

测定硅各向异性腐蚀速率分布的新方法*

杨 恒 鲍敏杭 沈绍群 李昕欣

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

张大成 武国英

(北京大学微电子学研究所 微米/纳米技术国家级重点实验室, 北京 100871)

摘要: 介绍了一种测定硅各向异性腐蚀速率分布的新方法. 硅各向异性腐蚀速率三维分布可由一系列晶面上的二维腐蚀速率分布表示. 利用深反应离子刻蚀技术(DRIE)在 $\{0mn\}$ 硅片上制作出侧壁垂直于硅片表面的矩形槽, 测量槽宽度在腐蚀前后的变化, 就可测定各 $\{0mn\}$ 面上的二维腐蚀速率分布. 将二维腐蚀速率分布组合在一起就得到了三维腐蚀速率分布. 由于 DRIE 制作的垂直侧壁深度大, 可耐受较长时间的各向异性腐蚀, 所以只需使用一般的显微镜就能得到准确的结果. 实验得到了40% KOH 和25% TMAH 中 $\{n10\}$ 和 $\{n11\}$ 晶面的腐蚀速率分布数据.

关键词: 硅; 各向异性腐蚀; KOH

PACC: 8160C

中图分类号: TN 305. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0504-05

A Novel Method for Determining the Etch Rate Distributions of Si*

YANG Heng, BAO Min-hang, SHEN Shao-qun and LI Xin-xin

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

ZHANG Da-cheng and WU Guo-ying

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Received 9 January 1999, revised manuscript received 2 April 1999

Abstract: A novel method for measuring the anisotropic etch rate distributions of Si is described. A three-dimensional anisotropic etch rate distribution of Si can be described by two-dimensional etch rate

* 国家自然科学基金(69876009)和传感器国家重点实验室资助项目[Project Supported by the National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69876009 and by Chinese State Key Laboratory for Sensors].

杨 恒 博士研究生, 从事硅微机械传感器研究.

鲍敏杭 教授, 博士生导师, 长期从事硅微机械传感器研究.

沈绍群 副教授, 长期从事硅微机械传感器研究.

1999-01-09收到, 1999-04-02定稿

distributions in a series of crystal planes. Deep reactive ion etching (DRIE) is used for creating rectangular trenches whose sidewalls are perpendicular to the wafer surface in $\{0mn\}$ wafers. By measuring the width of the trenches before and after anisotropic etching, two-dimensional distributions in $\{0mn\}$ wafers can be determined. With the two-dimensional distributions, the three-dimensional distributions can be determined. As the height of the vertical side walls made by DRIE is high enough to withstand reasonable long time etching, a conventional microscope is accurate enough. Etch rate distributions of $\{n10\}$ and $\{n11\}$ crystal planes in 40% KOH and 25% TMAH are presented.

Key words: anisotropic etching; silicon; anisotropic etching; KOH

PACC: 8160C

Article ID: 0253-4177(2000)05-0504-05

1 前言

硅各向异性湿法腐蚀在微机械传感器与执行器的制作中有广泛的应用. 为了较精确地设计腐蚀掩模, 需要了解硅在不同腐蚀液中不同腐蚀条件下的三维腐蚀速率分布. 基于几何模型的腐蚀模拟技术^[1,2]的模拟精度也由腐蚀速率分布的精度决定. 目前已开发了多种方法用以测定腐蚀速率分布^[2-4]. 典型的测量方法是制作硅半球, 通过测量腐蚀前后硅半球的外形变化测定腐蚀速率分布^[4]. 由于在各向异性腐蚀时半球上腐蚀速率慢的晶面会迅速消失, 为测得较高精度的数据必须使半球足够大, 文献[4]中使用了半径为22mm的硅半球, 测得的数据角度间隔为2°. 该方法还必须使用高精度专用测量仪器. 本文介绍一种测定腐蚀速率分布的新方法. 该方法利用近年来出现的深反应离子刻蚀技术(Deep Reactive Ion Etching, DRIE), 在一系列 $\{0mn\}$ 硅片上刻蚀出侧壁垂直于硅表面的深槽, 通过测量垂直深槽在腐蚀前后的宽度变化就可得到各 $\{0mn\}$ 面上的二维腐蚀速率分布, 组合各二维腐蚀速率分布就可表示三维腐蚀速率分布. 这样要比直接测定三维腐蚀速率分布方便. 结合无掩模腐蚀^[5]中圆角现象的研究和利用无掩模腐蚀加工微机械陀螺的研究, 本文测量了硅在40% KOH(氢氧化钾)和25% TMAH(Tetramethyl Ammonium Hydroxide)中 $\{n10\}$ 面和 $\{n11\}$ 面的腐蚀速率数据.

