

形成硅多层微机械结构的 “掩模-无掩模”腐蚀新技术*

李昕欣 杨 恒 沈绍群 鲍敏杭

(复旦大学电子工程系传感器研究室 上海 200433
传感技术国家重点实验室 上海 200050)

摘要 本文介绍了一种制作硅多层微结构的体微机械加工新技术. 基于 KOH 溶液的无掩模腐蚀特性, 仅用一层掩模进行一次从有掩模到无掩模的连续腐蚀工序, 可在〈100〉硅片上制作各种以〈311〉晶面为侧面且边棱沿〈110〉晶向的多层次立体结构. 原则上层面数不受限制, 各个层面的位置和深度都可由一块掩模的设计和相应的腐蚀深度确定. 该技术突破了传统各向异性腐蚀的局限性, 使体微机械技术的加工能力大为扩展, 可望在微电子机械系统的结构制作中广泛应用.

EEACC: 2550

1 引言

硅的各向异性腐蚀作为主要的体微机械加工技术之一, 已广泛用于微机械传感器和执行器的制作^[1]. 常规的腐蚀工艺是在腐蚀掩模规定下进行的. 由于被腐蚀的底面都处于同一水平面上, 故每次腐蚀仅能产生一个新的层面或台阶高度. 由于采用常规的光刻技术难以将掩模图形转移到较深(深度达到 10~20 微米以上)的腐蚀底面上, 因而在腐蚀底面附近形成台面结构, 更无法构造有一定深度的多层立体结构.

然而在许多微电子-机械器件中, 需要制作含有多层台面的结构. 例如在制作梁-膜-岛等具有应力集中效应的压力传感器结构时^[2~4], 最好能从硅片背面单面形成整个结构从而利于与正面的集成电路工艺相兼容. 另外采用较浅的岛结构(岛的厚度为硅片厚度的一半或更薄)可以提高器件的动态特性. 这样就要求结构中除硅片表面以外还要有二至四层台面. 传统的腐蚀方法对此无能为力. 利用一些特殊的光刻工艺也可能将掩模图形转移到较深的腐蚀底面上, 并在每一次光刻后进行一次有掩模腐蚀, 如此反复多次也可能制作出多层的结构. 但这样的工艺将十分复杂并很难保证成品率, 实际上至今未见这样的报道.

* 国家自然科学基金资助项目、“九五”国家科技攻关项目和传感技术国家重点实验室资助项目

李昕欣 博士研究生, 从事微机械技术、传感器和集成电路工艺研究

杨 恒 硕士研究生, 从事微机械技术、传感器和集成电路工艺研究

沈绍群 副教授, 从事集成电路和半导体传感器的研究

鲍敏杭 教授、博士生导师、中国电子学会会士, 从事半导体器件、传感器和 MEMS 研究与教学

1997 年 4 月 11 日收到初稿, 1997 年 8 月 10 日收到修改稿

我们报道了一种无掩模腐蚀技术^[5,6]或利用一种称为复合掩模的技术^[7],可以形成靠近腐蚀底面的结构.但是,利用这些技术每次掩模也只能产生一个新的层面,因此不能制作深的多层结构.

在无掩模腐蚀技术的基础上,我们提出一种制作多层立体结构的新方法.即在一块掩模的基础上,进行一个从有掩模腐蚀到无掩模腐蚀的工艺,以同时形成深的多层结构.从原理上讲,所能形成的层面数目是没有限制的.

2 新结构层面形成原理

首先简要回顾一下用 KOH 水溶液对硅进行无掩模腐蚀^[5]的主要特性.先通过有掩模腐蚀在(001)硅片上形成了边棱沿<110>晶向的单层台阶,台阶的侧面为{111}.然后去除表面的掩模进行无掩模腐蚀.由于在侧面上边{311}面的出现和该面对原{111}侧面的侵削作用,台阶的上边棱在腐蚀向下进行的同时发生横向的推移.设无掩模腐蚀的深度为 d ,台阶上边棱的退移量 $L(d)$ 为:

$$L(d) = (r_3/\sin\theta - \text{cth}\theta)d \approx (2.35r_3 - 2.12)d \tag{1}$$

式中 r_3 是 {311} 面和 {100} 面的腐蚀速率比; $\theta = \arctg(\sqrt{2}/3) \approx 25.24^\circ$ 为 {311} 面和 {100} 水平面间的夹角.当 d 达到一个临界值 d_0 后, {111} 面就完全被 {311} 面所取代. d_0 表达为:

$$d_0 = h/[r_3 \sin\alpha / \sin(\alpha - \theta) - 1] \approx h/(1.66r_3 - 1) \tag{2}$$

式中 $\alpha = \arctg \sqrt{2}$ 是 {111} 面和 {100} 面的夹角; h 是有掩模腐蚀的深度.在整个侧面变为 {311} 以后,台阶下边棱将与上边棱一同横向退移.

