

# 硅基光导波结构的特性研究\*

祖继锋<sup>1</sup> 马忠礼<sup>1</sup> 余宽豪<sup>2</sup> 陈学良<sup>2</sup> 耿完楨<sup>3</sup>

- 1, 辽宁师范大学物理系, 大连 116029  
2, 中国科学院上海冶金研究所微电子学分部, 上海 200233  
3, 哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001

**摘 要** 研究了在硅基底上采用等离子增强化学汽相淀积(PECVD)氮氧化硅(SiON)所形成的包括通道波导、条波导、倒脊型波导等多种结构的特性。通过对测试结果进一步分析,总结出有关结论并提出一些改进方法。

**关键词** 光波导, 硅基底, 氮氧化硅, 集成光学, 光电子集成。

## 1 引 言

硅基集成光学引起人们关注的重要原因之一是它潜在地可实现与电子器件的单片集成,以及在硅上制作的波导与光纤具有很好的模式匹配特性。特别是在提出超大规模集成电路系统引入光互连技术以后<sup>[1]</sup>,考虑如果能在硅基芯片内引入光电子技术,用光波代替电子传递信息,发挥光波天然的并行传播和互不串扰等特点,不但能大大提高信息处理的能力,也无疑会推动当代超高速电子计算机进一步发展,对促进光计算机,光学信息处理、光通讯系统等领域的发展也具有极大的推动作用。

目前在硅基底上制作光波导已有多种技术:由注入或外延方法形成的全硅光波导<sup>[2, 3]</sup>,目前 SOS(silicon-on-sapphire)和 SOI(silicon-on-insulator)波导结构的损耗已降至 1 dB/cm 以下(传输光波长大于 1.15  $\mu\text{m}$ )。进入 90 年代以来人们开始对 GeSi 合金材料制作光波导的性能进行研究<sup>[4]</sup>,采用化学汽相淀积在本征 (100)硅基底上形成  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层,多模平面波导光传输损耗已降至 1.9 dB/cm(TM 模,  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ )。此外还有分子束外延等技术用于这方面研究。通过淀积方法制作的玻璃波导,例如磷硅波导、硼磷硅波导,淀积时需要使用有毒气体<sup>[5]</sup>。由火焰水解法制作的高硅波导<sup>[6]</sup>,虽然损耗较低,但高温淀积过程很难再与微电子线路制作在一起。

而 SiON 是近年来较多用于制作光波导器件的材料。获得 SiON 的方法之一是二氧化硅的热氮化处理,虽然形成波导的损耗较低,但处理温度很高<sup>[7]</sup>。方法之二是采用射频反应溅射<sup>[8]</sup>。方法之三是低温等离子增强化学汽相淀积,在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  上制作光波导<sup>[9, 10]</sup>。此外还有低

\* 辽宁省科委博士基金和国家科委 863 高科技项目资助课题。

收稿日期:1997-02-08; 收到修改稿日期:1997-07-02

压化学汽相淀积(LPCVD)等方法。从已获得的研究结果来看, 等离子增强化学汽相淀积特别是低温等离子体淀积是一种很好的技术手段, 主要因为其工艺制作过程同互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容。现已研究并制作了集成光学方向耦合器、H-树光学时钟分布网络、传感器、双折射控制、弯曲、交叉波导等结构<sup>[11~14]</sup>。

等离子增强化学汽相淀积制作 SiON 可选用不同的混合气体及工艺控制条件。本文工作是在以前的工艺<sup>[14]</sup>基础上, 研究了硅基 SiON 光波导结构的传输特性。

## 2 导波结构的制作

在工艺制作过程中, 首先选取 P 型 (100)取向、电阻率为  $6\sim 10\ \Omega\cdot\text{cm}$  的  $5.1\ \text{cm}$  硅片。经过常规清洗后, 在  $1100^\circ\text{C}$  高温下对硅片进行热氧化, 氧化时间为 6 小时、8 小时两种, 氧化层厚度分别为  $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}$ 。这主要基于考虑不同厚度的二氧化硅层对光导波结构的影响。下面将给出倒脊型光波导(同脊型光波导的方向相反, 如图 1 所示)的制作过程: 选取氧化硅厚度为  $2\ \mu\text{m}$  的硅片, 用设计好的掩模版进行光刻, 并控制刻蚀深度(本文为  $0.2$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$  两种沟槽深度), 然后采用等离子增强化学汽相淀积在刻蚀沟槽上覆盖几种厚度的 SiON 薄膜, 形成倒脊型波导结构。此外通过使用不同的掩模版, 以相同的工艺条件, 分别制作条波导、通道波导以及平面波导等结构。