2 原理

直接测量硅三维腐蚀速率分布在技术上很困难. 为此, 我们将硅三维腐蚀速率分布分解为一系列二维腐蚀速率分布, 采用一种利用DRIE刻蚀深槽的方法测量二维腐蚀速率分布, 以代替直接测量三维分布. 在本实验中将硅三维腐蚀速率分布分解为一系列 $\{0mn\}$ 面上的二维腐蚀速率分布, 如图1所示. 制备一系列 $\{0mn\}$ 硅片, 其法线方向按所需的精度取一定的间隔, 测量各 $\{0mn\}$ 硅片上的二维腐蚀速率分布, 就得到了三维腐蚀速率分布.

近年开发成功的DRIE设备可制作侧壁与表面夹角为 $90^\circ \pm 2^\circ$ 、深度达数百微米的深槽^[6]. 在 $\{0mn\}$ 硅片上利用DRIE设备制作矩形深槽, 深槽的指向从 0° 变化至 360° , 其间隔由所需的精度决定. 矩形深槽的侧壁可认为是垂直于硅片表面的. 通过测量腐蚀前后槽宽度的变化, 就能够测定二维腐蚀速率分布. 腐蚀速率 R 为

$$R = \frac{b}{2t} \quad (1)$$

其中 b 为槽宽度在腐蚀前后的变化; t 为腐蚀时间. 由于测量误差主要来源于宽度的测量, 腐蚀速率的测量误差可表示为

$$\Delta R = \frac{\Delta b}{2t} \quad (2)$$

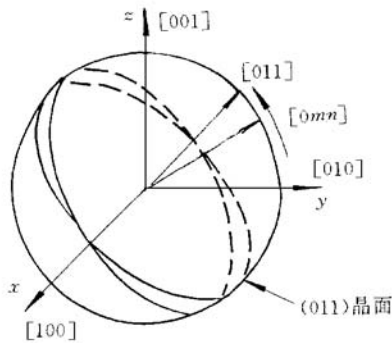


图1 将三维腐蚀速率分布分解为一系列 $\{0mn\}$ 面上的二维腐蚀速率分布
 FIG. 1 Composition of Three-Dimensional Etch Rate Distribution by a Series of Two-Dimensional Distributions in $\{0mn\}$ Planes

宽度测量误差 Δb 主要由测量系统决定, 可认为与腐蚀时间无关. 因此, 腐蚀速率的测量误差 ΔR 随腐蚀时间的增加而减小. 但是腐蚀时间也不能太长, 因为在腐蚀过程中, 在大多数深槽侧壁的顶部掩模边界处和底部与底面的交界处会有腐蚀速率慢的晶面出现. 这些晶面使侧壁的垂直部分变小直至最后消失. 图2是(100)硅片上(110)方向的矩形深槽剖面在腐蚀前后的变化. 深槽侧壁是(110)晶面. 在腐蚀过程中在顶部掩膜边界处和底部凹角处有(111)面出现, 使侧壁(110)晶面变小. 在50°C, 40% KOH 溶液中, 初始高度为80 μm 的垂直(110)面最多可耐受1.26h的腐蚀.

由于在深槽顶部有慢腐蚀面出现, 所以在腐蚀后无法直接测量两垂直侧壁间的宽度, 必须研磨去除一层硅, 直至垂直侧壁暴露, 然后进行测量.

3 实验及结果

(100)和(110)面是 $\{0mn\}$ 面中最重要的两个面. 图1所示的

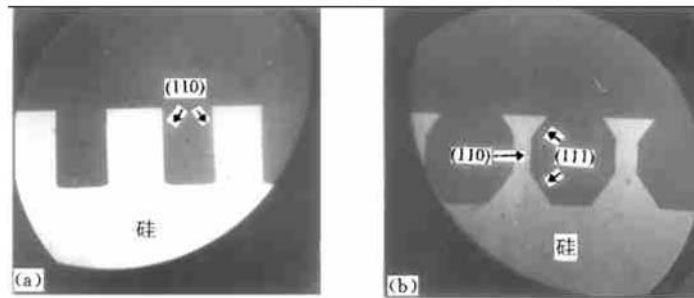


图2 (100)硅片上(110)方向的矩形槽在腐蚀前(a)和腐蚀后(b)的剖面照片
 FIG. 2 Photographs of Cross Section for a (110) Oriented Trench in (100) Wafer (a) Before Etching, (b) After Etching

硅晶体中共有3个互相垂直的 $\{100\}$ 面和4个 $\{110\}$ 面, 得到(100)面和(110)面上的二维腐蚀速率分布就可得到腐蚀速率三维分布的基本轮廓. 并且(100)和(110)上的二维腐蚀速率分布也是分析各种无掩模腐蚀形成的结构剖面的重要数据, 是我们进行无掩模腐蚀研究所需要的. 在此基础上, 根据需要补充某些中间面上的二维腐蚀速率分布可使三维腐蚀速率分布更加完善.

