

(100)Si 在 KOH 中各向异性 腐蚀的凸角补偿新方法

张庆鑫 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文对 G. K. Mayer 等人提出的,用(100)条对(100)Si 凸角补偿的方法进行了深入研究,指出了该方法在腐蚀槽较窄时的局限性,在此基础上提出了一种改进的新方法,并给出了理论分析及实验结果.

EEACC: 7230, 2575

1 引言

采用 KOH 溶液对 Si 进行的各向异性腐蚀是微机械加工中的一项重要技术. 利用它可以形成方形, 矩形的 Si 膜片以及其它复杂的三维结构, 在传感器, 执行器及微机械制作领域具有非常广泛的应用. 它的缺点是(100) Si 在 KOH 中进行各向异性腐蚀时凸角结构的削角现象非常严重, 若不加以补偿, 完整的凸角结构难以获得. 对此, 人们采取了各种各样的补偿措施, 如 B. Puers 等人在凸角上附加了方形, 矩形以及三角形掩膜图形^[1], M. Bao 等人在凸角上附加了<110>条形掩膜^[2], G. K. Mayer 等人在凸角上附加了<100>条形掩膜^[3], 目的都是为了实现削角的补偿. 这几种凸角补偿方法各有优缺点. 在第一种方法中, 补偿的图形需要占据比较大的面积, 第二种补偿方法中采用的<110>条可以设计得比较窄, 补偿图形所占的面积也不大, 但在 Si 片纵向腐蚀比较深时,<110>条需设置得很长, 且需转折多次, 而且采用此种方法形成的凸角结构并非很完整, 腐蚀槽底面不很平坦. 第三种方法中采用了<100>条,<100>方向的切削与纵向(100)方向具有同样的腐蚀特性, 因此, 它可以获得非常完整的凸角结构以及平坦光洁的腐蚀底面, 但当用以形成凸角结构的腐蚀槽掩膜宽度较小时, 这一方法(以及上述其它两种方法) 存在一定的局限性. 本文将在第三种方法的基础上提出一种改进的新方法, 以克服它们的不足.

* 国家自然科学基金资助项目

张庆鑫 男, 1965 年生, 博士生, 从事固态传感器与微机械加工技术研究
刘理天 男, 1947 年生, 教授, 从事微电子学, 传感器与微机械加工技术研究
李志坚 男, 1928 年生, 教授, 院士, 从事微电子学与系统集成技术研究

1995 年 10 月 13 日收到初稿, 1996 年 1 月 10 日收到修改稿

2 补偿原理

采用 $\langle 100 \rangle$ 条的补偿结构如图1所示, 它在 $\langle 110 \rangle$ 方向形成的凸角上叠加了一个 $\langle 100 \rangle$ 条, 条的另一端为自由端。在KOH中, $\langle 100 \rangle$ 条在 $\langle 100 \rangle$ 面上沿三个方向被切削, 即侧向 $\langle 100 \rangle$, 侧向 $\langle 410 \rangle$ 及自由端的 $\langle 410 \rangle$ 方向。当该条的长度满足一定要求时, 可以使其中后两种切削首先停止, 最后只余下条两侧沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的切削, 因其腐蚀速度与纵向 $\langle 100 \rangle$ 相同。所以若当此条宽度二倍于腐蚀深度时, 凸角将被完整地保留。

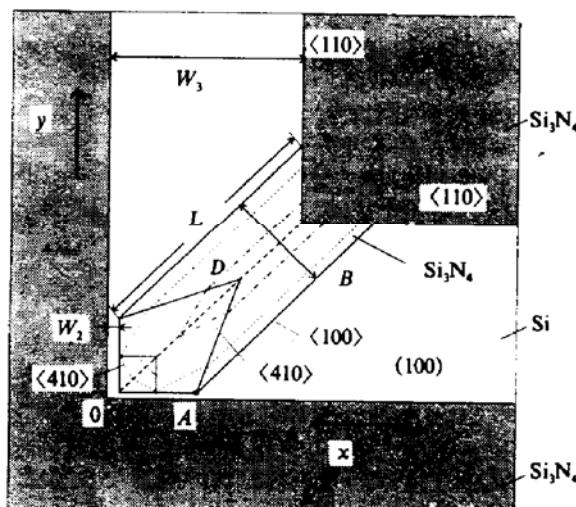


图1 带 $\langle 100 \rangle$ 条的凸角补偿结构(改进前)

