

硅各向异性腐蚀〈110〉条补偿图形 腐蚀前沿控制*

鲍敏杭 沈绍群 胡澄宇 马青华

(复旦大学电子工程系传感器研究室 上海 200433)

Chr. Burrer, J. Esteve, J. Bausells, S. Marco

(西班牙国家微电子中心)

摘要 本文报道了一种由〈110〉条组成的,用于(100)硅 KOH 各向异性腐蚀的凸角补偿图形。该图形的设计特点是利用不对称的分枝和端点弯头对条上腐蚀前沿实现控制使补偿后凸角的削角大大减小。文中给出常用补偿图形的有效补偿长度和临界补偿时的削角比。该方法已应用于微机械硅加速度传感器的掩模设计。

EEACC: 2550, 2550E

1 引言

硅微机械加工在固态传感器和执行器的研制和生产中已广泛使用。在硅微机械加工的各种技术中,(100)硅的各向异性化学腐蚀是应用最广的一种技术。利用化学腐蚀剂对硅{111}面的腐蚀速率远比其它晶面为低的特点,采用 SiO₂ 或 Si₃N₄ 作掩模,人们可以加工出多种微机械结构。在固态压力传感器的生产中人们早就用这种方法制作边沿〈110〉方向的矩形平硅膜。在利用应力集中的压力传感器,在矩形平膜中还需要形成矩形的岛。实践表明,利用边沿〈110〉方向的矩形掩模,无法形成台面为矩形的岛,因为在{111}侧面相交的凸角处会出现其它高腐蚀速率的晶面,因而使凸角掩模下的硅受到钻蚀。钻蚀晶面因腐蚀液而异,如 EPW 的钻蚀晶面为{211}面^[1], KOH 腐蚀液的钻蚀晶面则为{411}面等^[2]。用 KOH 腐蚀液时,凸直角掩模下方的硅表面被钻蚀,形成由〈410〉线段构成的,夹角约为 152° 的钝角。〈410〉腐蚀前沿沿〈110〉边方向的切进速率越快,随腐蚀深度增加顶角的变形也越厉害。因此我们将〈410〉前沿沿〈110〉边的切进速率与垂直硅表面腐蚀速率之比定义为削角速率 k。KOH 腐蚀液的 k 值随浓度和温度等参数而略有变化,在典型的条件下约为 2.7。

为了减少或消除钻蚀的影响,人们在凸角掩模上附加补偿图形,补偿图形首先受到钻蚀。适当的设计可以在一定的腐蚀深度下(即临界补偿深度时)获得接近于理想的凸直角结构。对 KOH 腐蚀液,常用的补偿图形有〈110〉方块和〈100〉矩形条,如图 1(a)和(b)所示。

* 国家八五科技攻关和国家自然科学基金资助项目

1993 年 3 月 10 日收到初稿, 1993 年 7 月 14 日收到修改稿

<110>方块补偿是在顶角处叠加一个中心在顶角处,边长为 $2a$ 的正方形。根据 KOH 的 k 值, a 大致等于腐蚀深度 H 。在临界补偿条件下,掩模下的附加图形被完全钻蚀而形成顶点为 A 的理想突角。但此时顶角附近的{111}侧面会被高腐蚀速率晶面所取代而变形,但只要变形的区域不大,对许多应用还是允许的。

<100>矩形补偿是在顶角上叠加一个宽为 B 、长为 L 、沿<100>方向的矩形。腐蚀后矩形两边形成{100}垂直侧壁。因为侧壁的腐蚀速率与底面相同,因此条宽 B 应等于 $2H$ 。但为了防止矩形自由端出现的钻蚀前沿过早的到达被补偿的突角,长度 L 必需大于 $3.2H$ 。用<100>矩形补偿可以得到十分理想的突角,但矩形面积很大,许多情况下无法使用。