在一组实验中使用了(100)硅片, 另一组实验中使用了(110)硅片, 电阻率为4~8 Ω/\square . 首先在硅片上热生长一层1 μm 厚的氧化层, 用作DRIE和以后各向异性腐蚀的掩模. 然后光刻掩模层, 掩模图形如图3所示. 图中深色区域为腐蚀窗口. 图形中央四条长矩形条用于对准, 圆周上分布的矩形条是用于制作测量用的图形. 矩形条宽度为60 μm , 长度大于400 μm , 上半圆周上的图形指向由0°到180°, 相邻图形夹角为2°. 下半圆周上的图形指向由183°至357°, 相邻图形间夹角也是2°, 上下半圆上的图形错开1°是为了增加数据提高精度. 用Silicon Technology Systems公司的DRIE设备(Multiplex ICP)进行刻蚀, 腐蚀深度大于80 μm , 在硅片上形成一系列矩形深槽, 深槽侧壁与硅片表面的夹角为90° \pm 2°. (100)硅片上深槽的侧壁为 $\{n10\}$ 面, 而(110)硅片上深槽侧壁为 $\{n11\}$ 面.

DRIE完成后, 即可进行各向异性腐蚀. 实验中使用的腐蚀液是40、50、60°C浓度为40%的KOH和60°C浓度为25%的TMAH. 在50°C 40% KOH溶液中腐蚀时间为1h, 其余几组在KOH中的腐蚀深度与之基本

相等. 由于60℃ 25% TMAH 中(110)面与(100)面腐蚀速率比值很大, TMAH 中腐蚀时间较短, 为30min.

腐蚀完成后抛光去除约40μm 的硅, 然后进行测量. 每次实验共需测量179个矩形槽的宽度, 得到一条二维腐蚀速率分布曲线.

实验结果的极坐标示意图如图4和图5所示.

由图4可得在40% KOH 溶液中, {n11}面中腐蚀速率最快的是(110)面, (110)与(100)面的腐蚀速率比约为1.9·1. (311)面是{n11}面中另一腐蚀速率极大值点, (311)面与(100)面的腐蚀速率比约为1.6·1. {n10}面中腐蚀速率最大值也出现在(110)面附近. 但(110)面附近较宽的区域腐蚀速率非常接近. {n10}中腐蚀速率最小值点为(100)面.

由图5可得硅在TMAH 中的腐蚀特性与KOH 溶液中有显著区别.