当腐蚀槽的宽度较小时, $\langle 100 \rangle$ 条的长度受到了限制, 因此当腐蚀深度仍然较深时, 条长难以满足要求。这时 $\langle 100 \rangle$ 条的切削过程将与图1不同, 此时最后完成切削的是自由端的 $\langle 410 \rangle$ 方向或侧面的 $\langle 410 \rangle$ 方向, 对凸角的削角比较严重。对此, G. K. Mayer 等人的改进方法是将 $\langle 100 \rangle$ 条的自由端与掩膜的另一端用一窄条连接, 用以限制自由端 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削, 在 $\langle 100 \rangle$ 条的两侧附以 $\langle 110 \rangle$ 窄条, 以限制侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削。通过延迟上述两个 $\langle 410 \rangle$ 面的腐蚀起始时间, 使腐蚀最终能以侧面 $\langle 100 \rangle$ 面终止。它的不足之处是补偿结构较为复杂, 且自由端因有连接条的存在使得腐蚀槽底面不够平坦, 槽的角底部易有残余的Si, 无法保证凸角结构的完整性。

3 分析

对于 $\langle 100 \rangle$ 条的长度应该满足的条件, 以及在腐蚀槽宽度较小时上述补偿方法受到的限制, 可通过建立 $\langle 100 \rangle$ Si各向异性腐蚀的二维模型来进行分析。首先在图1中设0点为坐标原点, 横向 $\langle 110 \rangle$ 方向取为x轴, 纵向 $\langle 110 \rangle$ 方向取为y轴, $\langle 100 \rangle$ 条边缘 $\langle 110 \rangle$ 方向与 $\langle 100 \rangle$ 方向的交点A的坐标设为 (x_1, y_1) , 通过推导可以得出在腐蚀过程的某一时刻t, 侧向 $\langle 100 \rangle$ 与侧向 $\langle 410 \rangle$ 腐蚀前锋与 $\langle 100 \rangle$ 面交线的方程分别为:

$$y_{1t} = x + 1.414V_{\langle 100 \rangle} t + b_1 \quad (1)$$

$$y_{2t} = 0.6x + 1.166V_{\langle 410 \rangle} t + b_2 \quad (2)$$

其中 b_1, b_2 为与A点坐标有关的常数, $b_1 = y_1 - x_1$, $b_2 = y_1 - 0.6x_1$, $V_{\langle 100 \rangle}, V_{\langle 410 \rangle}$ 分别为 $\langle 100 \rangle$ 面内 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 410 \rangle$ 方向的腐蚀前锋在腐蚀过程中的移动速度。在腐蚀过程中, 上述两线交点的轨迹应满足: $y_{1t} = y_{2t}$, 通过推导可得其轨迹方程为:

$$x = (2.915V_{\langle 410 \rangle} - 3.535V_{\langle 100 \rangle})t + x_1 \quad (3)$$

$$y = (2.915V_{\langle 410 \rangle} - 2.121V_{\langle 100 \rangle})t + y_1 \quad (4)$$

该直线与 $\langle 100 \rangle$ 条的对称轴即直线 $y=x$ 的交点D点的坐标为:

$$x_D = y_D = (2.062V_{\langle 410 \rangle}/V_{\langle 100 \rangle} - 2.500) \cdot (x_1 - y_1) + x_1$$