上述两种补偿图形都要占据凸角两侧的区域,其线度比 H 更大,因此它们只适用于基本上孤立的凸角。在许多情况下,诸如在微机械加速度传感器的质量块设计中,我们会遇到间距很近的相邻突角。此时上述两种补偿方法都不适用,必须寻找新的补偿方法。

2 <110>条的补偿原理

有人曾考虑用附加在被补凸角一侧的<110>条进行凸角补偿,如图 2 所示。由于补偿用的<110>条只利用突角一侧的空间,因此有可能用于相邻突角的补偿。但这种简单的<110>条补偿方法存在削角大和有效补偿长度不足的问题,因而未能实用。其原理可以说明如下。

如图 2 所示,在腐蚀过程中<110>条的二个自由端 C 和 D 出现钻蚀,各产生两个<410>前沿。每个<410>前沿与其最接近的<100>方向夹角 α 为 $\operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{4} = 14.04^\circ$, 因此与最

接近的<110>方向的夹角 β 为 30.96° 。两个突角上出现的<410>前沿(点划线)都沿着各自的突角分角线(虚线)前进。在两个分角线的交点,中间二个前沿已完全消失,二个外侧的前沿再沿着<110>条的中心线向被补的突角行进。当左侧的前沿遇到岛边时(此时腐蚀的轮廓为图 2 的 EFA),它的进一步前进受到岛边{111}面的阻挡而逐渐缩减直至消失。在补偿用<110>条耗尽时,前沿的轮廓为 EA'G,即岛角已被削去直角三角形 A'AG, $A'A = \frac{1}{2}B$, $AG =$

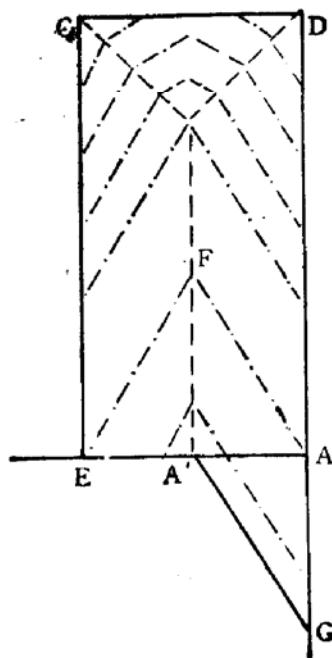


图 2 简单<110>条补偿

$0.833B$ 。我们定义 AA' 与条宽 B 之比为削角比 U , 则 $U = 0.5$ 。减小条宽可以减小削角,但考虑到侧向腐蚀作用, B 往往取在 $0.2H$ 到 $0.4H$ 之间,不能太小。为了消除这种削角作用,文[3]采用了一些复杂的对称设计,或者只是把

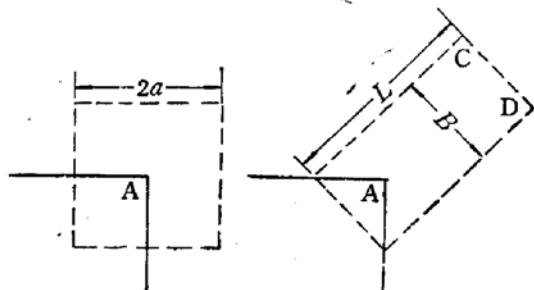


图 1 <110>方块和<100>矩形条补偿图形

$\langle 110 \rangle$ 条附加在 $\langle 110 \rangle$ 方块的三个突角上起补充作用。显然，这种设计就不再能用于相邻凸角的补偿。

$\langle 110 \rangle$ 条的有效补偿长度是 $\langle 110 \rangle$ 条表面被完全耗尽时， $\langle 410 \rangle$ 前沿沿着 $\langle 110 \rangle$ 边行进的总距离，即 $\langle 110 \rangle$ 条的有效补偿长度 L_{eff} ，与临界补偿深度 H_c 的关系为 $L_{\text{eff}} = kH_c$ 。考虑到条宽 B 的影响，图 2 图形的有效补偿长度为

$$L_{\text{eff}} = L + 0.833B \quad (1)$$

式中第二项对应于线段 FA' 的长度。一般讲， B 比 L 要小得多，因此腐蚀深度为 H ，则 L 近似为 kH ，对 KOH 腐蚀液时为 $2.7H$ 。这个长度很大，往往超过了突角到其相邻图形间的距离（在加速度传感器的情况下，即岛到边框的距离），因而无法实现。

