

硅V型槽的制作工艺

北京瑞合航天电子设备有限公司

概述

随着光通讯的迅猛发展，光纤到户已经实现。光通讯网络中人们大量使用平面光波导器件PLC，并通过光纤阵列与平面光波导器件精确对准，这对光纤阵列中最重要的基本元件——精密V型槽的制作提出了很高要求。

按照材料分类，精密V型槽有陶瓷V型槽、玻璃V型槽和硅V型槽三种。

按照加工方法分类，有精密机械加工方法和微机械加工方法。陶瓷V型槽、玻璃V型槽采用精密机械加工方法，硅V型槽采用微机械加工方法。

概述

精密机械加工方法是在精密机床上用金刚石刀具对工件进行精研、抛光。由于存在刀具磨损，需要在加工过程中对刀具进行在线检测、在线修复。精密V型槽的周期精度达到亚微米量级，因此导致机床和刀具的精度要求达到亚微米乃至纳米量级。

优点：陶瓷、玻璃、单晶硅都可加工。**陶瓷V型槽**强度高、耐磨，主要用在光纤熔接机上。**玻璃V型槽**透明，放光纤时便于在线观察，主要用在光纤阵列中。

缺点：设备费很贵，维护费也很高。此外，由于是单件加工，大批量时需要多台设备同时工作。

概述

微机械加工方法有体硅加工方法、表面硅加工方法、LIGA加工方法等，是微机电系统（MEMS）中最重要、最基本的工艺。硅V型槽用的是体硅加工方法，这是MEMS工艺中最成熟的方法，也是目前实用化MEMS元器件中使用最广泛的方法。该方法利用单晶硅的各向异性腐蚀特性，通过晶面自然解理形成V型槽，因此只适用于单晶硅。

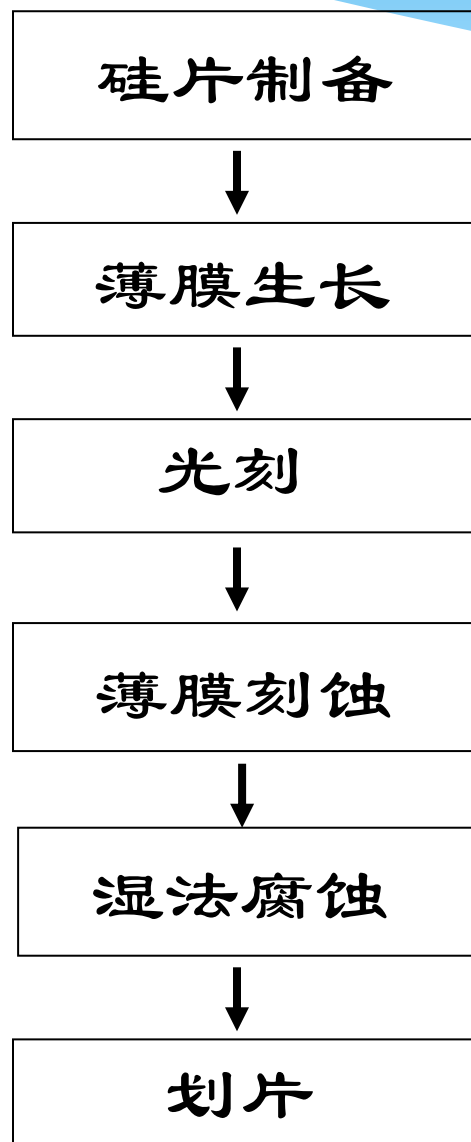
硅V型槽侧壁光滑、线条笔直、一致性好、精度高，无精密机械加工的累计误差。由于采用与微电子类似的并行生产工艺，保证了高品质、大批量、低成本。

概述

硅V型槽的三维几何尺寸精度高，非常适合于放置光纤并精密定位，能和激光器、探测器以及其它光电子器件的间隔严格匹配，大大减少了光电子器件和光纤耦合对准的损耗。硅V型槽广泛应用于光通讯领域，例如光纤阵列等器件中，虽然其不透明，但若用透明玻璃做盖板，也可用于在线观察。

硅V型槽传热性能好，光纤可以承受很大激光功率，因此在大功率激光器领域具有不可替代的作用，例如用半导体激光器阵列做激光加工机床或者用作大功率固态激光器的泵浦源，以及激光印刷等。