在图1中 $x_1 = B/1.414 + w_2$, $y_1 = w_2$ 代入上式可得:

$$x_D = y_D = (1.458 V_{(410)} / V_{(100)} - 1.061) \cdot B + w_2 \quad (5)$$

其中 B 为 $\langle 100 \rangle$ 条的宽度, w_2 为 $\langle 100 \rangle$ 条与另一侧掩膜之间的间距, 若设凸角与两侧掩膜间的间距为 w_3 , 可知当 $x_D < w_3$ 时, 在腐蚀过程中, 自由端 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削过程首先停止, 而后, 侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向的腐蚀也停止, 腐蚀最终以侧向 $\langle 100 \rangle$ 方向结束, 这样可以获得最佳的凸角结构. 当 $x_D = w_3$ 时, 上述两种腐蚀过程同时停止, 最终也能获得较好的凸角结构, 而当 $x_D > w_3$ 时, 侧向 $\langle 100 \rangle$ 方向的腐蚀率先停止, 最终结束的侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向腐蚀将使凸角结构严重受损.

由此可知, 在上述腐蚀过程中, 为获得最佳凸角结构, 腐蚀槽的宽度应满足如下条件:

$$w_3 \geq (1.458 V_{(410)} / V_{(100)} - 1.061) B + w_2 \quad (6)$$

将 $w_3 = L / 1.414 + w_2$ 代入上式, L 为 $\langle 100 \rangle$ 条的长度, 可得 $\langle 100 \rangle$ 条的长宽之间应满足的关系为:

$$L \geq (2.062 V_{(410)} / V_{(100)} - 1.500) B \quad (7)$$

从 $(100)Si$ 各向异性腐蚀机理可知, 腐蚀深度为 D_e 时, 如果腐蚀最终形成的槽底宽度为 w' , 则 w_3 应满足:

$$w_3 = 1.414 D_e + w' \quad (8)$$

将(8)式代入(6)式并取 $B = 2D_e$ 可得: $w' - w_2 = (2.916 V_{(410)} / V_{(100)} - 3.536) \cdot D_e$, 其中 $V_{(410)} / V_{(100)}$ 与 KOH 浓度有关而与温度无关, 当 KOH 浓度在 15%~50% 之间变化时 $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.3 \sim 1.6$ ^[3]. 取 $w = (2.916 V_{(410)} / V_{(100)} - 3.536) \cdot D_e$, w 与 $V_{(410)} / V_{(100)}$, D_e 之间关系曲线如图 2 所示. 从中可看出, w 随 $V_{(410)} / V_{(100)}$, D_e 的增加均线性增加, 这表明随着 $V_{(410)} / V_{(100)}$ 以及 D_e 的增加, 形成凸角所需的腐蚀槽宽度也将不断增加. 当 $D_e = 300 \mu m$, $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.4$ 时, $w = 163.9 \mu m$. 因 $w' - w_2 \geq w$, $w_3 = 1.414 D_e + w'$, 所以 $w_3 \geq w_2 + 588.1 \mu m$, 如果 w_3 不满足该条件, 即 $w_3 < w_2 + 588.1 \mu m$ 时, 凸角结构将难以获得, 此结果说明了上述凸角补偿方法的局限性, 即当腐蚀槽的宽度很窄时, 不易获得良好的凸角结构.

4 改进措施

针对上述问题, 笔者提出了如图 3(见图版 I)所示的改进结构, 即加宽 $\langle 100 \rangle$ 条的宽度, 使其大于腐蚀深度的二倍, 使腐蚀过程最终以侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向终止. 这种补偿方法适用于岛的尺寸比较大而腐蚀槽的宽度又比较小的情况下, 因为 $\langle 100 \rangle$ 条的加宽, 也将使补偿条的面积加大. 采用改进后的补偿方法, $\langle 100 \rangle$ 条长度受到的限制将大大减小. 因此, 在腐蚀槽宽度极小的情况下, 也可以获得良好的凸角结构, 从而克服前述补偿方法的不足.

