

硅键合 SOI 平面光波导探索*

李金华^a 林成鲁^b G. T. Reed^c A. G. Rickman^c P. L. F. Hemment^c

a, 江苏石油化工学院 物理教研室, 常州 213016
b, 中国科学院上海冶金研究所离子束开放实验室, 上海 200050
c, Dept. Electronic and Electrical Engineering, University of Surrey, Guildford,
Surrey GU2 5XH, England

摘 要 本文分析了 SIMOX/SOI 和 DWB/SOI 结构的性能特点. 尝试用 DWB/SOI 材料制备不同波导层厚度的平面光波导样品, 并测试了 1.15 μm 和 1.523 μm 激光的 TE 和 TM 模的传输损耗. 1.523 μm 光的 TE 模的最小传输损耗已达 0.27 dB/cm. 说明 DWB/SOI 材料是一种有潜力的光波导材料.

关键词 光波导, 硅直接键合, SOI 材料.

1 引 言

目前,制造光波导器件的主要材料是 GaAs、LiNbO₃ 等化合物材料. 如果单晶硅能形成光波导结构且具有低的传输损耗,那么,由于硅材料在集成电路方面的成熟应用,其工艺及材料的稳定性、兼容性和材料的低价格、大尺寸等优点,无疑将使集成光学器件有长足发展.

SOI(Silicon On Insulator)材料的出现,使 Si 的光波导结构产生了希望. 有前途的 SOI 材料有二种. 一种是离子束合成 SOI 材料,特别是 SIMOX(Separation by IMplanted OXYgen). 另一种是硅直接键合(DWB-Direct Wafer Bonding)SOI 材料. 要制备低损耗的光波导,需要对表层 Si 外延. 常压外延由于高温 H₂ 对埋层 SiO₂ 的分解,会使表层 Si 的缺陷增加,甚至造成 SOI 结构的损坏^[1,2]. 所以,国外目前采用化学气相沉积(CVD)外延方法,但价格昂贵.

相比而言,DWB/SOI 材料是将高平整度的器件级单晶硅片,经可靠的键合处理,在超净线上制备. 然后经减薄、抛光得到实用的 SOI 材料. DWB/SOI 结构的表层 Si 是经减薄的器件级单晶,缺陷密度低,埋层 SiO₂ 是键合前热生长形成,内在和界面都有很高的质量. 所以,该材料应有较大的吸引力. 关键是获得均匀的、厚度合适的顶层 Si.

1988 年以来,英国、美国、西德的研究人员先后用经 CVD 外延的 SIMOX 材料研制了二维平面波导^[3],三维耦合波导^[4]和脊形单模波导^[5]. 去年,作者在英国 Surrey 大学首先用自己制备的 DWB/SOI 材料,试制了 Si 平面光波导样品,测试了它的传输特性. 本文将就此作简要介绍.

收稿日期:1993年3月1日;收到修改稿日期:1993年4月12日

* 本课题得到传感技术国家实验室资助.

2 SOI 结构的获得和材料性能

待键合的 N (100) 3" Si 片, 先作平整度检测, 再在其表面生长 0.2 μm 厚的 SiO_2 , 对它们作表面处理后, 面对面地放置在专用石英舟上, 在 1200 $^\circ\text{C}$ 的 $\text{H}_2 + \text{O}_2$ 中作 2 hr 的键合处理. 键合后的片子在红外图像仪上作键合质量检测. 再对键合对的一边作机械减薄, 使 SiO_2 上的单晶 Si 厚度保留约 30 μm , 最后用机械抛光获得实验样品的 SOI 结构.

作者对可能影响光的传输损失的材料性能作了检测.

用扫描电子显微镜 (SEM) 检测了沿园片径向切割的六块样品的表层 Si 和埋层 SiO_2 厚度, 观察了 Si- SiO_2 界面的平整度. 由于本实验中未对提高样品表层 Si 均匀性采取重点措施, 该园片表层 Si 的厚度沿径向有较大差别 (见表 1), 但埋层 SiO_2 的厚度均匀 (约 0.4 μm), 界面平直. 图 1 是样品 6 的 SOI 结构的 SEM 照片.

表层 Si 的电阻率用多量程四探针测得, 约为 11 Ωcm . 对应的 N 型载流子浓度约 $4.5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$. 可以认为, 这种浓度的材料对光的吸收接近本征硅的吸收.

材料的缺陷密度用计算经 Secco 法^[6]腐蚀后的腐蚀坑得到. 样品园片不同区域的缺陷密度为 $5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 / \text{cm}^2$.