硅V型槽的制作流程图



一、硅片制备工艺



二、薄膜生长工艺

硅片表面生长一层薄膜，用作各向异性腐蚀时保护图形的掩模，通常为**二氧化硅**和/或**氮化硅**

二氧化硅主要是热氧化，也可以用低压化学气相沉积（LPCVD）或者等离子体增强化学气相沉积（PECVD），氮化硅主要是低压化学气相沉积

热氧化

干氧 —— 生长慢，膜层薄、致密

湿氧 —— 生长快，膜层厚、疏松

干-湿-干 —— 综合上述优点，性能好

二、薄膜生长工艺

低压化学气相沉积

低压，摄氏600~800度，热分解或化学反应
运输控制：低压，大自由程，表面反应

SiO_2 ：800度， $\text{SiH}_4 + \text{O}_2$ ，或TEOS热分解

Si_3N_4 ：700度， $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ ， $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$

等离子体增强化学气相沉积

在化学气相沉积中加入等离子体，增强沉积速率

优点：温度较低，生长快

缺点：设备贵，控制复杂

三、光刻工艺流程

制版

清洗--HMDS底剂

涂胶

前烘

曝光

显影

检查

后烘

与通常的集成电路IC工艺相同

四、薄膜刻蚀

干法刻蚀

真空腔中，通入气体，并激发等离子体。常见反应离子刻蚀（RIE）、感应耦合等离子体（ICP）。精度高，但速度慢。

适用于二氧化硅和氮化硅

湿法刻蚀

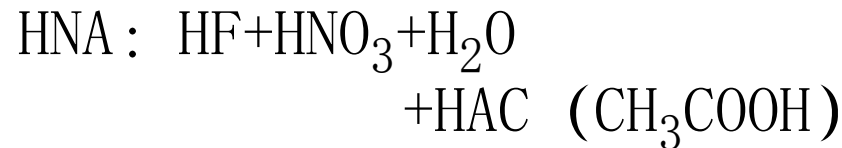
化学腐蚀液，微米级精度，速度快

适用于二氧化硅，不适用于氮化硅

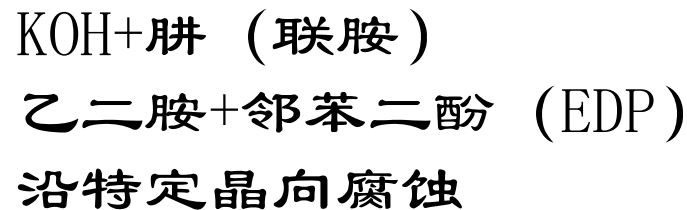
五、湿法腐蚀工艺

湿法腐蚀是最早应用于IC 和MEMS的技术—1970

各向同性腐蚀—各方向上有相同的腐蚀速率



各向异性腐蚀—腐蚀速率依赖于单晶晶向



腐蚀在有掩膜条件下进行，以获得所需图形

湿法腐蚀是制作硅V型槽的关键工艺！

五、湿法腐蚀工艺

机理：电化学反应（氧化—还原反应）

硅片表面存在微观的阴极、阳极；

在阳极发生氧化，阴极还原

腐蚀机理

空穴到达半导体表面； $\text{Si} + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{Si}^{2+}$

吸附来自水中的 OH^- ： $\text{Si}^{2+} + 2\text{OH}^- \longrightarrow \text{Si}(\text{OH})_2$

$\text{Si}(\text{OH})_2$ 与溶液中的络和剂反应

副产物在腐蚀剂中溶解

五、湿法腐蚀工艺

对腐蚀速率的影响：

反应速率限制：腐蚀速率受制于化学反应速率

扩散限制：腐蚀速率受制于反应剂的运输

通过液体到达或离开表面

- 扩散限制下：激活能较低（通常几KJ/mol）

对反应温度不敏感

溶液搅拌十分重要——提高到达表面的反应剂浓度

提高反应速率

稳定反应速率

均匀反应速率

- 反应速率限制条件下：

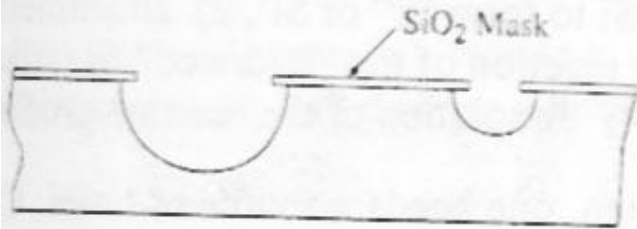
工艺与反应温度、反应剂比率关系密切

五、湿法腐蚀工艺

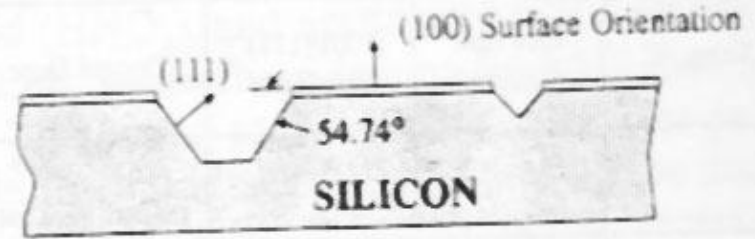
- 到达表面的少子数的限制：
限制腐蚀反应中的溶解速率，使电子或空穴耗尽
光照、加电可产生电子空穴对—提高腐蚀速率
- 其它影响：
晶向、半导体类型、掺杂浓度、晶格缺陷等
- 腐蚀的方向性：同性、异性、晶向