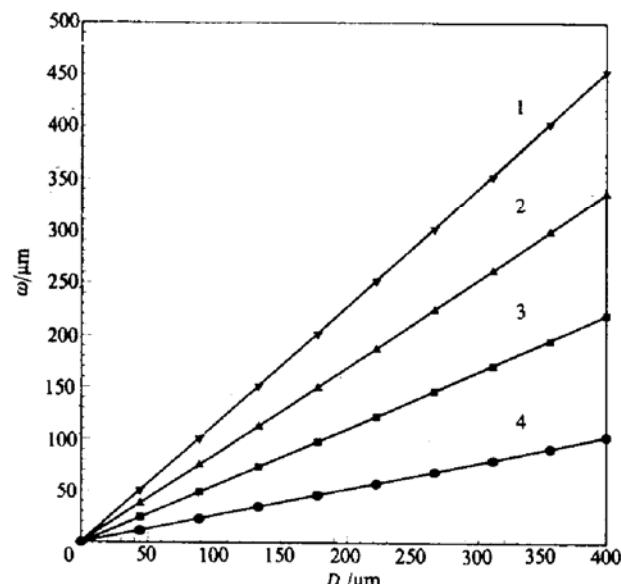


图 2 w 与 $V_{(410)} / V_{(100)}$, D_e 之间的关系曲线(改进前)

1. $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.6$; 2. $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.5$;
3. $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.4$; 4. $V_{(410)} / V_{(100)} = 1.3$.

图 3 中 L_e 为获得完整的凸角结构时侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向的有效移动距离,采用前述同样的分析方法可得:

$$L_e = 0.857(0.424B - 0.4w_2 + 0.4w_3) \quad (9)$$

$$L_e = V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} \cdot D_e \quad (10)$$

通过这两个方程即可以获得 $\langle 100 \rangle$ 条的有关结构参数.

在这种补偿方法中,两种主要的腐蚀过程分别是侧向 $\langle 410 \rangle$ 和自由端 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削,如果后者对前者构成威胁,即当腐蚀过程以端头 $\langle 410 \rangle$ 方向切削终止的话,凸角结构也难以获得.对此情况可做如下分析,设图 3 中 E 点为上述两种 $\langle 410 \rangle$ 方向腐蚀前锋交点轨迹与 $\langle 100 \rangle$ 对称轴的交点,

$$x_E = w_2 + 0.354 B \quad (11)$$

对由 $\langle 110 \rangle$ 方向构成的凸角的削角理论与实验分析中知道,在上述补偿结构中,若想获得完整的凸角结构,应满足:

$$x_E \leq w_3 - 0.530 D_e \quad (12)$$

将(9)~(11)式代入上式可得:

$$w_3 \geq (0.398 + 0.730 V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle}) D_e + w_2 \quad (13)$$

将(8)式代入(13)式可得 $w' - w_2 \geq (0.730 V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} - 1.016) D_e$, 同样取 $w = (0.730 V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} - 1.016) D_e$, 做 w 与 $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle}$, D_e 之间的关系曲线如图 4(见图版 I)所示.从图中可以看出, w 与 $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle}$, D_e 之间呈现不同的变化趋势, 当 $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} = 1.3$ 时, w 随 D_e 的增加而线性减小, 表明 w' 可以设计的很小甚至为零, 当 $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} = 1.4$ 时, w 随 D_e 增加而线性增加, 但变化幅值不大.当 $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} = 1.4$, $D_e = 300 \mu\text{m}$ 时, $w = 1.8 \mu\text{m}$, 即 $w' \geq w_2 + 1.8 \mu\text{m}$, 将 w' 代入(8)式可得 $w_3 \geq w_2 + 426 \mu\text{m}$, w_2 可做得很小, 如 $w_2 = 5 \mu\text{m}$, 由此可见, 采用改进后的方法, 腐蚀槽的宽度可大大减小, 也即在腐蚀槽很窄的情况下, 同样可在腐蚀深度较深的条件下获得良好的凸角结构, 这即克服了改进前方法的不足.

如果凸角周围的腐蚀槽底宽度进一步减小,或者带有凸角的岛四周仅由 V型槽围成,则腐蚀槽底宽度 w' 将更小直至 $w' = 0$, 此时(13)式的条件不能满足.这时我们只要对上述补偿结构稍加改动即可,即在 $\langle 100 \rangle$ 条的自由端再叠加一个带自由端的 $\langle 110 \rangle$ 条,以此来延缓 $\langle 100 \rangle$ 条自由端 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削起始时间,从而使(12)式得以满足,最终获得良好的凸角结构.