由于硅基无源集成光学器件制作同硅电子器件的工艺相容性, 为此作者设计一个简单结构, 目的是探讨硅基导波结构同光探测器或接收电路过渡连接工艺控制及将来有关结构设计问题, 并对应用时存在的问题给出解决方法。具体采用的工艺过程如下:

首选在 SiO<sub>2</sub>/Si 硅片上光刻出 PIN 区, 然后对 PIN 本征区带胶注磷(考虑磷的扩散系数大, 注入后再经过退火比较容易满足  $5\ \mu\text{m}$  设计宽度, 有关数据是通过 Supemii 模拟后所选择的工艺条件, 磷的剂量为  $5\times 10^{12}/\text{cm}^2$ , 能量  $150\ \text{keV}$ ), 去胶后退火补偿( $900^\circ\text{C}$ , 氮气, 30 分钟后升温至  $1200^\circ\text{C}$ , 5 小时), 以便达到与 P 型硅衬底完全补偿的目的。接着在 SiO<sub>2</sub> 上淀积 SiON 薄膜并光刻、刻蚀形成波导, 最后在 PIN 区部分光刻电极接触区, 并带胶注砷(剂量为  $5\times 10^{15}/\text{cm}^2$ ,  $100\ \text{keV}$ ), 去胶后退火补偿, 漂洗窗口后( $\text{HF}\cdot\text{H}_2\text{O}=1:40$ , 40 s)溅射铝-硅合金、光刻引线、合金化。

## 3 实验结果及分析

采用棱镜耦合及光纤端面耦合两种测试方法, 测量了波导结构的传输损耗, 并给出了其中部分结构的扫描电镜照片, 用来观察实际所形成的结构。将从以下几个方面给出实验结果并进行分析。

1) 研究了二氧化硅的厚度对平面波导结构传输损耗的影响。在  $850^\circ\text{C}$  下对 SiON 薄膜退火, 时间为 2 小时。采用棱镜耦合测试方法, 测量用光波波长  $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ , 并对多次测量结果取平均值。得到结果为:  $1.5\ \mu\text{m}$  厚 SiO<sub>2</sub> 上的单模传输平面波导(TE)的损耗值为  $1.8\ \text{dB}/\text{cm}$ , 而  $2.0\ \mu\text{m}$  厚 SiO<sub>2</sub> 上的波导损耗为  $1.1\ \text{dB}/\text{cm}$ , 可以看出氧化层较薄时, 相应波导损耗大, 这是由于光波泄漏至硅基底较大的缘故。

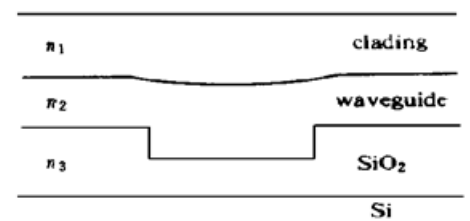


Fig. 1 Diagram of inverted ridge waveguide

2) 采用光纤端面对接耦合方法测量了通道波导、条波导、倒脊形波导等结构的传输损耗。

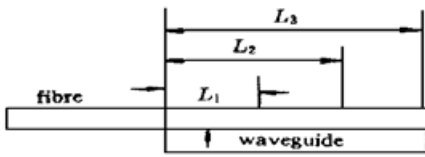


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

在实验中采用相同的工艺制作过程,对每一种导波结构都制作了多份相同的样品,利用微电子技术中的划片工艺,把同一种结构的每份样品,切割成不同长度,用于导波结构传输损耗的测试。实验原理如图 2 所示。下面给出的测试结果为多次测量结果的平均值。

对于波导尺寸为  $8 \times 2 \mu\text{m}$  的条波导,损耗为  $3 \text{ dB/cm}$ ,加硼磷硅玻璃(BPSG)覆盖层并进行回流以后,损耗降至  $2 \text{ dB/cm}$  以下。对于脊深为  $0.25 \mu\text{m}$ 、宽为  $6 \mu\text{m}$  的倒脊形波导,损耗值在  $1.5 \text{ dB/cm}$  以下。图 3 给出了在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  上面刻蚀的沟槽结构端面扫描电镜照片。可以看出沟槽比较光滑,这是采用湿法刻蚀的,用等离子体或反应离子刻蚀(RIE)等刻蚀手段,可得到更为理想的沟槽剖面轮廓。