五、湿法腐蚀工艺

ISOTROPIC WET ETCHING: AGITATION



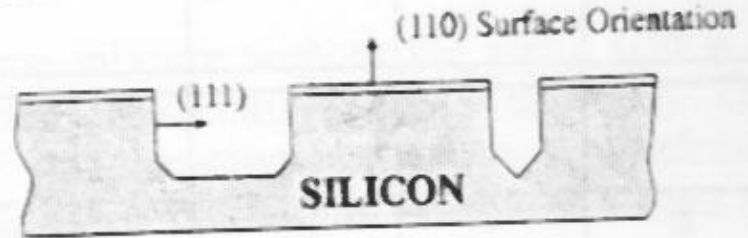
ANISOTROPIC WET ETCHING: (100) SURFACE



ISOTROPIC WET ETCHING: NO AGITATION



ANISOTROPIC WET ETCHING: (110) SURFACE



硅片的各向同性腐蚀

硅片的各向异性腐蚀

五、湿法腐蚀工艺

硅的各向同性腐蚀:

作用：去除表面损伤
在单晶硅上构造结构
清洗炉管

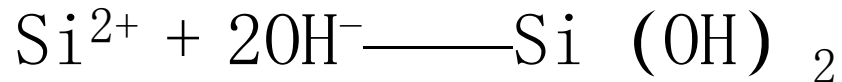
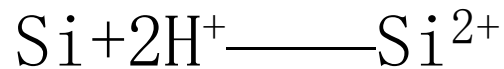
常用腐蚀剂：HNA
 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (HAC)

H_2O 、HAC的作用：稀释剂或缓冲剂

HAC的作用是控制 HNO_3 的溶解度，在使用时间内使氧化速率保持常数 (H^+ 的固溶度一定)

五、湿法腐蚀工艺

反应过程：



氢被释放形成 SiO_2

HF溶解 SiO_2 形成水溶液 H_2SiF_6



五、湿法腐蚀工艺

不同组分对腐蚀速率的影响：

- HF高、HNO₃低

腐蚀速率由HNO₃浓度控制

开始阶段困难，易变，在一定周期内硅表面缓慢生长氧化层，腐蚀受氧化-还原反应控制，趋于依赖晶向

- HF低、HNO₃高：

腐蚀速率受HF溶解形成的SiO₂的速率控制

反应有自钝化特点，表面覆盖SiO₂ (30~50Å)

基本限制来自去除硅的复合物

腐蚀各向同性、抛光作用

五、湿法腐蚀工艺

- HF: HNO₃=1: 1

与稀释剂有关

稀释剂低于10%， 对其不敏感

稀释剂10%~30%， 随稀释剂速率增加降低

稀释剂高于30%， 微小的浓度变化导致腐蚀速率很大变化

- HF溶液对硅也有溶解作用， 但速率很慢， 小于1A/Min
- 多种比例可供选择， 用于腐蚀硅

五、湿法腐蚀工艺

室温下HNA对硅的常用腐蚀剂

腐蚀剂	HF	HNO3	HAC	备注	掩膜	速率 (um/min)
	10	30	80	速率降低 150 倍 n, p: $10^{17}/\text{CM}^3$	SiO2 (300A/min)	0.7-3.0
	25	50	25		Si3N4 (700A/min)	4.0
	9	75	30		SiO2 (700A/min)	7
	5	15	3	抛光		
平面腐蚀	2	15	5	常规腐蚀		

五、湿法腐蚀工艺

腐蚀剂	HF	HNO ₃	HAC	备注	掩膜	速率 (um/min)
CP-4	3	5	3	快速抛光 ³		
	6	100	40			
B 腐蚀液	1	40	15	慢速腐蚀		
Dash etch	1	3	10	抛光		
White etch	1	9				