用卢瑟福背散射和沟道 (RBS/C) 分析测量了表层硅的晶体质量. 在较厚表层 Si 区域和 Si- SiO_2 的界面附近, 顶层单晶的退道 X 分别为 4.3 % 和 4.7 %. 该结果表明, 经高温键合和机械减薄后的 DWB/SOI 结构, 其晶格完整性仍较理想.

3 光波导样品制备和传输损耗测量

沿 3" DWB/SOI 园片的径向, 依次分割下六块 $8 \times 10 \text{ mm}^2$ 的样品, 并将较长的对边侧面抛光成镜面, 要求这二侧面平行且都与表面垂直. 这样, 由于埋层 SiO_2 的折射率 (1.46) 比表层 Si 的折射率 (3.43) 低得多, 从一个抛光端面入射的光就在 Si- SiO_2 , Si-表面空气 ($n=1$) 上下二界面全反射, 而从另一端面出射. 由于 DWB/SOI 样品园片的厚度不均匀, 就得到了六个波导层厚度不同的平面光波导样品 (见表 1).

所有样品都分别用波长为 1.15 μm 的 He-Ne 激光和波长为 1.523 μm 的 InGaAsP 激光作了 TE 模和 TM 模的传输特性测量.

样品装在能作 x-y 方向调节的平台上. 入射激光通过 40 倍物镜聚焦于波导样品的入射端面. 波导束经聚焦于出射端面的另一 40 倍物镜收集, 再经束分裂薄膜把光强的 65% 送到红外摄像镜头, 其余的输入 Ge 光电探测器. 这二组讯号分别经视频分析器 (video analyser) 和锁定放大器 (lock-in amplifier) 处理后经 x-y 函数记录仪输出. 为了确保光线的正入射和使镜头准确地聚焦在波导样品的端面, 二个物镜能作 x、y、z 方向的平动和 θ 角 (水平面内) 的转动.

光波导样品的传输损耗 L_r 由下式确定:

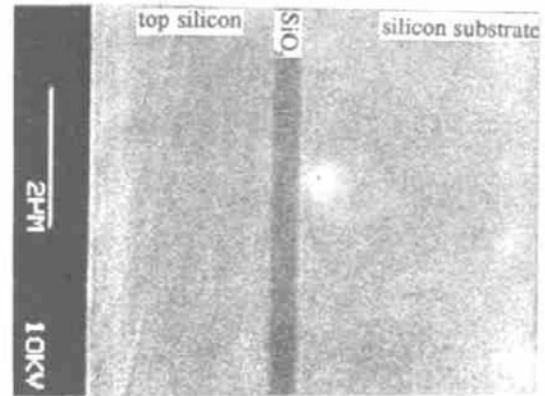


Fig. 1 SEM micrograph of DWB/SOI structure

$$L_p \text{ (dB/cm)} = \frac{L_i - L_f - L_m \text{ (dB)}}{l \text{ (cm)}}$$

式中 l 为波导层长度, L_m 为失配损耗, 由入射束和波导传输束的模式失配引起. 在多模情况下, 它的计算很复杂但值很小. 为简单起见, 假定它为零(文献[7]中作过计算, 在表层 Si 厚度超过 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 波导束为多模). L_f 为菲涅耳反射损耗. 它由空气和半导体的界面性质决定. 光正入射时, 每个界面的反射损耗 $L_f = 10 \log [1/(1-R)]$. 此处 $R = [(n-1)/(n+1)]^2$, n 为 Si 的相对折射率. L_i 为插入损耗. 它的大小由波导材料的吸收, 波导结构上下二界面对光的散射和耦合等损耗决定. 测试时, 它的值为 $L_i = 10 \log (P_i/P_0)$. 式中 P_i 和 P_0 分别为无样品时和光经波导层出射后光电探测器的讯号辐度. 由于假定失配损耗为零, 所以, 得到的波导传输损耗可能比实际值略有增加. 表 1 中列出了六个样品的标称厚度和传输损耗.

Table 1. Waveguide propagation losses

Sample No.	Si overlayer thickness (μm)	buried SiO ₂ thickness (μm)	Waveguide propagation losses (dB/cm)			
			$\lambda = 1.15 \mu\text{m}$		$\lambda = 1.523 \mu\text{m}$	
			TE	TM	TE	TM
1	10.3	0.4	6.22	5.15	1.14	1.74
2	10.1	0.4	5.61	5.03	0.82	2.11
3	7.1	0.4	5.75	4.90	0.27	2.86
4	4.5	0.4	6.11	4.78	3.53	3.19
5	3.3	0.4	6.82	6.61	3.72	4.25
6	2.7	0.4	8.20	7.43	5.54	5.30

All loss measurements are subject to an uncertainty of $\pm 0.5 \text{ dB/cm}$.