考虑对部分硅片上的  $\text{SiON}$  薄膜退火,条件为  $850^\circ\text{C}$ 、 $\text{N}_2$  氛围、30 分钟。结果在显微镜下观察到薄膜出现裂纹。作者认为裂纹产生是由于在薄膜与基底之间热扩散感应的热力差造成的。与此同时也发现对于折射率小的  $\text{SiON}$  薄膜,裂纹密度随氧原子数增加而减少,这说明薄膜中氧原子数的增加可以起到降低热扩散差及减小薄膜中的本征应力的作用。此外通过高温退火能明显减少波导的损耗,但是当退火温度超过  $1000^\circ\text{C}$  时,因材料中的部分组分出现再结晶,导致了散射损耗增加。所以作者认为退火温度应控制在  $800^\circ\text{C}$  左右为宜。当然也应当考虑选择其它的退火方式,如材料局部采用激光退火,对于硅基光电子导波器件性能的提高也将是一种比较有用的技术手段之一。

从上面给出的实验结果,发现通道波导、条波导等结构的损耗值较大,下面将给出分析结果。一般把波导损耗来源分为三个部分:材料吸收、漏波和散射损耗。其中材料吸收损耗可通过选择材料组分和高温退火移去某些吸收峰来减小。其它两部分损耗来源可通过选择不同波导结构和改进工艺制作过程来降低。由于常规热氧化工艺难以在较短时间内得到厚度超过  $2 \mu\text{m}$  的氧化层。如果氧化层很薄,传输的光波将部分泄漏至硅基底,结果导致增加波导损耗。因此为了减少漏波损耗,有人提出在高压气流下(如  $1.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $950^\circ\text{C}$ )生长氧化层的工艺<sup>[16]</sup>,其用于生长  $5 \mu\text{m}$  厚的氧化层只需几个小时。此外还有火焰水解法、等离子增强化学汽相淀积及其改进方法。当波导芯层与覆盖层折射率之差较大时,对每层制作工艺的控制及选择的结构都要求很高,主要原因是高折射率差波导表面粗糙度对光传输损耗的影响非常大。为减小界面散射,要求基底和后序的淀积层应十分光滑,这对刻蚀工艺也要求很高。

综上所述减小损耗最重要的一点是使波导模瞬逝场分布远离粗糙表面及硅基底,因此都认为作用条载波导、倒脊形波导较好。此外通过在硅上刻蚀沟槽并在槽内制作导波结构也是可选设计方案之一。除了因为形成的波导之间串扰低,利于获得高密度光传输通道外,还可以考虑使用聚合物填充沟槽形成导波。

3) 对所设计的波导与探测器的简单过渡连接结构,测试了光信号的传输,并给出了波导与探测器连接的扫描电镜照片,如图 4 所示。从图中可以清楚看到连接结构,表明设计时考虑工艺的相容性是可行的。另外作者认为波导型 PIN 探测器同一般的面入射型 PIN 探测器相比,其优点是光的入射方向与光激励载流子的前进方向即同 P-N 结垂直,因此可以分开设计 PIN 探测器的长度和影响速率主要因素的 I 层厚度,这将大大改善探测器同光纤耦合的性



Fig. 3 SEM photograph of section of groove on SiO<sub>2</sub>/Si

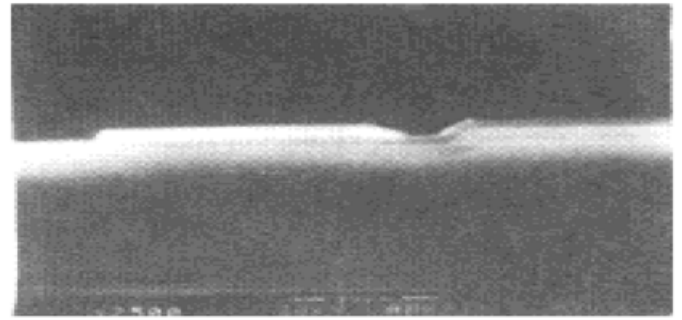


Fig. 4 SEM photograph of the waveguide connecting with the detector

能,并提高外量子效率。为此作者提出了一种改进方案,即通过在硅上刻蚀沟槽并生长氧化层,并在氧化层上制作光波导。例如可以选择 SiON 材料,来实现同波导型 PIN 探测器的连接,同时沟槽与光纤对接耦合连接也容易实现。此外还应注意沟槽波导具有以下三个优点(指光波长在  $1.1\ \mu\text{m}$  以下的情况): (i) 具有较低损耗,边缘粗糙度降低; (ii) 波导之间距离可以很小,而且串扰低; (iii) 适合于压印波导结构的制作,可望获得价格便宜的集成光路,与此同时许多聚合物也有望用来制作波导层。

**结 论** 研究了在硅基底上采用等离子体增强化学汽相淀积 SiON 所形成导波结构的特性,设计了通道波导、条波导、倒脊型波导等多种结构。在实验中采用棱镜耦合方法,测量了平面波导的传输损耗,在考虑波导下面氧化层厚度对测试结果的影响后,认为在作者研制的工艺条件下制作的 SiON 光波导,可以满足一定实际应用的要求。但是应在工艺控制包括淀积条件、刻蚀工艺、退火方式的选择等方面作进一步研究与改进。此外由于实验中选用的通道类波导损耗值偏大,通过分析损耗来源及结构设计和工艺过程所带来的影响,作者认为应使用条载波导、倒脊形波导等结构。