五、湿法腐蚀工艺

对其它材料的腐蚀剂：

SiO_2 ：HF，BHF

Si_3N_4 ：HF， H_3PO_4 （摄氏180度）

Al： H_3PO_4 （摄氏40度），其它酸

Ti：HF，BHF

TiSi：HF，BHF

CoSi_2 ：HF（慢）

Au： I_2/KI ，王水

五、湿法腐蚀工艺

各向异性化学腐蚀

对硅的不同晶面具有不同的腐蚀速率

有机腐蚀剂：

EPW (乙二胺+邻苯二酚+ H_2O)，联胺

无机腐蚀剂：

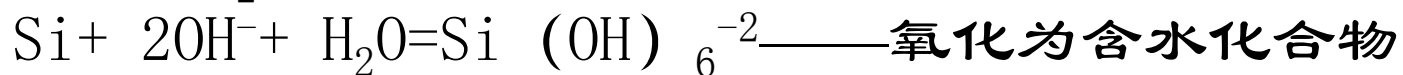
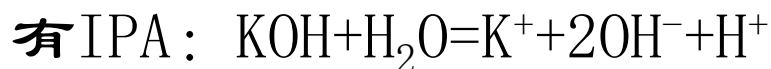
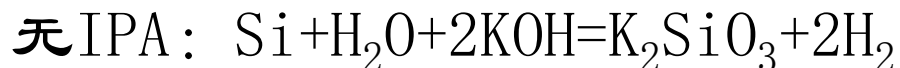
碱性腐蚀液 (KOH, NaOH, LiOH, CsOH, NH_4OH)

重点—KOH, EPW, TMAH

五、湿法腐蚀工艺

KOH腐蚀系统：KOH+H₂O+IPA [(CH₃)₂CHOH]

腐蚀原理：



——络化反应

即：KOH将硅氧化成含水硅化物；

有IPA，反应生成可溶硅络合物

五、湿法腐蚀工艺

EPW腐蚀系统：
乙二胺 $(\text{NH}_2 (\text{CH}_2)_2 \text{NH}_2)$ E
邻苯二酚 $(\text{C}_6\text{H}_2 (\text{OH})_2)$ P
水 W

反应：

电离： $\text{NH}_2 (\text{CH}_2)_2 \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_2 (\text{CH}_2)_2 \text{NH}_3^+ + (\text{OH})^-$

氧化还原： $\text{Si} + 2 (\text{OH})^- + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}(\text{OH})_6^- + 2\text{H}_2$

络合过程： $\text{Si}(\text{OH})_6^- + \text{C}_6\text{H}_2 (\text{OH})_2 \rightarrow \text{Si}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2)_3^- + 6\text{H}_2\text{O}$