此外,各向异性有掩模腐蚀还有一个重要的基本特性.即对于(100)硅片表面边沿<110>方向的矩形腐蚀窗口,当腐蚀深度达到窗口宽度的 $1/\sqrt{2}$ 倍后,由于相对的两个 {111} 腐蚀侧面在底部相交并而终止腐蚀,使腐蚀坑成 V 形槽状.

掩模-无掩模腐蚀新技术正是以上述一些特性为基础的.新层面产生的基本原理可以用图 1 来说明.图 1(a)表示经光刻后在(100)硅片表面上的二氧化硅掩模层.掩模窗口的边沿<110>方向.图中画有两个腐蚀窗口.腐蚀窗口 1 的宽度 W 较小,它是希望通过腐蚀产生新层面的地方.腐蚀窗口 2 是一个作为对比用的腐蚀窗口,它的宽度 W' 足够大,所以在该区域将不会产生新的层面.

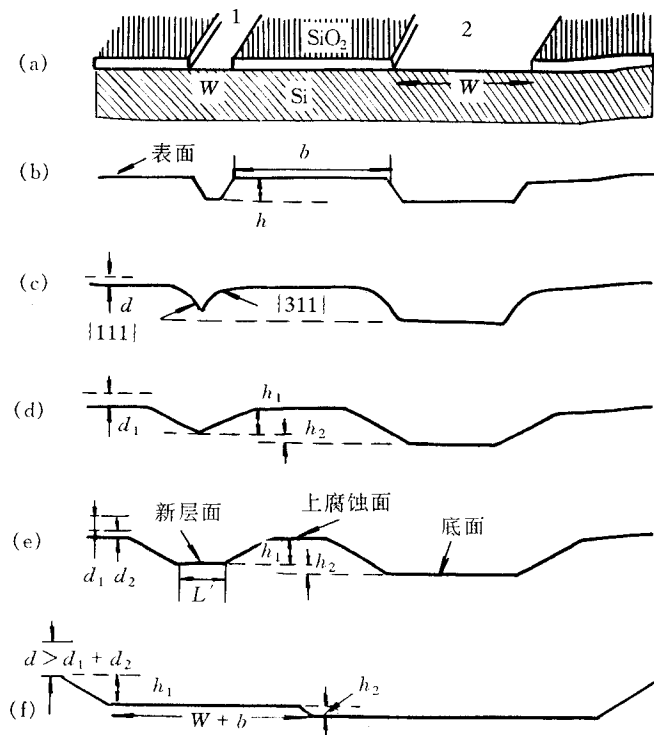


图 1 形成三层结构的工艺流程示意图

对光刻后的硅片先进行深度为 h 的有掩模腐蚀,如图 1(b)所示. 然后去除掩模再进行无掩模腐蚀. $\{311\}$ 面将从台阶上边棱开始侵削原有的 $\{111\}$ 侧面,在现有的两个水平层面向下的腐蚀的同时两个 $\{111\}$ 侧面向下延伸. 在此过程中窗口 1 区可能出现的情况有二:一种情况是在 $\{111\}$ 侧面在下部相交之前 $\{311\}$ 面已完全取代了 $\{111\}$ 侧面. 由于两个 $\{311\}$ 侧面相对向后退移,腐蚀底面始终不会中止腐蚀,即窗口 1 区的腐蚀深度就是腐蚀的总深度,不会产生新的层面. 反之,如窗口 1 区的腐蚀底在两个 $\{111\}$ 侧面被完全取代之之前相交成 V 形槽而使腐蚀暂时中止. 利用公式(1)和(2),可得到发生这种情况的必要条件是有掩模腐蚀深度 h 大于一个与 W 有关的临界值 h_0 :

$$h_0 = W[1 - \sin(\alpha - \theta)/(r_3 \sin \alpha)]/\operatorname{tg} \alpha \approx (0.71 - 0.43/r_3)W \quad (3)$$

