

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0230-03

低损耗 SOI 单模脊形光波导的制备

林志浪, 程新利, 王永进, 张峰

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所离子束实验室, 上海 200050)

摘要 表面散射损耗与非涅耳反射损耗是 SOI(Silicon-on-insulator)脊形光波导的主要损耗机理。通过降低光波导损耗的研究, 在厚膜 SOI 材料上制备了长度为 20 mm, 插入损耗小于 2.15 dB 的单模脊形光波导。

关键词 集成光学; 脊形光波导; 波导损耗

中图分类号 TN252

文献标识码 A

Fabrication of Low Loss Single-Mode Rib Waveguides in Silicon-on-Insulator

LIN Zhi-lang, CHENG Xin-li, WANG Yong-jin, ZHANG Feng

(Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract Theoretical analyses and experiments have been implemented to minimize surfaces induced scattering loss and Fresnel reflection loss which dominate the losses in silicon-on-insulator rib waveguides. 20 mm long single-mode rib waveguides samples with the fiber-chip-fiber insertion losses below 2.15 dB have been fabricated in thick-film silicon-on-insulator.

Key words integrated optics; rib waveguides; waveguides losses

1 引言

随着光纤通信的迅猛发展, 将硅从微电子学领域拓展到光电子学领域, 开展硅基光电子集成技术的研究已经成为重要的发展趋势, 而同时具备光子学和电子学优异性能的 SOI(Silicon-on-insulator)材料为其提供了充裕的发展空间^[1]。为了提高波导与单模光纤的耦合效率, 实现大截面尺寸波导的单模传输, SOI 光波导通常采用脊形波导结构^[2,3], 如图 1 所示。因此, SOI 单模脊形光波导已经成为硅基光电子集成技术中最重要的器件结构之一, 是其他有源和无源集成波导器件的基础^[1,3]。SOI 单模脊形光

波导的波导损耗将直接影响 SOI 光波导器件的性能指标与实用化进程。本文对低损耗 SOI 单模脊形光波导的制备进行了研究。

2 SOI 单模脊形光波导的制备

制备 SOI 脊形光波导首先要考虑光波导的单模传输条件, 可以通过选择适当的脊宽 W 、内脊高 H 和外脊高 h 来实现大截面脊形光波导单模传输特性^[2]。在表层硅厚度约为 $8.6 \mu\text{m}$, 二氧化硅埋层厚度为 $0.37 \mu\text{m}$ 的厚膜 SOI 圆片上进行氧化光刻, 光掩模版上的条宽(脊宽)取 $6.0 \mu\text{m}$, 波导长度取 20.0mm 。以 SF_6/N_2 作为混合刻蚀气体对表层硅进行反应离子刻蚀, 刻蚀深度为 $2.0 \mu\text{m}$, 获得了边缘近似垂直的脊形波导结构。利用切片机将厚膜 SOI 圆片切割成 $20 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ 的小切片, 然后对波导的两个端面进行化学机械抛光, 制备了如图 2 所示的只能承载单模且波导结构尺寸和单模光纤芯径尺寸相匹配的大截面 SOI 脊形光波导。

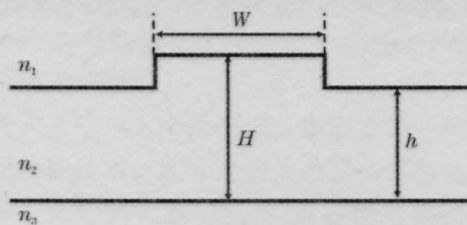


图 1 脊形光波导的示意图

Fig.1 Schematic of a rib waveguide

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2001AA312070)资助课题。

作者简介: 林志浪(1975-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士研究生, 主要从事硅基材料及其光电子器件的研究。E-mail: power_lzl@yahoo.com.cn