4 讨 论

与 SIMOX/SOI 材料相比, DWB/SOI 材料的位错密度低、单晶质量好、埋层均匀、界面平整, 应当得到小的传输损耗. 但是, 由于传输损耗较多地依赖于波导层的厚度, 而在键合后机械减薄的情况下, 厚度的不均匀性正是其不足之处. 该实验样品制备时, 并未对提高表层硅厚度均匀性采取重点措施, 所以表 1 中样品的均匀性较差. 每只样品的纵向和横向二端的厚度差都有 $1 \mu\text{m}$ 以上. 因此给实验结果的详细分析带来了困难. 从上述的研究, 可以清楚地看到:

1) 对 $\lambda = 1.523 \mu\text{m}$ 的光, 3 号样品的 TE 模的传输损耗已达 0.27 dB/cm . 该值已接近单晶硅的本征吸收. 但考虑到测试中 $\pm 0.5 \text{ dB/cm}$ 的不确定度和实验结果的离散度较大, 还应该作进一步的实验来证实. 不过, 即使对 $< 1 \text{ dB/cm}$ 的传输损耗, 其界面散射、界面耦合、缺陷吸收及载流子散射等损耗都已很小, 说明 DWB/SOI 材料可以被用来研制实用的光波导器件, 显示了这种材料的应用潜力.

2) 波长为 $1.15 \mu\text{m}$ 光的传输损耗明显地高于波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 光的传输损耗. 这是由于 $1.15 \mu\text{m}$ 光波的光子能量非常接近于 Si 的能带边缘, Si 对它有较大的吸收.

3) 波导层的厚度过厚或过薄都会使传输损耗增大. 似乎对 $6 \sim 10 \mu\text{m}$ 的波导层厚度, 其

传输损失较小. 但这样的厚度难以获得有实用意义的平面单模波导, 而对能获得单模的平面波导(厚度约 $0.2 \mu\text{m}$). 其传输损耗又高得无实用价值, 所以较好的选择是用这种厚度的 SOI 结构制成脊形波导, 既能降低损耗又能获得单模.

结 论 DWB/SOI 材料是一种很有前途的光波导材料. 它能被成功应用的关键是如何提高波导层厚度的均匀性.

参 考 文 献

- [1] D. Schmidt, J. Schneider, Methods of epitaxial growth and the effects of High-temperature hydrogen anneals on SIMOX material. *Proc. 10th. Internat. Conf. on Chemical Vapor Deposition*, Honolulu, HI USA 1987, 224~232
- [2] Li Jinhua, Lin Chenglu, Lin Zixin *et al.*, Stability of SIMOX and SIMNI structures at high temperature in hydrogen. *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res.*, 1991, **B59/60**: 685~689
- [3] B. L. Weiss, G. T. Reed, S. K. Toh *et al.*, Optical waveguides in SIMOX structures. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, **3**(1): 19~21
- [4] R. A. Soref, E. Cortesi, F. Namavar *et al.*, Vertically integrated silicon-on-insulator waveguides. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, **3**(1): 22~24
- [5] J. Schmidtchen, A. Splett, B. Schüppert *et al.*, Low loss singlemode optical waveguides with large cross-section in silicon-on-insulator. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(16): 1486~1487
- [6] F. Secco d' Aragona, Dislocation etch for $\langle 100 \rangle$ planes in silicon, *J. Electrochem.*, 1972, **119**: 458~461
- [7] R. G. Hunsperger, *Integrated Optics; Theory and Technology*. 3rd edition, Springer, Berlin, 1991, 15~19

Investigation of Planar Optical Waveguides with DWB/SOI Structure

Li Jinhua^a Lin Chenglu^b G. T. Reed^c
A. G. Rickman^c P. L. F. Hemment^c

^a, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016

^b, Ion Beam Lab., Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050

^c, Dept. Electronic and Electrical Engineering, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 5XH, England

(Received 1 March 1993; revised 12 April 1993)

Abstract The structure characteristics of SIMOX/SOI (Separation by implanted oxygen/ silicon on insulator) and DWB (direct wafer bonding)/SOI are discussed. Some planar optical waveguides samples with different thickness of layer were fabricated in DWB/SOI structure. The propagation losses were measured for both TE and TM modes at wavelenths of $1.15 \mu\text{m}$ and $1.523 \mu\text{m}$. The lowest loss is close to the intrinsic absorption of pure crystal silicon. It indicates that the DWB/SOI structure is a potential material for optical waveguides.

Key words optical waveguides, direct wafer bonding, silicon on insulator.