对于不同浓度的腐蚀液, r_3 是不同的. 例如对于 40% 的 KOH 水溶液, $r_3 = 1.71$ 该条件可写成 $h > 0.46W$. 当出现该种情况以后,在接下来的无掩模腐蚀过程中窗口 1 区的底部消失而暂时停止向下腐蚀. 而窗口 2 区,因为 W' 很大和,它对应的 h_0 也很大,因而不满足 $h > h_0$ 的条件,因此底部始终不会停止腐蚀(图 1(c)). 当 $\{311\}$ 面完全取代 $\{111\}$ 侧面之时(图 1(d)),无掩模腐蚀深度为:

$$d_1 = W(\cos \theta/\operatorname{tg} \alpha - \sin \theta/2)/r_3 \approx 0.43W/r_3 \quad (4)$$

在无掩模腐蚀深度达到 d_1 的时刻,窗口 1 处的深度仍为 $W/\sqrt{2}$ 而窗口 2 区域的腐蚀深度已达 $h + d_1 > W/\sqrt{2}$. 此后,随 $\{311\}$ 侧面的退移,窗口 1 处的腐蚀底面重新出现并在向下腐蚀的同时横向拓宽形成一个新的层面. 该新层面具有新的深度,容易证明,它与窗口 2 区域腐蚀底面的高度差 h_1 为:

$$h_1 = W/\operatorname{tg} \alpha - d_1 = h_0 \quad (5)$$

它与上腐蚀台面的高度差 h_2 为

$$h_2 = (h + d_1) - W/\operatorname{tg} \alpha = h - h_1 \quad (6)$$

注意二者之和为 $h_1 + h_2 = h$. 此后,新产生层面与上下腐蚀面的相对高度差将保持不变. 但随 $\{311\}$ 侧面的横向退移,新台面的宽度将加大,新层面的宽度为:

$$L' = 2 \left(\frac{r_3}{\sin \theta} - \operatorname{ctg} \theta \right) d_2 \approx (4.7r_3 - 4.24)d_2 \quad (7)$$

式中 d_2 为新台面产生后的腐蚀深度. 这样就形成了除原始硅片表面之外,还有三个层面的立体结构(图 1(e)).

在图 1(e)中 1 区和 2 区之间的台面可以作为一个结构保留,也可将其去除. 在腐蚀深度 d_2 足够大而两个窗口之间的距离又比较小(即图 1(b)中的 b 较小)时,可以通过这个台面两侧的 $\{311\}$ 侧面相对方向的退移作用这一台面削平,使新产生的台面直接与腐蚀底相邻,如图 1(f)所示. 通过分析计算可以得到削平两个窗口之间台面的条件是:

$$d_2 \geq \frac{(b + W)\sin \theta}{2(r_3 - \cos \theta)} \approx \frac{b + W}{4.69r_3 - 4.24} \quad (8)$$

在中间台面消失后新产生层面宽度达到其最大值 $b + W$ 而不再增加,在以后的无掩模腐蚀中只是整个层面向一个方向移动.

根据以上分析可以看出:在产生新层面的过程中, h 值决定了结构的总高度差,而 W 值决定了新生层面与上部台面高度差 h_1 ,即临界的有掩模腐蚀深度 h_0 ,和临界无掩模腐蚀深度 d_1 . 因此通过适当的掩模窗口图形设计和有掩模-无掩模腐蚀工艺条件,就可以控制新

层面的深度和位置。

3 实验结果

基于上述产生新层面的原理,使用多个具有不同或相同 W 值的窗口并合理布局,通过一次“掩模-无掩模”腐蚀,可以同时制作出各种各样复杂的、含有多层次的结构。

利用该技术,我们已成功制作了十多种结构,图 2(见图版 I)是一个含有四层台阶的阶梯结构的掩模设计和 SEM 照片。图 2(a)为掩模图形,其中使用了三种不同 W 值的窗口设计,每种包括两方向窗口相垂直排列。中间浅阴影部分为 SiO_2 掩模层,用来完成有掩模腐蚀步骤。而外围深阴影部分为 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 掩模,是为了在 SiO_2 被 HF 溶液去除后能保留下来,从而保护结构外边框不被 KOH 溶液腐蚀。也就是说边框内的多层结构完全是由中间的 SiO_2 掩模决定的。窗口宽度 W_1 、 W_2 和 W_3 的数值分别为 150、110 和 $65\mu\text{m}$ 。实验时有掩模腐蚀和无掩模腐蚀的深度分别为 86 和 $140\mu\text{m}$ 。