由于可以通过改变淀积条件来控制 SiON 的组分,即通过连续改变薄膜的折射率来制作自聚焦光学器件<sup>[16]</sup>。这样 SiON 薄膜也可以淀积在其它基底材料如 GaAs/InP、石英等上面,形成所需的导波结构。

作者十分感谢哈尔滨工业大学应用物理系洪晶教授曾对本文部分工作内容给予的指导,感谢吉林大学刘式墉教授曾对本文部分内容给予的建议与指导,感谢上海冶金研究所微电子学分部江志庚、李志彭等同志在工艺制作过程中的帮助,感谢长春物理所集成光学研究室和长春光机学院集成光学研究室有关同志对部分测试工作的建议和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S. Y. Kung *et al.*, Optical interconnections for VLSI systems. *Proc. IEEE*, 1984, **72**(7) : 850~ 866
- [2] R. A. Soref, J. P. Brenzo, All silicon active and passive guided-wave components for  $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$  and  $1.6\ \mu\text{m}$ . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(6) : 873~ 879
- [3] B. L. Weiss, G. T. Reed, S. K. Ioh *et al.*, Optical waveguides in SIMOX structures. *Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1) : 19~ 21

- [4] R. A. Soref, F. Namavor, J. P. Lorenzo, Optical waveguiding in a single-crystal layer of germanium silicon grown on silicon. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(5) : 270~ 272
- [5] H. Bezzaoui, E. Voges, Integrated optical combined with micromechanics on silicon. *Sensors and Actuators (A)*, 1991, **29**(3) : 219~ 223
- [6] N. Takato, J. Kaname, Y. Mitsuho *et al.*, Silica based single-mode waveguides on silicon and their application to guided-wave optics interferometers. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6) : 1003~ 1010
- [7] D. E. Zelmon, J. T. Soyd, H. Jackson *et al.*, Low loss optical waveguides fabricated by thermal nitridation of oxidized silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(4) : 353~ 355
- [8] M. D. Gindice, F. Bruno, T. Cicinelli *et al.*, Structural and optical properties of silicon oxynitride on silicon planar waveguides. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(24) : 3489~ 3496
- [9] K. Kapser, C. Wagner, P. Deimel *et al.*, Rapid deposition of high-quality silicon-oxynitride waveguides. *IEEE Photon. Techno. Lett.*, 1991, **3**(12) : 1096~ 1098
- [10] F. Brono, M. D. Guidico, R. Recca *et al.*, Plasma-enhanced chemical vapor deposition of low-loss SiON optical waveguides at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(31) : 4560~ 4564
- [11] W. Gleine, J. Muller, Laser trimming of SiON components for integrated optics. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11) : 1626~ 1629
- [12] D. Peters, K. Fischer, J. Müller, Integrated optical based on silicon oxynitride thin films deposited on silicon substrates for sensor applications. *Sensors and Actuators (A)*, 1991, **26**(1-3) : 425~ 431
- [13] S. Koh, H. W. Carter, J. T. Boyd, Synchronous global clock distribution on multichip modules using optical waveguides. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(5) : 1587~ 1595
- [14] 祖继锋, 耿完楨, 洪晶等, PECVD SiON 薄膜的工艺控制, 性质及其潜在应用. *光学学报*, 1995, **15**(7) : 913~ 916
- [15] S. Valette, J. P. Jadot, P. Gidon *et al.*, Si-based integrated optics technologies. *Solid State Technol.*, 1989, **32**(2) : 69~ 75
- [16] T. Baak, Silicon oxynitride: A material for GRIN optics. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(8) : 1069~ 1070

## A Study of Properties of Optical Guided-Wave Structure Based on Silicon

Zu Jifeng<sup>1</sup> Ma Zhongli<sup>1</sup> Yu Kuanhao<sup>2</sup> Chen Xueliang<sup>2</sup> Geng Wanzhen<sup>3</sup>

1, Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029

2, Microelectronics Branch, Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200233

3, Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

(Received 8 February 1997; revised 2 July 1997)

**Abstract** The properties of SiON optical waveguides based on silicon formed by plasma-enhanced chemical vapor deposition are discussed, and the structures of channel waveguide, strip waveguide, inverted ridge waveguide are designed. The results of technical fabrication are analysed, and some improving methods are presented.

**Key words** optical waveguide, silicon matrix, SiON, integrated optics, optoelectronic integrated circuit (OEIC).