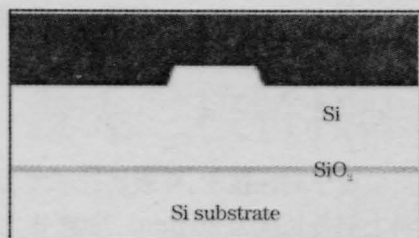


图2 大截面 SOI 单模脊形光波导

Fig.2 SOI single-mode rib waveguide with large cross-section

3 降低 SOI 单模脊形光波导的波导损耗

3.1 光波导的损耗机理分析

光波导的波导损耗包括传输损耗和耦合损耗两部分。光波导传输损耗的产生是由于光子在波导结构传播过程中被吸收及散射。对于 SOI 脊形光波导而言,导波层硅材料在光通信波长范围内对光子的吸收是可以忽略不计的^[1];体散射损耗也可以通过优化材料制备工艺,改善厚膜 SOI 材料质量实现消减^[3,4];而理论研究^[5]表明波导表面散射损耗正比于 $E^2(n_2^2 - n_1^2)$,由于 SOI 光波导的波导层和包层的折射率相差很大,因此波导表面的散射对光波导性能影响较大。

光波导耦合损耗是指传输光场耦合出入光波导的模式失配损耗和非涅耳反射损耗。模式失配损耗是传输光场的能量在光纤与光波导之间转移时,由于波导内的模式场分布和光纤中的模式场分布的不一致性导致的能量损耗。因为制备的 SOI 光波导的波导几何结构尺寸与单模光纤芯径尺寸相匹配,所以波导与单模光纤的模式失配损耗非常小。而非涅耳反射损耗是由于光在波导耦合端面反射引起的能量损耗。对于 SOI 光波导而言,如果传输光场直接从空气耦合出入波导,则非涅耳反射损耗高达 3.22 dB^[6]。

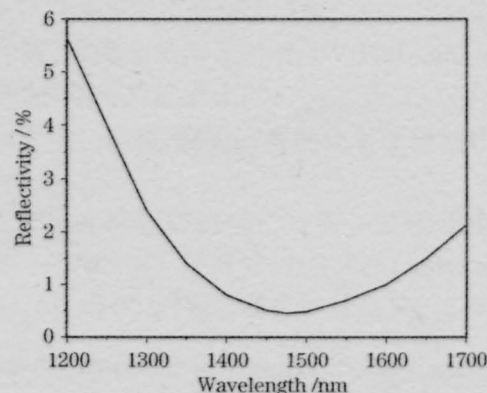
由此可见,波导表面散射损耗和非涅耳反射损耗是制备的 SOI 单模脊形光波导最主要的损耗机理,是降低光波导损耗的关键。

3.2 降低光波导的表面散射损耗与非涅耳反射损耗

研究表明^[6]光波导的表面散射损耗与 A^2 成正比, A 为光波导表面的均方根粗糙度值 (R_{rms} , root-mean-square roughness)。因此,改善波导表面状况,减小表面粗糙度以获得平滑的波导表面是降低光波导的表面散射损耗的有效途径。将清洗好的 SOI 单模脊形光波导置于桶式外延炉内,抽真空至 1.0×10^{-4} Pa。通入高纯氢气,并且气体保持稳定

的微弱流动状态,流量控制为 40 mL/min。采用 HCl 气体在 1150 °C 刻蚀衬底 0.5~1.0 min,以去除波导表面的自然氧化层。在 1150 °C 的氢气气氛中,高温烘烤光波导 20 min,以改善波导表面状况。利用原子力显微镜 (AFM) 表征氢气高温烘烤后的 SOI 光波导表面,扫描范围为 $5.0 \mu\text{m} \times 5.0 \mu\text{m}$,计算获得的波导表面均方根粗糙度值 R_{rms} 仅为 0.78 nm,表明氢气高温烘烤后的光波导表面非常平滑。而原 SOI 脊形光波导的表面粗糙程度是由脊形波导刻蚀工艺决定的,通常反应离子刻蚀工艺获得的脊形波导侧壁的均方根粗糙度值 R_{rms} 约为 20 nm^[6]。由此可见,通过氢气气氛中的高温烘烤,SOI 单模脊形光波导的表面状况得到明显的改善,从而显著抑止了光在波导结构中传输时的表面散射损耗。