图 2(b)为所制成阶梯结构的 SEM 照片。硅片边框内,除腐蚀底面外还有四个高度不同的层面,对应四个台阶。上三个台阶有凸角而最下面一个台阶有凸角和凹角。腐蚀使用 40% 的 KOH 溶液在 50°C 下进行。硅片厚为 $240\mu\text{m}$, SiO_2 掩模厚 500nm 而 Si_3N_4 厚约 160nm。根据上一节的有关公式设计,靠近底面的第一层面高度由 W_1 窗口的 h_2 值决定,为 $18\mu\text{m}$,第二层台阶高度由 W_1 和 W_2 的差决定且亦为 $18\mu\text{m}$,第三层台阶的高度由 W_2 和 W_3 之差决定,为 $20\mu\text{m}$,第四层台面的台阶高度由 W_3 窗口的 h_1 值确定,为 $30\mu\text{m}$ 。实验结果与理论设计符合很好。另外从照片中可以看出台阶 {311} 侧面的上部和中部呈现理想的棱台形状,但在靠近 (100) 底面的根部区域有少许圆角出现。该效应可归结为 (100) 附近一些慢腐蚀速率晶面的影响造成的,有关的研究尚在进行中。

对照图 2 的(a)和(b)可见,无论是结构凹角还是较上层的凸角,都没有在无掩模腐蚀过程中产生削角。但对于最下层的凸角必须就无掩模腐蚀的削角进行补偿。分析和实验表明常用的几种补偿图形(如 (110) 方块和 (110) 条补偿结构)都是有效的,但补偿条件则与一般有掩模腐蚀的补偿条件有所不同。补偿图形在先进行的有掩模腐蚀时被消耗掉一部分,而后在 $d < d_1$ 的无掩模腐蚀初期(即侧面取代的过程中)还要被消耗掉一部分。虽然在以后的无掩模腐蚀阶段会使已有削角减小,但较充分的临界补偿条件是在 $d = d_1$ 时补偿图形未被完全耗尽。值得一提的是在无掩模腐蚀时消耗补偿图形的方式和速率与有掩模腐蚀的不同,具体的数据可由实验获得。图 3(见图版 I)的 SEM 照片显示了无掩模腐蚀凸角削角的特性。其中共有 a、b、c 三个凸角,原掩模上每个角都有, (100) 条状补偿图形,补偿图形的尺寸从 a 到 c 依次减小。实验过程中观察到:角 a 的补偿图形在无掩模腐蚀进行到侧面完全取代时仍未消耗掉,角 b 的补偿图形在有掩模腐蚀结束时未被消耗掉但在无掩模腐蚀进行到侧面取代之前已消耗掉并一出现了削角,而角 c 在有掩模腐蚀结束时补偿图形已消耗掉并已出现了削角。图 3 的结果表明:角 a 在随后的无掩模腐蚀中很快将残余补偿图形消耗掉而后形成理想方凸角;角 b 在以后的无掩模腐蚀中原有削角缓慢变小,图中已接近理想;角 c 由于原削角较大,在实际的腐蚀深度内还没有变得很好。另一方面与图中上部的有掩模腐蚀削角 d 相比,无掩模腐蚀的削角在形状上有较大差异。

从图 2(a)可见最窄的窗口是两排并列设计的,目的是使产生的层面较宽些。利用更多的相同宽度的窗口排列能形成更宽阔的台面。图 4(见图版 I)的 SEM 照片中为一个含有四

个不同腐蚀深度的多硅杯结构,可用来形成不同量程的压力传感器阵列.设计中应使宽度相同的窗口阵列布满腐蚀区,较窄的窗口对应较浅的腐蚀腔即形成较厚的压力敏感膜片,反之较宽的窗口对应较浅的腐蚀腔.对于引言中提及的单面梁-膜-浅岛结构压力传感器,图5(见图版I)给出了用该技术形成的这种学结构的SEM照片.其腐蚀腔深度为 $210\mu\text{m}$,浅岛高 $80\mu\text{m}$,梁比膜约厚 $10\mu\text{m}$.

