

用于高灵敏度红外探测器的超薄硅膜的研制*

董典红, 徐晨, 邹德恕, 李兰, 杨道虹, 张剑铭, 阳启明, 沈光地

(北京工业大学 电子与信息控制工程学院 北京市光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要:超薄、平整的硅膜对于制作高灵敏度红外探测器是非常重要的。这种超薄硅膜的各向异性腐蚀技术,包括有机溶液 EPW 和无机溶液 KOH 及 KOH+IPA(异丙醇)。从腐蚀速率、腐蚀表面质量、腐蚀停特性、腐蚀边缘形貌及腐蚀工艺的角度分析比较了两种腐蚀系统,分别制作出了约 1 μm 厚的平整超薄硅膜,并研究了不同掩膜材料在腐蚀液中的抗蚀性,为高灵敏度红外探测器的制作奠定了工艺基础。

关键词:超薄硅膜; 各向异性腐蚀; 高灵敏度红外探测器

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0023-04

Fabrication and research of very thin Si membrane for the high sensitivity infrared detector*

DONG Dian-hong, XU Chen, ZOU De-shu, LI Lan, YANG Dao-hong,
ZHANG Jian-ming, YANG Qi-ming, SHEN Guang-di

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing
University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Very thin and flat silicon membrane is the most important part for fabricating high sensitivity infrared detectors. The investigation of anisotropic etching of silicon with organic (EPW) and inorganic (KOH, KOH+IPA) solutions is presented to fabricate this very thin Si membrane. These two etching technologies are compared in point of the etching rate, the quality of etched surface, etch-stop character, the morphology of etching edges and etching procedures. Very thin silicon membranes of less 1 μm thick are fabricated with these technologies respectively. The mask materials resistant in etching solutions are presented. These works provide the useful technology foundation for the fabrication of the high sensitivity infrared detector.

Key words: Very thin Si membrane; Anisotropic etching; High sensitivity infrared detector

0 引言

碱性溶液对单晶硅的各向异性腐蚀是目前微细

加工中的一项关键技术^[1,2]。其中最常用的腐蚀液是 KOH,其腐蚀速率较高、毒性小、操作简单、腐蚀速率对晶向和硼掺杂浓度具有很强的依赖性^[2]。与 KOH相

收稿日期:2004-03-18; 修订日期:2004-05-09

* 基金项目:北京市教委科技发展项目(KM200310005009)

作者简介:董典红(1980-),女,山东阳谷人,硕士,研究方向为微电子学、红外探测器件。

比,EPW 腐蚀液腐蚀停特性更显著,可以得到非常平整的超薄硅膜。但是 EPW 有剧毒,对人体危害很大,且较难操纵。

在高灵敏度红外探测器的制作中^[3],要求实现平整、超薄的硅膜,以提高其灵敏度。通常这种超薄硅膜是通过毒性较大的 EPW 腐蚀来实现的^[4,5]。本文使用 KOH 腐蚀实现了高质量超薄硅膜的制作,并将 KOH 和 EPW 两种腐蚀方法进行比较,研究了不同溶液的腐蚀工艺及其对重掺杂腐蚀停效果、腐蚀边缘形貌、腐蚀表面粗糙度及腐蚀掩膜材料的影响。

1 超薄硅膜的制备工艺

实验使用 p 型<100>,7.6 cm 双面抛光硅片,厚度为 260 μm ,电阻率为 30~50 Ωcm ,腐蚀工艺流程如图 1 所示。(a)清洗硅片,双面高温氧化。(b)保留一面氧化层(约 1 μm)作为扩散阻挡层,使用 SiO_2 腐蚀液(BHF)去掉另一面氧化层。(c)在硅表面进行浓硼扩散。 N_2 保护下进行 1150 $^\circ\text{C}$ 扩硼 15 min,得到约 1 μm

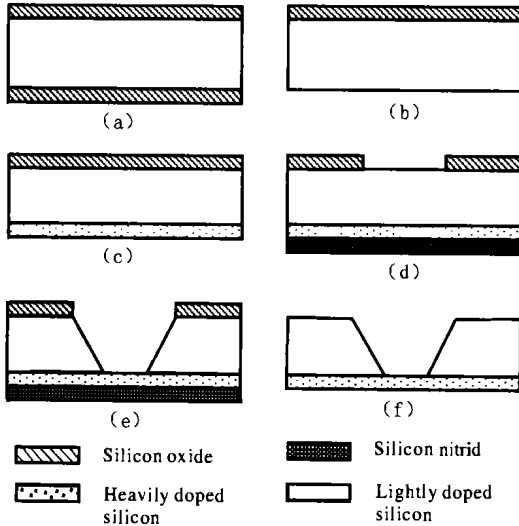


图 1 重掺杂腐蚀停工艺流程

Fig.1 Heavily doped etch-stop processing

的重掺杂层。(d)如果使用 KOH 进行腐蚀,利用 PECVD(400 $^\circ\text{C}$)在重掺杂硅面生长氮化硅层(约 300 nm),并在氧化硅面光刻腐蚀窗口。如果使用 EPW 进行腐蚀,不必生长氮化硅层,直接进行光刻。(e)使用 KOH 或 EPW 进行自停止腐蚀。(f)去硼硅玻璃。使用 $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:1$ 的溶液去掉硼硅玻璃及掩膜层。其中,(1)