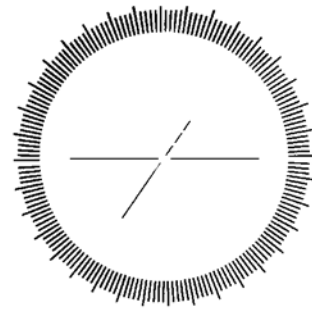


图3 DRIE 掩模
FIG. 3 Mask for DRIE

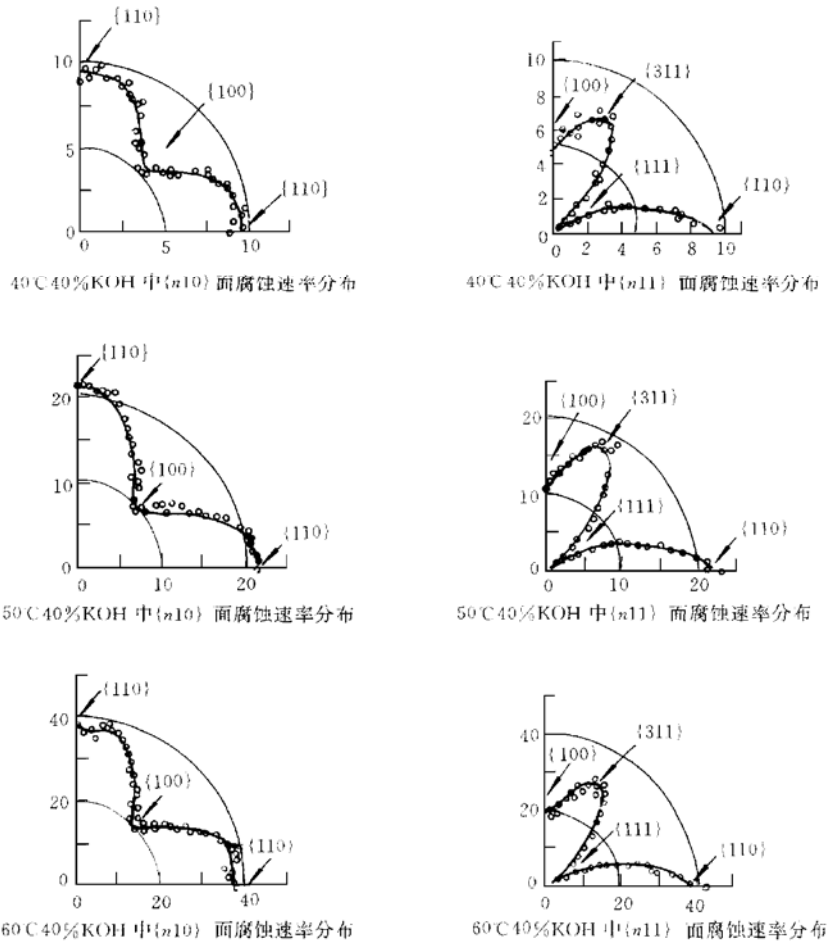


图4 KOH 溶液中硅各向异性腐蚀二维速率分布极坐标示意图

FIG. 4 Polar Plots of Two-Dimensional Etch Rate Distributions of Si in KOH

TMAH 溶液中(110)面附近{n11}和{n10}晶面的腐蚀速率分布有很宽的极大值, (110)与(100)的腐蚀速率比达到了2.4·1. 在TMAH 中(311)面的腐蚀速率也是{n11}面中的一个极大值点, 但(311)与(100)面的腐蚀速率比也达到2·1, 明显大于KOH 中的比值.

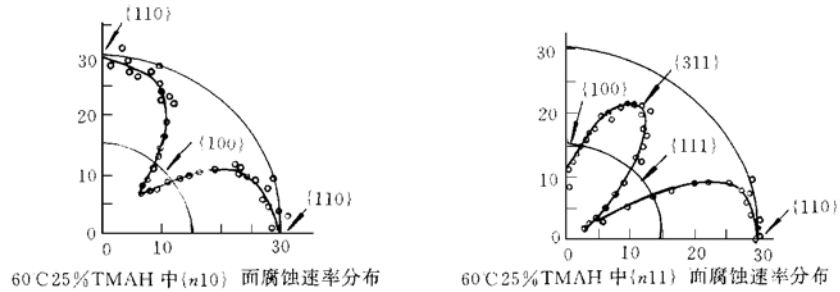


图5 TMAH 溶液中硅各向异性腐蚀二维速率分布极坐标示意图

FIG. 5 Polar Plots of Two-Dimensional Etch Rate Distributions of Si in TMAH

4 结论

本文提出并实现了一种利用 DRIE 的最新技术制作垂直于硅片表面的侧壁用以测定硅各向异性腐蚀速率分布的方法. 实验测量了多种条件下硅 {n10} 和 {n11} 面在 KOH 和 TMAH 中的腐蚀速率数据. 测量结果有较高的精度. 目前本实验结果已在硅无掩模腐蚀的圆角问题研究中得到应用.

参 考 文 献

- [1] Carlo H. Sequin., *Sensors and Actuators*, 1992, **A34**: 225—241.
- [2] Aldra Koide, Kazuo Sato, Shinji Tanaka, Simulation of two-dimensional etch profile of silicon during orientation-dependent anisotropic etching. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Workshop, Nara, Japan, Feb. 1991. pp. 216—220.
- [3] D. Zielke and J. Fruhauf, *Sensors and Actuators*, 1995, **A48**: 151—156.
- [4] Kazuo Sato, Mitsuhiro Shikida, Yoshihiro Matsushima *et al.*, *Sensors and Actuators*, 1998, **A64**: 87—93.
- [5] 李昕欣, 杨恒, 沈绍群, 鲍敏杭, 半导体学报, 1997, **18**(12): 946—950[LI Xinxin, YANG Heng, SHEN Shaoqun and BAO Minhang, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, **18**(12): 946—950].
- [6] J. K. Bhardwaj, H. Ashraf, Advanced silicon etching using high density plasmas. Proc. Micromachining and Microfabrication Process Technology Symposium of International Society for Optical Engineering, Austin, Texas, Oct. 1995, pp. 224.