3 $\langle 110 \rangle$ 条腐蚀前沿的控制

为了在有限的空间内增大 $\langle 110 \rangle$ 条沿的有效补偿长度，可以在离开岛角适当距离处将 $\langle 110 \rangle$ 条转弯到平行岛边的方向上来。为了防止转弯形成新的凸角，转弯要在两个方向对称的进行成为端点分枝，如图 3(a) 所示。原则上分枝可多次进行以增大有效补偿长度，但考虑到腐蚀底面不允许出现 V 形尖底，分枝只进行一到二次。如 $\langle 110 \rangle$ 条在岛与框之间的中点附近分枝，即 $L_1 = \frac{1}{2}d$ (d 为岛与框的间距)。在不出现 V 型槽的条件下， L_2 最大为 $0.5d \times 2.7/\sqrt{2} = 0.95d$ 。在条宽 B 较小时，对应有效补偿长度为 $1.45d$ ，对应的临界补偿腐蚀深度为 $H_c = 0.54d$ 。比简单直条情况的 $0.37d$ 要大得多。后面还会看到，由于 $\langle 110 \rangle$ 条的有限条宽，实际上 H_c 可以达到 $0.6d$ 以上，与 d 对应的 V 型槽深度 $0.7d$ 很接近。

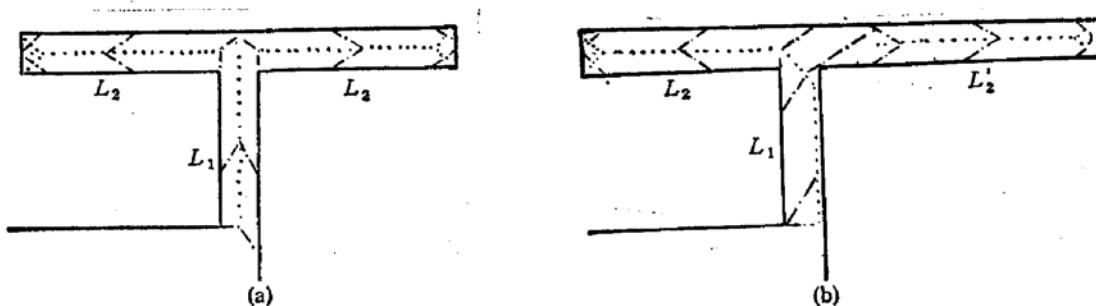


图 3 $\langle 110 \rangle$ 条的(a)对称分枝(b)不对称分枝

图 3(a) 所示的分枝增加了有效补偿长度，但它的削角比仍与直条时一样为 0.5。为了减小削角比，我们提出了一种控制腐蚀前沿的方法，即采用图 3(b) 所示的不对称分枝，使凸角外侧的条长 L_2' 大于凸角一侧的条长 L_2 。此时，左右二个自由端的四个凸角都会产生腐蚀前沿，但来自短枝的腐蚀前沿率先到达分枝点，向右转弯后向被补凸角行进。由图 3(b) 可见， $\langle 110 \rangle$ 主干条上的腐蚀前沿不再对称了，左边的腐蚀前沿占主导地位。几何分析表明 $(L_2' - L_2)/B$ 越大，形成突角的削角越小，在 $L_2' - L_2$ 为 $2.67B$ 时，削角达到最

小值, $U = 0.1$ 。此时,整个图形的有效补偿长度为 $L_{\text{eff}} = L_1 + L_2 + 2.83B$ 。反之如 L_2 比 L'_2 大,则削角比增大,可以达到 0.9。分析表明,对于多次分枝的情况,最接近被补凸角的分枝起最主要的作用。一般的设计规则是:为了获得尽可能低的削角比,<110>主干条上的腐蚀前沿应当来自与岛同侧的分枝。