降低光波导的非涅耳反射损耗的关键是实现具有极低反射率的波导端面。为了降低 SOI 光波导的端面反射率,通常采用 Si_3N_4 增透膜技术来实现波导端面增透。采用半导体标准清洗工艺,对经过氢气高温烘烤而且波导端面经镜检光亮无破缺的 SOI 脊型光波导进行清洗。利用离子束辅助沉积技术 (IBAD),在光波导的两个端面都均匀沉积一层 Si_3N_4 增透膜,沉积速率为 0.5 nm/s,镀膜厚度为 187 nm,材料折射率为 1.98。图 3 给出了涂敷了均匀 Si_3N_4 增透膜的光波导端面的端面反射率 R 与波长 λ 的关系曲线,从图中可以发现:采用 Si_3N_4 增透膜,不仅增透的波长范围较宽,端面反射率 R 小于 1% 的波长增透范围达 220 nm;而且当波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,在光波导端面可以实现仅 0.8% 的端面反射率。端面镀上厚度为 187 nm Si_3N_4 膜 (折射率为 1.98) 的 SOI 脊形光波导在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,非涅耳反射损耗将显著降低为 0.07 dB。

图3 端面反射率 R 与波长 λ 的关系曲线Fig.3 Facet reflectivity (R) vs. wavelength (λ)

4 低损耗 SOI 单模脊形光波导的测试

对经过氢气高温烘烤而且波导端面镀上均匀 Si_3N_4 增透膜的 SOI 单模脊形光波导,逐条地进行输出光场和波导损耗的测试。输出光场的显示是将 $1.55\ \mu\text{m}$ 的激光通过与波导端面精密对准的单模光纤端面直接耦合进光波导,光波从光波导输出后经过透镜放大整形后射入红外 CCD 探头,由监视器得到输出光场。通过 CCD 的线扫描可以得到光场的强度轮廓。图 4 所示的是 SOI 单模脊形光波导的输出光场,可以看出制备的光波导具有良好的传输性能,能够很好地与单模光纤耦合,而且对波导结构内的光场具有强限制作用。



图 4 SOI 单模脊形光波导的近场输出

Fig.4 Output near field image of the SOI single-mode rib waveguide

将上述测量光场的光波从 SOI 脊形光波导输出时,再端面耦合进与波导端面精密对准的单模光纤并输入光功率计,便可以进行光波导的插入损耗

的测试。对于波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光波,测得光波导的插入损耗小于 $2.15\ \text{dB}$ 。

5 结 论

利用反应离子刻蚀技术,在表层硅厚度为 $8.6\ \mu\text{m}$ 的 SOI 材料上制备长度为 $20\ \text{mm}$, 脊宽 W 为 $6.0\ \mu\text{m}$ 的单模脊形光波导。通过 $1150\ ^\circ\text{C}$ 的氢气气氛中的高温烘烤,明显改善光波导的波导表面状况,实现波导表面散射损耗的显著降低。利用离子束辅助沉积技术,在波导端面镀上厚度为 $187\ \text{nm}$, 折射率为 1.98 的均匀 Si_3N_4 增透膜,将 SOI 光波导 $3.22\ \text{dB}$ 的非涅耳反射损耗降低为 $0.07\ \text{dB}$ 。成功制备了插入损耗小于 $2.15\ \text{dB}$ 的低损耗 SOI 单模脊形光波导。

参 考 文 献

- 1 B. Jalali, S. Yegnanarayanan, T. Yoon *et al.*. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, **4**(6):938-947
- 2 S. P. Pogossian, L. Vescan, A. Vonsovici. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10): 1851-1853
- 3 A. G. Rickman, G. T. Reed, F. Namavar. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**: 1771-1776
- 4 J. P. Colinge, R. W. Bower. Silicon-on-insulator technology [J]. *MRS Bull.*, 1998, **23**(12): 13-15
- 5 D. Marcuse. *Light Transmission Optics* [M]. 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, 1982. 380-396
- 6 P. K. Tien. Light waves in thin films and integrated optics [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**: 2395-2413