扩硼浓度通过霍尔系统进行测量,结果表明硅表面浓度达到 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 以上,满足腐蚀停要求。(2)通过控制扩硼时间来控制重掺杂层厚度,即薄膜厚度。(3)各项异性腐蚀前使用 SiO_2 腐蚀液将硅片漂 25 s,去掉硅表面的自然氧化层,以便更有效地腐蚀。(4)通过观察薄膜的透明度和控制腐蚀时间来判断是否达到腐蚀停。

2 腐蚀实验结果与分析

根据上述工艺制备了 3.5 mm \times 3.5 mm 的硅膜,使用台阶仪对其厚度和粗糙度 R_a 进行测量。为了全面而准确地衡量腐蚀表面形貌,采用多次测量平均值

来表征,即 $\overline{Ra} = \sum_{i=1}^n Ra_i/n$ 。这里使用台阶仪测量 10 次,即 $n=10$,每次使探针划过不同区域,每次得到一个 Ra_i 值。

2.1 KOH 各向异性腐蚀

对 KOH 和加入饱和 IPA 的 KOH 溶液分别进行了实验,并对结果进行分析比较,证明有机成分 IPA 的加入改善了硅膜粗糙度及轻重掺杂硅的腐蚀速率比,即腐蚀停特性。

(1) 腐蚀速率及腐蚀粗糙度

对不同浓度的 KOH 及 KOH+饱和 IPA 溶液在 60 和 80 $^\circ\text{C}$ 两种条件下分别进行实验,得到它们对轻掺杂硅的腐蚀速率与其浓度温度的关系,如图 2 所示(图中百分号表示质量百分比)。我们发现,20%KOH+饱和 IPA 溶液腐蚀速率比同温度下 20%KOH 溶液的腐蚀速率慢约 45%。但其腐蚀表面质量与 20%KOH

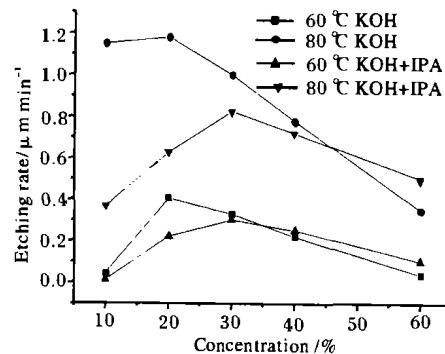


图 2 KOH 及 KOH+IPA 对轻掺杂硅腐蚀速率浓度温度的关系

Fig.2 Etching rate of Si in different concentration of KOH and KOH+IPA at 60 $^\circ\text{C}$ and 80 $^\circ\text{C}$

溶液的腐蚀表面质量相比大大改善,如图 3 所示。对于 KOH 溶液, \overline{Ra} 值约为 72 nm, 而 KOH+饱和 IPA 溶液, \overline{Ra} 值约为 7 nm, 表面粗糙度比前者降低了一个数量级。说明在 KOH 溶液中加入饱和 IPA, 尽管其腐蚀速率有所下降, 但却大大改善了腐蚀表面的粗糙度, 从而可以得到较为平整的硅膜。

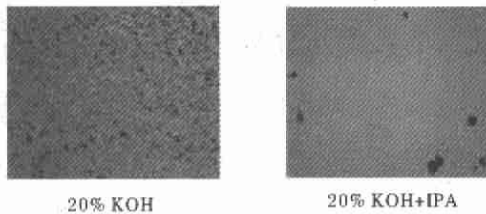


图 3 80℃时, KOH 与 KOH+IPA 腐蚀表面形貌
Fig.3 Etching surface of KOH and KOH+IPA at 80 °C

(2) 重掺杂腐蚀停特性

对不同浓度的 KOH 及 KOH+饱和 IPA 溶液在 60 和 80 °C 两种条件下分别进行实验, 得出对重掺杂硅的腐蚀速率与其浓度温度的关系, 如图 4 所示, 及对轻重掺杂硅腐蚀速率比与浓度温度的关系, 如图 5 所示。经计算, KOH+饱和 IPA 溶液对轻重掺杂硅的腐蚀速率比大约是同温度下 KOH 溶液腐蚀速率比的两倍, 说明 KOH 溶液中加入饱和 IPA, 大大提高了腐蚀速率比, 增强了溶液的腐蚀停效果。