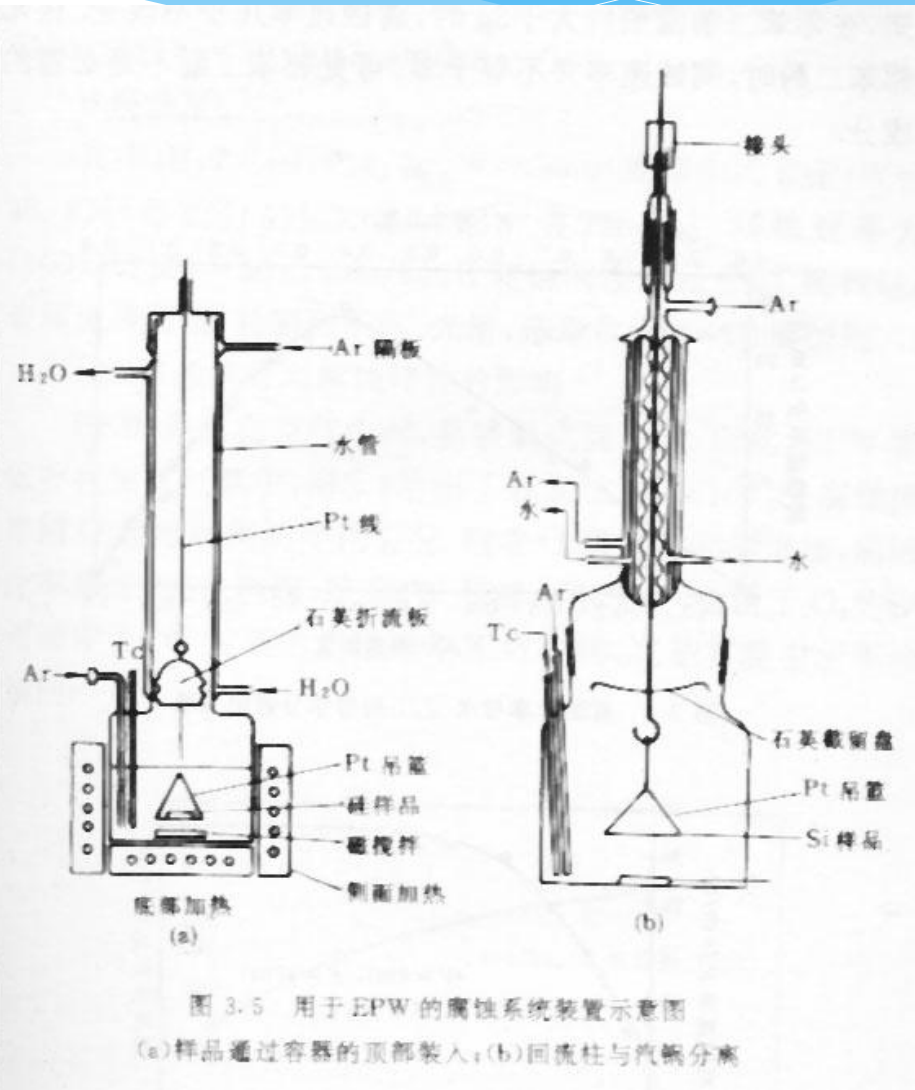
乙二胺，水：氧化；

邻苯二酚：络合

五、湿法腐蚀工艺

反应装置：

- 反应温度：摄氏115度，低温时会在硅表面产生不可溶解的残留物，使表面粗糙
- 带回流：防蒸发
- 带搅拌：更均匀
- 有毒：需要防护



五、湿法腐蚀工艺

几种典型腐蚀液：

T腐蚀剂：

E:17ml; P:3g; W:8ml (mol比: E:P:W=35.1%:3.7%:61.2%)

摄氏110度, 腐蚀速率比 $\langle 100 \rangle$: $\langle 110 \rangle$: $\langle 111 \rangle$ =50:30:3 (微米/小时)

B腐蚀剂：

E:7.5ml; P:1.2g; W:2.4ml (mol比: E:P:W=43.8%:4.2%:52%)

摄氏118度, 腐蚀速率比 $\langle 100 \rangle$: $\langle 111 \rangle$ =50:1 (微米/小时)

摄氏100度以上表面平整、光滑、无残留物

F腐蚀剂、S腐蚀剂； 加入不同的二氮杂苯

五、湿法腐蚀工艺

择优机理：

- 与晶体结构有关
- 与不同晶向的悬挂键有关
- 与背键有关

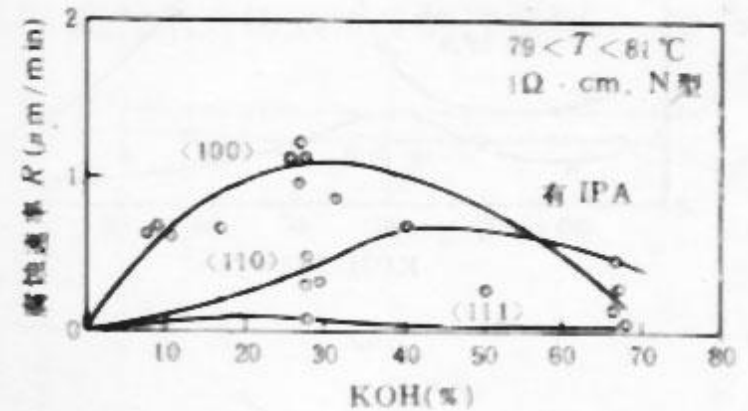
通常 $\{111\}$ 面腐蚀速率最慢，
与 $\{100\}$ 比可达 100: 1