控制<110>条上腐蚀前沿的另一种方法是在<110>主干条的自由端的一侧附加一个短的弯头,如图 4 所示。右侧的弯头有消除主干条上右侧前沿的作用,因而减小了削角比。分析表明,削角比随 L_2 的加长而减小,在 L_2 达到 $2.67B$ 时降为零,比不对称分枝具有更好的效果,但它基本上不能增加有效补偿长度。对一些实用的<110>设计,其有效补偿长度 L_{eff} 和形成凸角的削角比都在表 1 中列出。

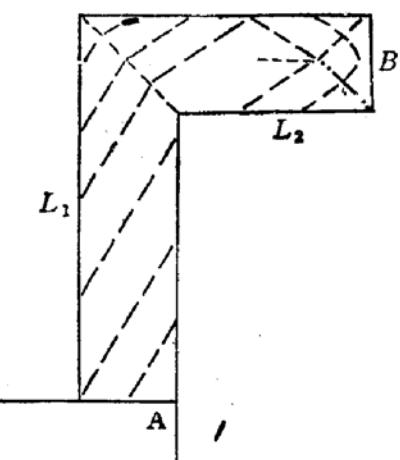


图 4 用端头分枝减小削角比的设计

表 1 几种常用补偿图形及其 L_{eff} 和 U 的值

补偿图形	L_{eff}	U
	$L_1 + L_2 + 2.83B$	0.1
	$L_1 + L_2 + L_3 + 4.3B$	0.18
	$L_1 + L_2 + L_3 + 5.37B$	0.02
	$L_1 + 1.87B$ ($L_2 > 2.83B$)	0

4 实验及结果

对于上节所述的用分枝和弯头对〈110〉条上腐蚀前沿实现控制的方法,我们设计了一块试验版,其中〈110〉条宽取 $60\mu\text{m}$ 。利用试验版加工样品进行实验。(100)高阻硅片在热生长约 2000\AA 氧化层后用 LPCVD 淀积厚约 1500\AA 的 Si_3N_4 , 然后光刻形成腐蚀掩模图形。光刻时用硅片的切边作为〈110〉方向的基准。实验使用 40% 重量比的分析纯 KOH 水溶液,用恒温水浴加热,温度为 62°C 。实验结果表明:〈110〉条表面腐蚀前沿的发生、发展和运动的规律与上节的分析十分一致。证明了用分枝和弯头方法控制腐蚀前沿,因而获得良好的凸角补偿质量的方法是可行的。

图 5(a)是用分枝方法控制〈110〉条表面腐蚀前沿的试验图形(见图版 I)。图 5(b)是硅片经过一定时间腐蚀后,分枝部分已被耗尽之后,〈110〉主干条上的腐蚀前沿的照片(见图版 I)。可以看到,补偿图形 a 是对称分枝情况,对应的主干条上的腐蚀前沿是左右对称的〈410〉线段,它与无分枝的〈110〉直条补偿的结果相同,最终形成的凸角的削角比将为 $U = 0.5$ 。图形 b 和 c 一样,是不对称分枝的图形,其短分枝与岛处于同侧。腐蚀后主干条上腐蚀前沿不再对称,在短分枝或岛的一侧的〈410〉前沿占主导地位。因此最终可形成削角比 U 接近于 0.1 的凸角。图形 d 情况与 b 或 c 相反,短分枝与岛处于主干条的异侧。因此主干条上岛侧的腐蚀前沿基本消失,最终形成 U 接近于 0.9 的凸角。

图 6(见图版 I)是用弯头控制〈110〉条表面腐蚀前沿实验的照片。照片上 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 掩模被蚀刻后仍悬挂在,其轮廓清晰可见。弯头与岛位于〈110〉条的异侧,弯头的长度与条宽相同。可以看到,〈110〉主干条上的腐蚀前沿由二个不对称的线段组成,右侧(即岛侧)的线段占有明显优势。因此,进一步腐蚀后可形成近乎理想的突角。

