采用常规 SiCl_4 外延工艺。外延层电阻率 $100 \sim 150 \Omega\text{-cm}$, 厚度全部样品一致 $8 \sim 9 \mu\text{m}$ 。至此, SIMOX 平板波导制成。

平板波导上制作脊形波导主要是光刻及腐蚀工艺。掩膜版上条宽(脊宽)有 10、15、20、 $25 \mu\text{m}$ 。腐蚀是恒温下, 在 KOH、异丙醇、去离子水各向异性腐蚀液中进行的。腐蚀

深度或脊高用腐蚀时间控制,用干涉显微镜测量。

测量前的最后一道工序是波导的端面抛光,要在特制的模具上进行,抛光后经镜检光亮并无破缺方可进行测量。

4 光场及损耗测量

按不同脊高(腐蚀深度)、脊长(波导长度),我们制备了 30 多片样品,脊高的范围为 $0.92 \sim 5.61 \mu\text{m}$,脊长为 $2.14 \sim 4.33 \text{ mm}$,每一样片上有上述不同脊宽波导,同一脊宽有 $8 \sim 10$ 条。对端面无破缺的光波导,基本上进行逐片逐条测量其光场分布及损耗。

光场的显示是将 $1.3 \mu\text{m}$ 的激光及红光激光经定向耦合器送入单模光纤,通过红光导位,将 $1.3 \mu\text{m}$ 的光波端面耦合进脊形光波导。光波从光波导输出后经聚光棱镜射入红外摄影仪。在电视监视仪及示波器上同时看到光斑及光场的分布。

图 3(见图版 I)是一单模脊形光波导的照片。该样品的脊高 $2.1 \mu\text{m}$,脊宽 $10 \mu\text{m}$,脊长 4.3 mm 。光场分布是单峰,光斑是单一圆点。这二张照片图形不够锐陡,说明波导质量还能再提高。

当脊高变小,脊宽变大,据(1)式光波导会偏离单模条件。我们在实验中观察到了双模、三模等多模波导。图 4(见图版 I)是脊高 $0.92 \mu\text{m}$ 、脊宽 $20 \mu\text{m}$ 的四阶模图象。光场分布是 5 个峰值,光斑在一条约一厘米亮线上由五个小圆点组成。(右上方二个相隔 7 mm 的清晰亮点是屏幕损场所致)。这些结果表明,制备高宽约 $10 \mu\text{m}$ 的各阶导模光波导,其中包括单模脊形光波导,已经实际成功。

损耗的测量是将上述测量光场的光波从波导输出时再端面耦合进单模光纤并送入光功率计。光波导的传播损耗计算式为

$$L = - \frac{4.3}{z_1 - z_2} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ dB/cm.} \quad (2)$$

z_1 、 z_2 是波导长度, P_1 、 P_2 是相应输出功率。选取脊高相同但波导长度相差较大的二种样品组成一组,对每组样品中同一脊宽光波导进行多点测量得 P_1 及 P_2 平均值并代入(2)式计算。对多组样品进行上述测量后,得出这些脊形光波导样品的传播损耗值 $L = 2.43 \sim 6.83 \text{ dB/cm}$ 。这一结果比过去 Si 外延光波导传播损耗的国内外报道值已大幅度改善,并已接近实用值。

上述图象显示及损耗值的测量结果,均还不够理想,其原因可能是:(1)离子注入形成 SiO_2 埋层的均匀性不好。我们没有对埋层 SiO_2 作微观结构分析,但是从退火后观察表面的颜色,表明形成的 SiO_2 是不够均匀的。(2)由于端面是手工抛光,很难达到均匀一致,使得各条光波导的耦合损耗分散性大。我们测量计算传输损耗时将不同长度的光波导及其通光功率分别相减,理论上是将端面耦合损耗抵消掉了,实际上每个端面的耦合损耗都不一致,不能完全抵消,因而使得传输损耗也分散了。

结论: 已实际制成了硅 SIMOX 大断面单模脊形光波导,断面的高宽均近似 $10 \mu\text{m}$,能和单模光纤芯径匹配,光波导传播损耗最佳值约 3 dB/cm ,比硅外延光波导显著优越,硅 SIMOX 光波导的性能有望进一步提高。

致谢 本研究中光场分布,光斑显示测量是在清华大学光纤光波导器件实验室中进行的。对李德杰、吴伯瑜老师的热情帮助致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref and J. P. Lorenzo. IEEE J. Quantum Electronics, 1986, QE-22: 873.
- [2] 赵鸿麟,潘姬,杨恩泽. 信息光电子学术研讨会,厦门: 1990,33.
- [3] 刘恩科,张声良,韩金梅,刘育梁,李国正,光电子器件与集成技术年会论文集,北京: 1989,215.
- [4] B. L. Weiss, G. T. Reed, S. K. Toh *et al.*, IEEE Photonics Technology Lett., 1991, 3:19.
- [5] R. A. Soref, J. Schmidtchen and K. Petermann. IEEE J. Quantum Electronics, 1991,27:1971.
- [6] K. Petermann, Archiv fur Elektronik und Ubertragungstechnik 1976, 30: 139.
- [7] 陈南翔,苗伟,王忠烈,黄敏,半导体学报,1989,10: 620.

Study of Silicon SIMOX Single-Mode Rib Waveguide

Pan Ji, Tan Yan, Li Guoxing, Zhao Honglin and Yang Enze
(Department of Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract This paper presents the major breakthrough of manufacturing all-silicon waveguide technique: (1) Use the SIMOX technique instead of old epitaxy waveguide to avoid the light absorption of the substrate to improve and the propagation loss. (2) From the theory and experiment, it is possible to prepare the single-mode rib waveguide through adjusting the ratio of width and height and their dimensions can be about 10 microns. The down cladding layer of such waveguide is silicon dioxide, and the propagation loss is much smaller. Besides, it is easy to match with singlemode fibre due to large cross section. It satisfies several requirements for a good optical waveguide in optical integration.

EEACC: 4130, 4140