

PECVD SiON 薄膜的工艺控制、性质 及其潜在应用*

祖继锋** 耿完桢 洪 晶

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

余宽豪 江志庚 李志彭 陈学良

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200233)

摘 要 研究了等离子增强化学气相淀积(PECVD)氮氧化硅(SiON)薄膜的工艺控制、性质以及薄膜波导在超大规模集成电路(VLSI)光互连中的潜在应用。

关键词 光波导, 光互连, 等离子增强化学气相淀积。

1 引 言

近年来寻求光学、物理、化学稳定性的材料用于集成光学领域的研究引起了人们的极大兴趣。特别是 VLSI 光学互连的提出^[1], 由于硅基导波光互连的工艺途径与微电子技术潜在的相容性, 这是其它光互连手段所无法比拟的^[2~5], 因此开展硅基光电子集成的研究具有深远的意义。集成光学领域广泛使用的主要材料有: GaAs(InP)、LiNbO₃、玻璃、氧化硅及聚合物等。其中氧化硅是较好的可供选择的材料, 因为制作氧化硅波导可以充分利用成熟的微电子技术, 硅作为光波导基底, 又能制作多种无源器件及有源器件于一体。制作成本较低, 工艺成熟, 有利于波导结构同光探测器以及电子器件等集成在一起。SiON 材料是近年来才较多用于制作光波导器件的。以前普遍采用二氧化硅的热氮化工艺制作 SiON, 温度较高。虽然制作的波导损耗低, 但得到的折射率变化范围小(1.67~1.75), 并且折射率的改变与氮化时间无关, 而无法在集成光学领域中获得广泛的应用。PECVD 能在较低的样品温度下淀积薄膜。虽然放电时电子温度接近于 10⁵ °C, 但样品温度却在 100~400 °C, 这使 PECVD 工艺具有许多优点, 可以用于制作集成光路。由于采用 SiH₄-NH₃ 或 SiH₄-NH₃-N₂O 混合气体淀积的氮化硅或氮氧化硅薄膜中含有较多的氢, 在高温退火时这些氢将会析出, 导致薄膜内出现裂纹或形成气泡, 降低了薄膜与基底之间的附着力。

本文采用氮气稀释 SiH₄ 及 N₂O 气体, 经充分混合后进入平行板型 PECVD 反应室, 在加

* 国家科委 863 高科技项目及辽宁省科委博士基金资助的课题。

** 现在辽宁师范大学物理系工作(大连, 116022)。

收稿日期:1994 年 1 月 19 日; 收到修改稿日期:1994 年 5 月 18 日

热的硅片或氧化硅层上形成 SiON 薄膜。以 N_2O 气体代替氨作为氮源,一方面是为了安全(因 NH_3 有毒),另一方面可降低薄膜中的氢含量,从而增加金属-氧化物-硅(MOS)器件的稳定性。

2 PECVD SiON 薄膜的制备工艺

实验中使用电阻率 ρ 为 $6\sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$, (100)取向的 P 型硅片数片(直径为 5.08 cm),在 1100°C 下的进行热氧化,时间分别为 180、300、500 min,在硅片上分别形成厚度约为 1.10、1.50、1.95 μm 致密的二氧化硅层。每片硅片上的氧化层比较均匀。用 PECVD 在硅片上直接淀积 SiON 薄膜,工艺条件为: $I = 33 \text{ mA}$, $V = 0.33 \text{ kV}$, $P = 86.7 \text{ Pa}$, $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 气流比值改变,温度为 250°C 。经膜厚仪测试,薄膜的厚度不均匀性小于 $\pm 3\%$ 。薄膜的厚度能满足一定的设计要求。若增加 N_2O 的气流量,保持 SiH_4 , N_2 气流量不变,能进一步改善整个圆片上厚度的不均匀性。一些结果表明 PECVD SiON 膜具有许多优点:在薄膜较厚的情况下应力较低,后序的热处理工艺不会使薄膜出现裂纹;采用等离子体干法腐蚀,图形尺寸易于控制等,目前已在 $3 \mu\text{m}$ 互补型金属氧化物半导体大规模集成电路器件双层布线中获得了应用^[6]。

3 SiON 薄膜的性质

3.1 薄膜的折射率

由椭偏仪测试的几种用不同淀积条件制备的 SiON 薄膜的折射率值如表 1 所列。表 1 说明,改变 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 气流的比值,就可改变薄膜的折射率。定性分析结果说明,当 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 超过一定数值以后, SiON 的生长速率减至为最低,这是由于 SiH_4 分解出来的 Si 直接淀积在硅基底上的缘故。因此在高 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 气流比值条件下,制作的波导其损耗将显著增加,而使其无法获得实际应用。