我们也对〈110〉条前端腐蚀底面的前沿进行了观察,观察到了与表面不同的规律。以一个[110]条为例,经过一定时间腐蚀后,表面腐蚀前沿为[410]和[140]线段,它们在尖端夹角为 62° (图 2 中的 $\angle EFA$)。但在腐蚀底面,前沿是由曲折的短线段组成,但其包络为直线;在尖端前部,基本上仍为[410]和[140],但在后部两侧就成了 $[4\bar{1}0]$ 和 $[1\bar{4}0]$ 线段。随着腐蚀时间增加,两侧的 $[4\bar{1}0]$ 和 $[1\bar{4}0]$ 包络线逐渐扩展而前端的[410]和[140]包络缩短而消失。一般在腐蚀深度达到 $60\text{--}80\mu\text{m}$ 后,底部腐蚀前沿就完全由 $[4\bar{1}0]$ 和 $[1\bar{4}0]$ 包络线构成了,此时尖端顶角成了约 118° 。由于表面的腐蚀前沿不平行于底面的腐蚀前沿(包络),腐蚀侧面不可能是一个平面。可见,用〈110〉条补偿时我们可以通过腐蚀前沿控制的办法使表面凸角的形状得到很好的控制,但底面和侧面就不那么理想了。但对相邻凸角,〈110〉条补是唯一的选择,而顶角附近的侧面和底部有一定的不规则区域对大部分应用没有影响。

我们在微机械硅加速度传感器的研制中,为了保证梁上应力均匀,梁不连在岛的顶角上,而是向岛的中间方向移动了一些。为了充分利用梁外的区域,质量块不是规则的矩形,而有一块较狭的半岛,其前端就有两个相距仅约 $100\mu\text{m}$ 的凸角。图 7(a)(见图版 I)是硅片背面这一部分的照片,从中我们可以看到两个不对称分枝的〈110〉条补偿图形。图 7(b)(见图版 I)是硅片背面经过 $160\mu\text{m}$ 深的腐蚀后的照片,可以看到两个临界补偿的凸

角,底面虽不是理想的直角但质量损失甚少。在我们的加速度传感器中,<110>条补偿图形共有十六处之多,都获得了很好的效果。

致谢 部分工作在西班牙巴塞罗那的西班牙国家微电子中心(CNM)完成并得到西班牙外交部中国—西班牙科技合作计划和西班牙教育部国外专家基金的资助。

参 考 文 献

- [1] K.E. Bean, IEEE Trans. Electron Devices, 1978, ED-25: 1185—1193.
- [2] G.K. Mayer, H.L. Offereins, H. Sandmaier and K. Kuhl, J. Electrochem. Soc., 1990, 137: 3947—3950.
- [3] H. Samdmaier, H.L. Offereins, K.Kuhl and W. Lang, Corner Compensation Technique in Anisotropic Etching of (100)-Silicon Using Aqueous KOH, Technical Digest of Transducers'91, June, 1991, San Francisco, CA, USA, pp. 456—459.

Etching Front Control of <110> Strip Compensation Pattern for KOH Anisotropic Etching of Silicon

Bao Minhang, Shen Shaoqun, Hu Chengyu, Ma Qinghua

(Sensor Research Lab, Dept. of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Chr. Burrer, J. Esteve, J. Bausells and S. Marco

(National Center of Microelectronics, Barcelona, Spain)

Abstract Corner compensation patterns composed of <110> strips for KOH anisotropic etching of (100) silicon are proposed. These patterns make use of uneven branching and turning at the end of a <110> strip to control the etching front on the strip. Four practical compensation patterns are presented with their effective compensation length and undercutting ratio. Applications have been made in micro-mechanical accelerometer.

EEACC: 2550, 2550E