五、湿法腐蚀工艺

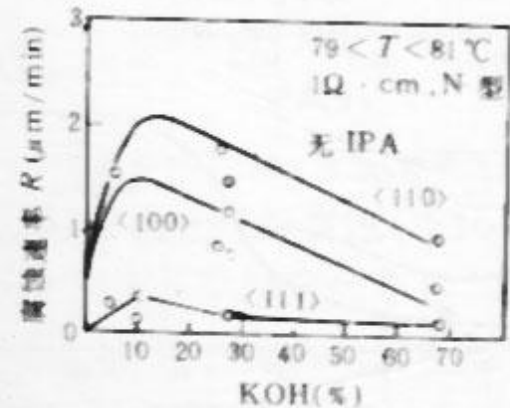
影响腐蚀速率的条件：

KOH体系

- 腐蚀速率与KOH浓度关系 (a) 有IPA, (b) 无IPA
- 加入IPA后, 速率降低
- 温度的影响: 随温度上升而增加



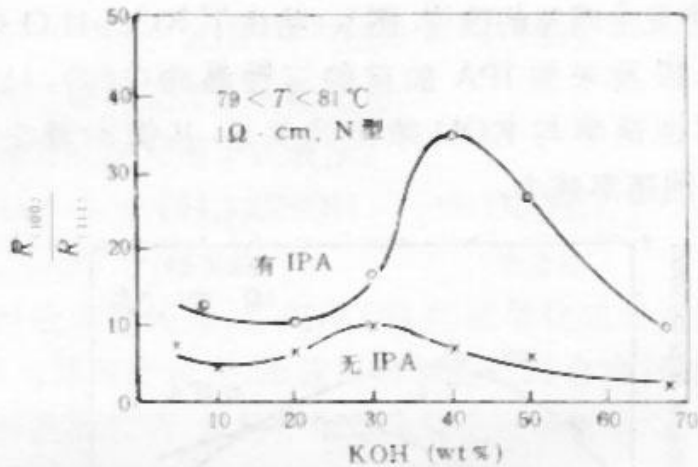
(a)



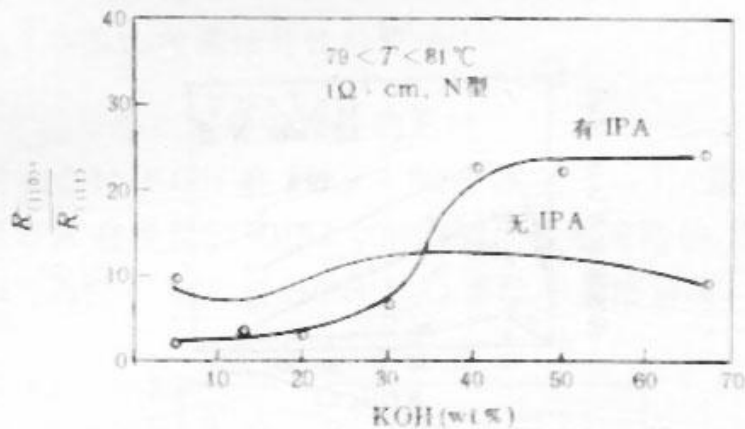
(b)

图 3.2 腐蚀速率与 KOH 浓度的关系
(a) 有 IPA; (b) 无 IPA

五、湿法腐蚀工艺



(a)



(b)

图 3.3 (a) $R_{(100)}/R_{(111)}$ 与 KOH 浓度的关系；

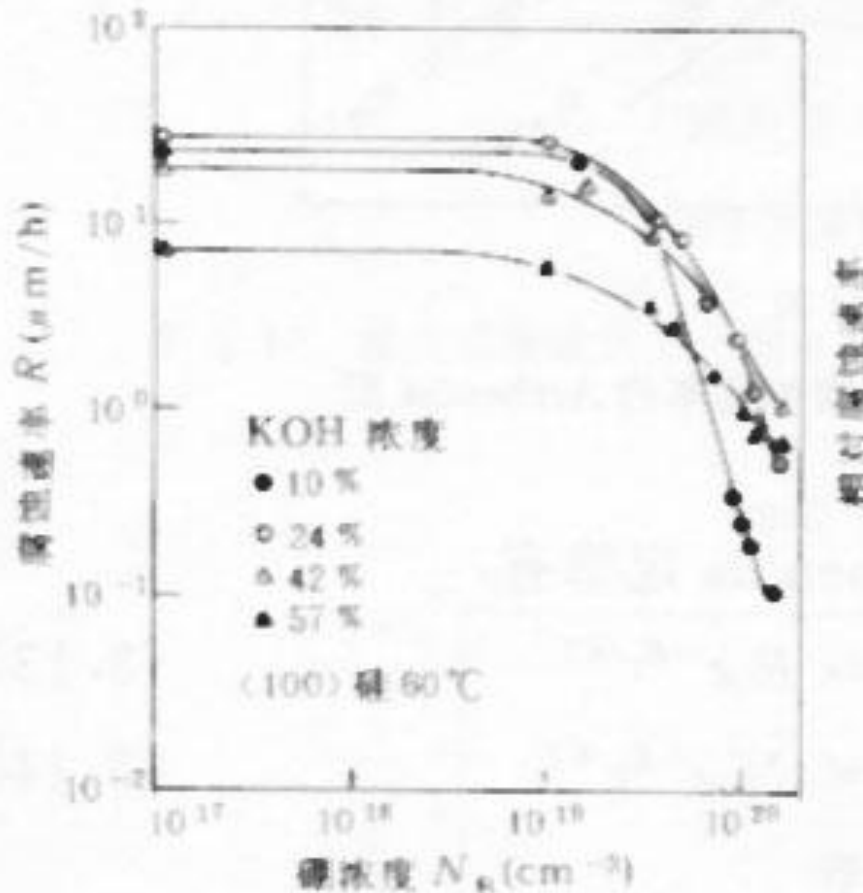
(b) $R_{(110)}/R_{(111)}$ 与 KOH 浓度的关系

IPA对腐蚀速率比的影响

(a) $R(100)/R(111)$

(b) $R(110)/R(111)$

五、湿法腐蚀工艺



(a)