Table 1. Refractive index of several films with different deposition conditions

materials	SiON	SiON ^(A)	SiON ^(B)	SiON ^(C)
technological processes	PECVD	PECVD	PECVD	PECVD
deposition conditions	$\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ = 80/40	$\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ = 100/60	$\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ = 58/100	$\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ = 42/160
refractive index	1.530	1.573	1.489	1.478

3.2 薄膜的纵向组分均匀性

为了研究 SiON 薄膜纵向组分均匀性,作者对相同条件下淀积的 SiON 薄膜进行了俄歇能谱分析(AES),结果如图 1 所示。可以看出薄膜中的硅原子、氧原子和氮原子的纵向分布是比较均匀的。

3.3 薄膜淀积速率

由于 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 气流比与薄膜折射率及生长速率存在一定的函数关系。如果能准确控制气流比,就可以控制薄膜的组成和生长速率,即控制薄膜厚度。图 2 给出了气流比与淀积速率的关系,可以看出增加 N_2O 气流量,保持 SiH_4 、 N_2 气流量不变,可增加薄膜的淀积速率。

4 波导结构的工艺控制

半导体工艺中的光刻技术可用来形成薄膜波导结构。本文采用湿法腐蚀及等离子体刻蚀

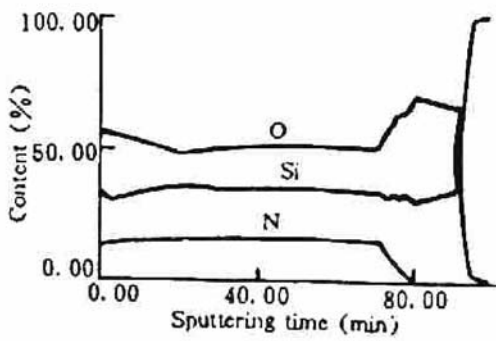


Fig. 1 AES of SiON films

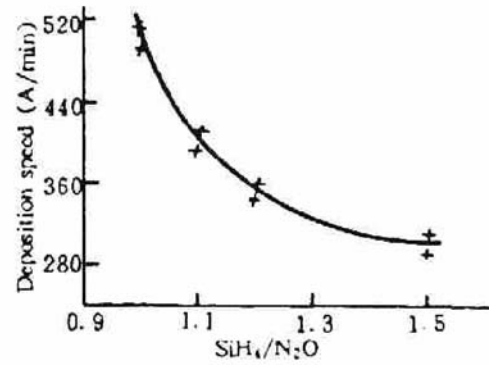


Fig. 2 The relation between airflow ratios and deposition speed of films

相结合的方法。前者用于形成 p-i-n 结 (PIN) 探测器区, 后者用来形成导波结构, 其要求是得到垂直光滑的波导轮廓, 而且应能控制刻蚀速率。图 3 给出了在 SiO₂ 上淀积 SiON 薄膜并制作的 8 分支波导的扫描电子显微镜 (SEM) 照片, 图 4 给出了条波导断面的扫描电子显微镜照片, 其中二氧化硅层比较均匀, 波导侧壁与底面不垂直, 作者认为是由于用作掩模的光刻胶比较薄, 产生了少量横向刻蚀的结果, 可以增加光刻胶厚度, 以消除这种横向刻蚀。

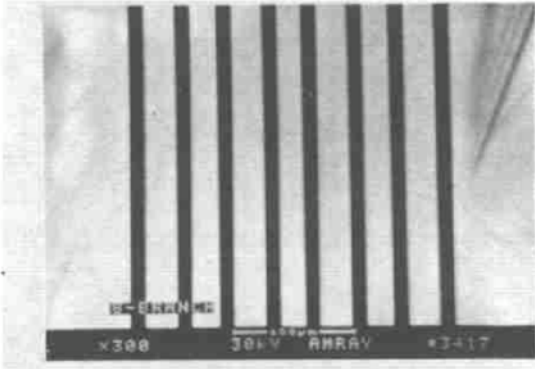


Fig. 3 SEM photograph of 8-branch waveguide



Fig. 4 SEM photograph of section of strip waveguide

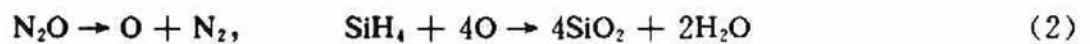
5 工艺上的改进方法

由于在等离子体状态下利用化学性活泼的离子、原子团, 因而可以在低温下生成薄膜。从热力学观点讲, 借助于等离子体状态, 能促使反应, 使通常较难发生的化学反应变为现实。因为选择的反应材料为气体, 可以稳定地提供, 进而可达到控制薄膜组分的目的。