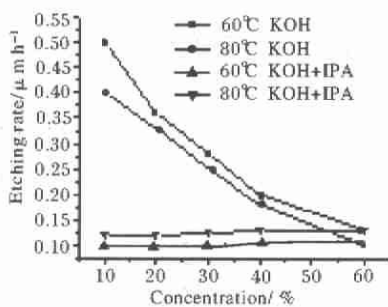


图 4 KOH 及 KOH+IPA 对重掺杂硅的腐蚀速率与浓度温度的关系

Fig.4 Etching rate of doping Si in different concentration of KOH and KOH+IPA at 60°C and 80°C

但需要指出的是, 即使 IPA 的加入增强了 KOH 系统的腐蚀停效果, 轻重掺杂硅腐蚀速率比仍达不到可将重掺杂腐蚀速率视为零的程度, 所以工艺实现过程中可以通过在重掺杂层表面生长一层掩膜的方法对重掺杂层加以保护 (如图 1(e) 所示), 这样 KOH 对

重掺杂硅的腐蚀停特性就得到了充分发挥。

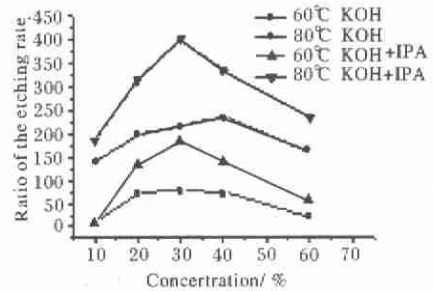


图 5 KOH 及 KOH+IPA 对轻重掺杂硅的腐蚀速率比与其浓度温度的关系
Fig.5 Ratio of the etching rate of Si and doping Si in KOH and KOH+IPA at 60 °C and 80 °C

(3) 溶液温度对腐蚀的影响

由图 2、图 4 和图 5 可知, 对于同一浓度的溶液, 温度的提高引起其腐蚀速率的提高和腐蚀停特性的增强。随着温度的提高, 加入 IPA 的 KOH 与未加 IPA 的 KOH 溶液相比, 轻重掺杂硅的腐蚀速率比增加得多, 也就是说腐蚀停特性增强更明显。

(4) 腐蚀掩膜的制备

实验中利用不同的材料 (二氧化硅、氮化硅) 作为腐蚀掩膜, 研究其抗蚀性。实验发现, 1050 °C 氧化生长的二氧化硅 (约 1 μm) 不能作为 KOH 腐蚀掩膜, 而 1150 °C 氧化生长的二氧化硅 (约 1 μm) 和 PECVD400 °C 生长的氮化硅 (约 300 nm) 均可作为其腐蚀掩膜, 其中氮化硅抗蚀性最好。

鉴于上述特性的研究结果, 采用 80 °C 恒温水浴, 20% KOH 溶液先腐蚀到硅片剩余 10 μm 左右, 再用 30% KOH+饱和 IPA 溶液腐蚀出膜, 得到超薄硅膜, 表面形貌如图 6 所示。在上述过程中, 先用腐蚀速率较高的纯溶液进行深腐蚀, 然后改用加入 IPA 的溶液进

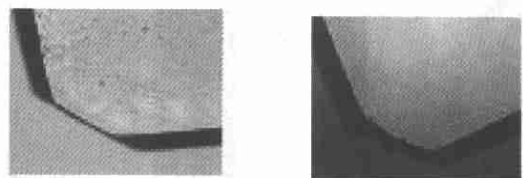


图 6 KOH 系统腐蚀薄膜表面形貌 图 7 EPW 腐蚀薄膜表面形貌
Fig.6 Silicon membrane surface in KOH etching Fig.7 Silicon membrane surface in EPW etching

行自停止腐蚀, 保证了较低的腐蚀表面粗糙度和较好的腐蚀停效果。实验测得硅膜厚度为 0.879 μm, 表面

\overline{Ra} 值约为 8 nm。

2.2 EPW 各向异性腐蚀

采用 EPW 溶液(乙二胺 15 ml, 邻苯二酚 3 g, 水 5 ml) 在 95 °C 下进行了各向异性腐蚀实验, 测得 EPW 对轻掺杂硅的腐蚀速率为 0.805 $\mu\text{m}/\text{min}$, 对重掺杂硅的腐蚀速率为 0.1 $\mu\text{m}/\text{h}$, 同时得到轻重掺杂硅的腐蚀速率比为 483, 可见 EPW 腐蚀停特性比 KOH 更显著。实验证明, EPW 对重掺杂硅腐蚀速率可视为零, 呈现非常好的腐蚀停效果, 因而工艺实现过程中不必对重掺杂表面作保护。