图 3.15 (100)硅腐蚀速率

(a)绝对腐蚀速率,(b)

KOH腐蚀速率与硼掺杂浓度的关系

五、湿法腐蚀工艺

影响腐蚀速率的条件：

EPW体系

腐蚀速率与水、乙二胺（上）和邻苯二酚（下）浓度的关系

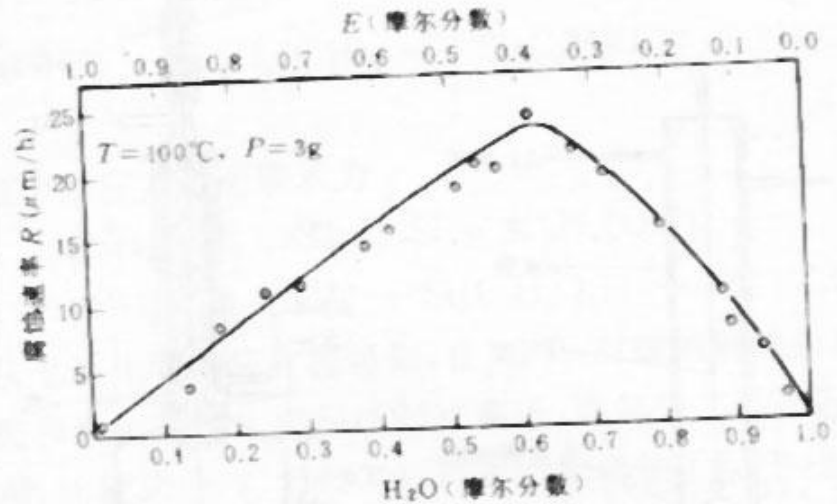
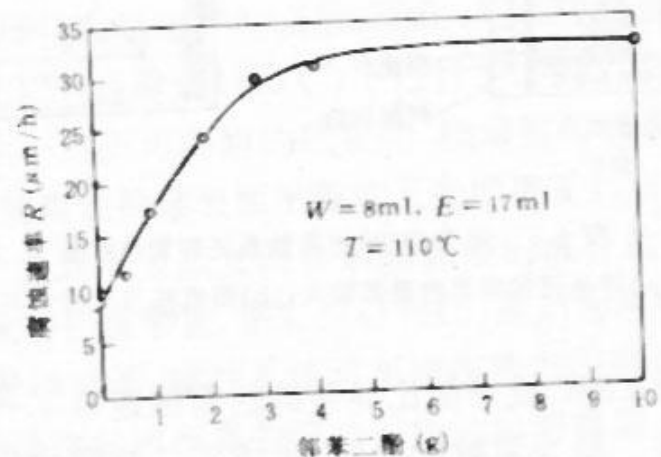