5 结果与讨论

采用两种不同的 $\langle 100 \rangle$ 条补偿结构,经 KOH 溶液各向异性腐蚀获得的凸角结构如图 5、图 6 所示(见图版 I),其中图 5 是采用改进前的补偿方法腐蚀得到的凸角结构,图 6 为采用改进的 $\langle 100 \rangle$ 条补偿方法腐蚀得到的凸角结构.二者共同的设计参数为: $V_{\langle 410 \rangle} / V_{\langle 100 \rangle} = 1.4$, $D_e = 310 \mu\text{m}$, $w_3 = 490 \mu\text{m}$, $w_2 = 40 \mu\text{m}$.图 5 中的条宽为腐蚀深度的二倍即 $B = 620 \mu\text{m}$,图 6 中 $B = 790 \mu\text{m}$.从图 5 中可以看出,凸角的削角比较严重.这是由于 $\langle 100 \rangle$ 条的长度不满足前述条件,由侧向 $\langle 410 \rangle$ 方向切削形成凸角,而后端头 $\langle 410 \rangle$ 方向的切削致使凸角严重受损.从图 6 中可以看出,腐蚀槽底部平坦,岛角底部稍有切削.据分析这可能是两方面因素造成的,一是腐蚀时间过长, D_e 超过了设计值 $310 \mu\text{m}$,使已获得的凸角遭受了过

腐蚀,开始出现削角。二是 KOH 溶液浓度发生了变化,使 $V_{(410)}/V_{(100)}$ 超过了设计值,使凸角遭到切削。解决上述问题的方法有两个,一是严格控制腐蚀时间,使之不要偏离设计值,二是保证 KOH 浓度不发生大的变化,即保证 $V_{(410)}/V_{(100)}$ 为设计值基本不变。由此,完整的凸角结构将很容易获得。

综上所述可以看出,当腐蚀槽的宽度比较小时,采用新的凸角补偿方法同样可以获得良好的凸角结构。这既吸取了 G. K. Mayer 等人提出的补偿结构的优点,即获得的凸角结构完美,同时又克服了其不足,消除了它在腐蚀槽比较窄的情况下的限制。

6 结论

(100)Si 在 KOH 腐蚀过程中的削角现象使微机械加工中凸角结构的获得变得很难,为了解决这一问题,人们在凸角上附加了各种各样的掩膜图形结构,以实现对凸角的补偿。所加的补偿图形都需要占据一定的面积。因此,在实际应用中,如果用于腐蚀凸角的腐蚀槽比较窄时,前述的几种补偿方法都会遇到一些问题。本文的工作是针对腐蚀槽比较窄而岛的结构尺寸又比较大的情况开展的凸角补偿研究。理论分析及实验结果表明,采用改进的〈100〉条补偿结构,以侧向〈410〉方向取代侧向〈100〉方向作为〈100〉条的腐蚀终止方向,可以在腐蚀槽设计的很窄的情况下,同样获得良好的凸角结构。这既吸取了 G. K. Mayer 等人提出的补偿结构的优点,同时也弥补了其不足。

参 考 文 献

- [1] B. Puers et al., Sensors and Actuators, 1990, A21~23 : 1036~1041.
- [2] M. Bao et al., Sensors and Actuators, 1993, A37~38 : 727~732.
- [3] G. K. Mayer et al., J. Electrochem. Soc., 1990, 137 (12) : 3947 ~ 3951.

New Method of Convex Corner Compensation in Anisotropic Etching of (100) Si in KOH

Zhang Qingxin, Liu Litian and Li Zhijian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 13 October 1995, revised manuscript received 10 January 1996

Abstract The method of convex corner compensation with 〈100〉 bar for silicon presented by G. K. Mayer, et al has been investigated. The limitations of the method is indicated, and a modified method is put forward, the results of theoretic analysis and experiment have been presented.

EEACC: 7230, 2575