实验发现, EPW 腐蚀掩膜材料选用二氧化硅(1050 和 1150 °C 高温生长)和氮化硅(PECVD400 °C 生长)均可得到很好的效果。

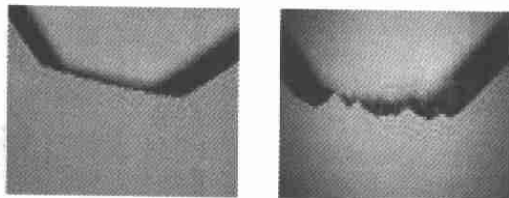
在上述条件下自停止腐蚀得到非常平整光滑的硅膜, 表面形貌如图 7 所示, 台阶仪测量表明: 其粗糙度很低, \overline{Ra} 值约为 3 nm, 膜厚为 0.795 μm 。

2.3 KOH 与 EPW 的比较

通过比较, 可知 KOH 和 EPW 存在许多相似之处: KOH 和乙二胺都是碱性的; 二者都具有亲水特性; IPA 和邻苯二酚在硅腐蚀过程中都起到重要作用。它们之间的区别在于:

(1) KOH 是无机碱, 阳离子迁移率影响硅表面自由 OH^- 离子的进入。主要受阳离子半径大小的影响^[6]。而乙二胺是有机碱, 硅表面自由 OH^- 离子的进入是自由的。

(2) KOH 中加入 IPA, 增加了其表面活性, 使得硅表面自由 OH^- 离子和硅化合物 $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ 溶度都增加, 从而减少了小丘的形成, 表面变得平滑。而在 EPW 中, 是通过邻苯二酚来实现上述特性的。



(a) KOH 腐蚀边缘形貌 (b) EPW 腐蚀边缘形貌
(a) Etching edge in KOH (b) Etching edge in EPW

图 8 KOH 与 EPW 腐蚀边缘形貌的比较

Fig.8 Comparison of etching edge in KOH and EPW

(3) 实现 1 μm 超薄硅膜制作中, EPW 可以实现

重掺杂表面无掩膜腐蚀, 而 KOH 及 KOH+IPA 需要重掺杂硅表面有掩膜腐蚀, 这是由其腐蚀停特性的强弱决定的。

(4) KOH 腐蚀与 EPW 腐蚀相比, 对晶向的依赖性更强, 即各向异性较 EPW 更显著, 腐蚀边缘比较规则, 如图 8(a) 和 (b) 所示。

3 结论

在 KOH 溶液中加入饱和 IPA 大大降低了腐蚀表面粗糙度, 提高了轻重掺杂硅腐蚀速率比, 从而增强了腐蚀停特性。通过对重掺杂硅表面加以保护, 改进腐蚀方法, 使用 KOH 腐蚀系统实现了 1 μm 平整超薄硅膜的制作。

将 KOH 腐蚀特性与 EPW 腐蚀特性进行了比较, KOH 腐蚀系统的优点在于其各向异性较强、腐蚀边缘非常规则、腐蚀速率较高、毒性较小、操作简单。EPW 腐蚀系统的优点在于其重掺杂腐蚀停特性很好, 容易实现表面较为光滑平整的超薄硅膜。

使用 KOH 和 EPW 两种腐蚀方法, 均可获得平整超薄硅膜, 满足高灵敏度红外探测器的性能要求。目前已将 KOH 腐蚀应用到器件的制作中, 为器件的制备奠定了工艺基础。

参考文献:

- [1] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] Sato K, Shikida M, Matsushima Y. Characterization of orientation-dependent etching properties of single-crystal silicon: effects of KOH concentration[J]. Sensors and Actuators A, 1998, 64: 87-93.
- [3] 刘铮, 李兰, 邹德恕, 等. 新型非制冷高速高灵敏度红外探测器的研制[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 452-455.
- [4] Huang C, Najafi K. Fabrication of ultrathin P++ silicon microstructures using ion implantation and boron etch-stop[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(4): 532-537.
- [5] 李兰, 董典红, 刘铮, 等. 新型红外探测器可动薄膜微腔的腐蚀工艺研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 33(6): 651-654.
- [6] Moldovan C, Iosub R, Dascalu D, et al. An investigation of an alkali line system for silicon anisotropic etching[A]. Proceedings of the Workshop of Physical Chemistry of Wet Chemical Etching of Silicon[C]. Netherland: Holten, 1998, 1.21-22.