4 结论

该技术通过一块掩模的设计和从有掩模到无掩模的连续腐蚀工艺,制作出多层次的硅微机械立体结构,所能制作的结构层数原则上没有限制的.该技术利用了有掩模腐蚀和无掩模腐蚀的先后作用,利用了 $\{111\}$ 慢腐蚀面和 $\{311\}$ 快腐蚀面的竞争作用,还利用了台阶的面对面和背靠背的 $\{311\}$ 侧面的推移及对削作用.该技术的设计灵活,可控性好,有望在硅的微机械加工中得到广泛应用.

参 考 文 献

- [1] K. E. Peterson, Proc. IEEE, 1982, **70**: 420.
- [2] Minhang Bao, Lianzhong Yu and Yan Wang, Sensors and Actuators A, 1991, **28**: 105.
- [3] R. H. Johnson, S. Karbassi and U. Speldrich, Sensors and Actuators A, 1992, **28**: 93.
- [4] S. Hein, V. Schlichting and E. Obermeier, Digest of Technical papers, Transducers'93, 1993: 628.
- [5] 李昕欣,鲍敏杭,沈绍群,半导体学报, 1996, **6**: 470.
- [6] X. Li, M. Bao and S. Shen, Sensors and Actuators A, 1996, **57**: 47.
- [7] Takao Sasayama *et al.*, Digest of technical papers, Transducers'95, 1995, **2**: 687.

Novel "Masked-Maskfree" Etching Technology for Silicon Multilevel Microstructures

Li Xinxin, Yang Heng, Shen Shaoqun and Bao Minhang

(Sensor research Lab, Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433
State Key Laboratories of Transducer Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Received 11 April 1997, revised manuscript received 10 August 1997

Abstract A novel bulk micromachining technique for silicon multilevel microstructures is described. Based on maskfree anisotropic etching principles in aqueous KOH, various shapes of multilevel structures, with $\{311\}$ sidewalls and $\langle 110 \rangle$ edges, can be formed on (100) wafer by a mask pattern with a masked-maskfree etching. The technique breaks the limitation of conventional anisotropic etching and makes bulk micromachining technology more versatile. It is promising for applications in structural formation of silicon micro-electro-mechanical structures.

EEACC: 2550

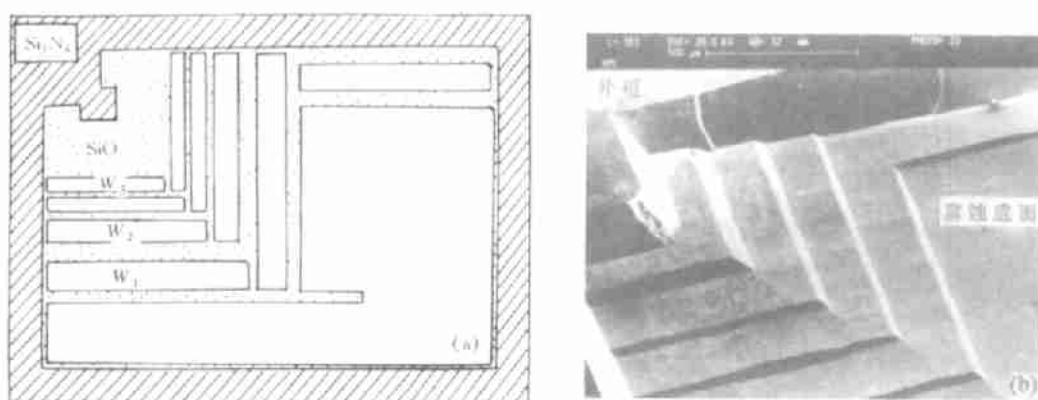


图 2 多层阶梯结构

(a) 多层阶梯结构的掩模布局示意图；(b) 多层阶梯结构的 SEM 照片

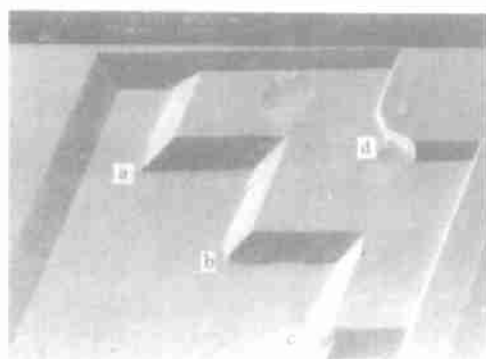


图 3 无掩模腐蚀凸角削角的 SEM 照片



图 4 同时形成的不同膜厚的硅杯阵列结构的 SEM 照片



图 5 单面梁(膜)浅岛压力传感器结构的 SEM 照片