通常 SiH₄ 同氮、氧离子反应是:



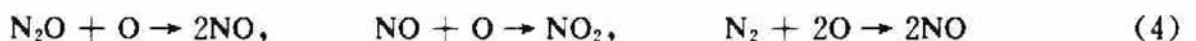
由于采用氮气冲稀的 SiH₄ 及 N₂O 气体, 将存在下列反应:



由于激励 N₂O 反应速度高于激励 N₂ 的反应速度 (即等离子体中的 N₂O 分解比 N₂ 分解容易), 所以下列反应将不占优势:



虽然 (2) 式反应占优势, 但它依赖于射频功率。在较低射频功率下, 也可能存在下列反应:



(4) 式反应吸收氧, 即减少了氧原子的来源, 无疑会使薄膜中 O/N 比例下降, 薄膜的折射率

将有所提高。然而当射频功率很高时,虽同时发生(2)式、(4)式反应,但更多的 N_2O 分解,使得(4)式反应失去重要性,结果会使薄膜中的 O/N 比例升高,折射率降低。同时也存在:射频功率低,薄膜淀积速率也低。通过上述分析,作者认为。在提高射频功率的同时,增加 N_2O 的比例,维持其它条件不变,会明显提高薄膜淀积速率,也可控制薄膜组份。

结 论 本文采用 PECVD 在 SiO_2/Si 上淀积 SiON 薄膜,选择的反应气体为 $SiH_4(N_2)$, N_2O 。 N_2O 气源同 NH_3 气源相比具有一定的优点。 SiH_4/N_2O 是主要的控制淀积参量,它能控制薄膜的化学组份以及折射率等参数。SiON 薄膜的折射率随 N_2O 增加而减小,折射率趋向于二氧化硅,说明薄膜中的氮含量在减少,俄歇能谱分析结果也说明了这一变化趋势。由于可通过改变淀积条件来控制 SiON 组份,进而可连续改变 SiON 薄膜的折射率,使制作 SiON 缓变折射率光学器件成为可能。

部分研究结果表明, SiON 由于其制作温度低,而且可控制折射率的改变以及同微电子器件制作具有潜在的相容性,一定会在无源集成光学器件制作, VLSI 导波光互连以及光学传感器等领域中获得实际的应用。

感谢上海计量局的邹惠民同志提供了俄歇能谱数据。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, Sun-Yuan Kung *et al.*, Optical interconnections for VLSI systems. *Proc. IEEE*, 1984, 72(7): 850~865
- [2] Y. Yamada, M. Yamada, H. Terui *et al.*, Optical interconnections using a silica-based waveguide on a silicon substrate. *Opt. Engng.*, 1989, 28(12): 1281~1287
- [3] J. J. Cousty, J. Marcou, M. Turpin, Study of grooves in silicon chip as meas of optical interconnections in VLSI circuit. *Opt. Commun.*, 1989, 73(1): 23~31
- [4] 祖继锋, 姜铃珍, 洪 晶等, 微电子技术用于硅基底导波光互连. *半导体技术*, 1992, (4): 10~16
- [5] 祖继锋, 耿完桢, 洪 晶等, 硅基底薄膜波导在 VLSI 光互连中的应用研究. *高技术通讯*, 1992, 2(6): 1~4
- [6] 曾天亮, 陈 平, 江志庚等, PECVD SiON 膜的性质及其在双层互连工艺中的应用. *半导体学报*, 1992, 13(6): 386~391

The Technology Control and Properties of PECVD SiON Films and Its Potential Applications

Zu Jifeng Geng Wanzhen Hong Jing

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Yu Kuanhao Jiang Zhigeng Li Zhipeng Chen Xueliang

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200233)

(Received 19 January 1994; revised 18 May 1994)

Abstract The technology control, structure and properties of PECVD SiON films and the potential applications of thih film waveguides in optical interconnections for VLSI are discussed in this paper.

Key words optical waveguide, optical interconnection, plasma-enhanced chemical vapor deposition.