图 3.6 腐蚀速率与水、乙二胺摩尔分数的关系



五、湿法腐蚀工艺

EPW腐蚀速率与硼掺杂浓度的关系

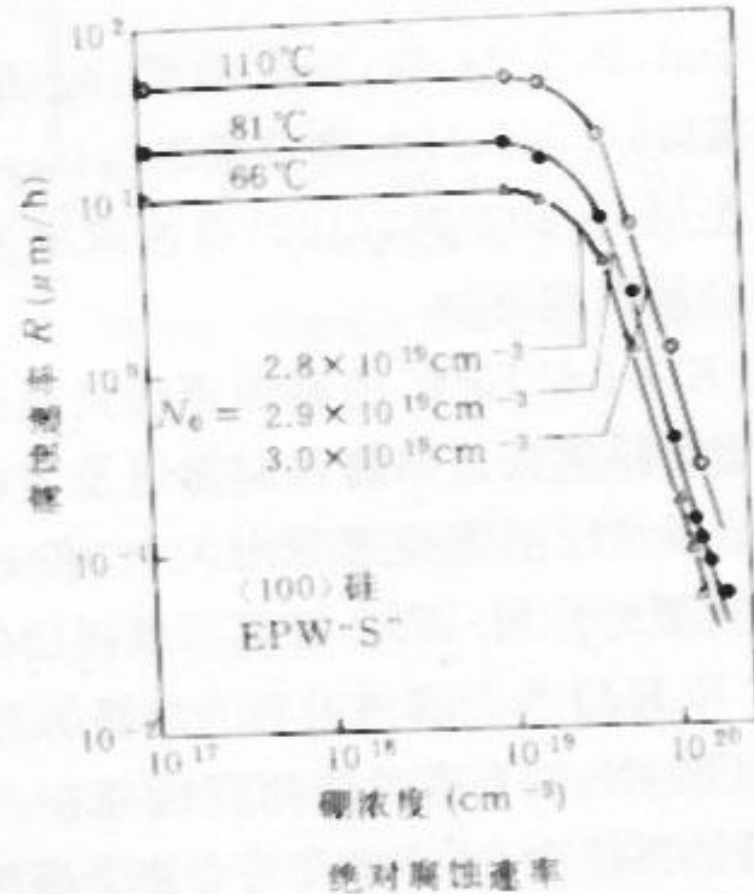


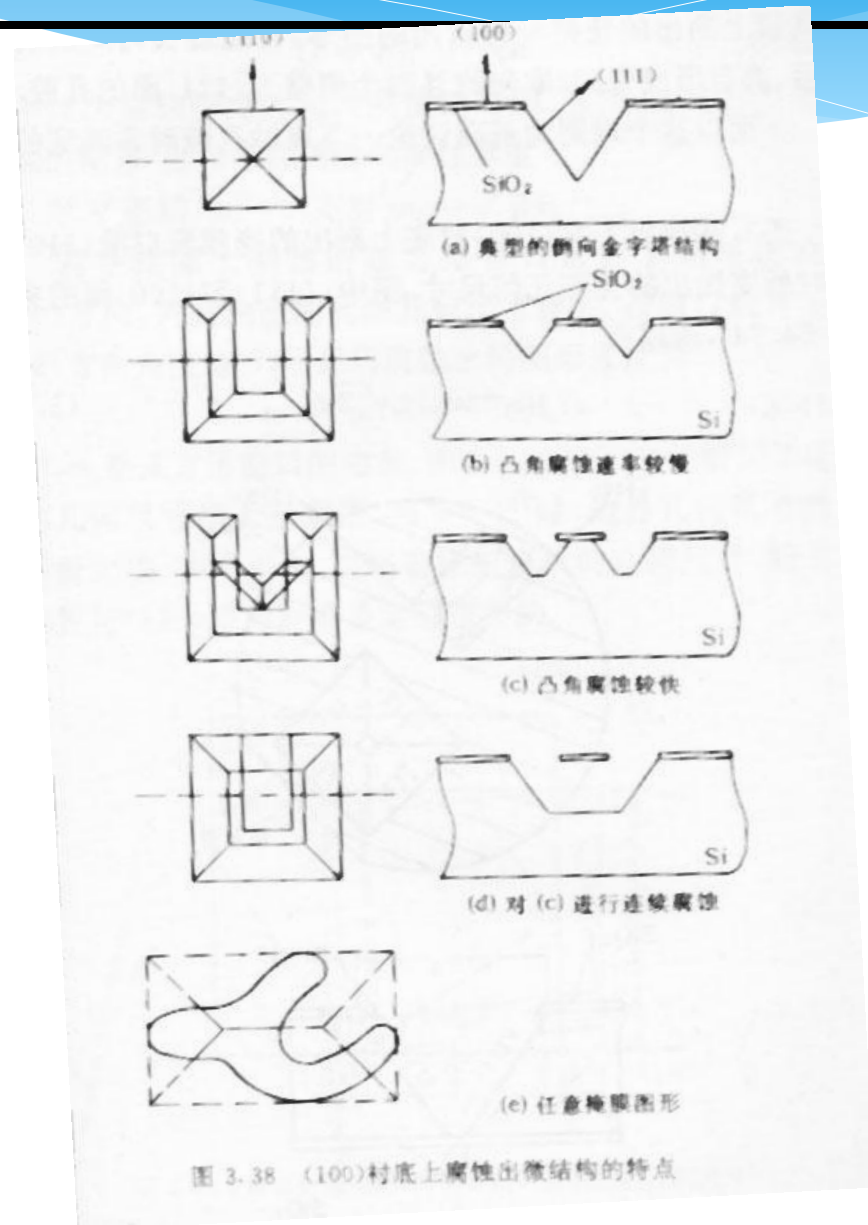
图 3.11 腐蚀速率与硼浓度的关系(S 腐蚀性剂)

五、湿法腐蚀工艺

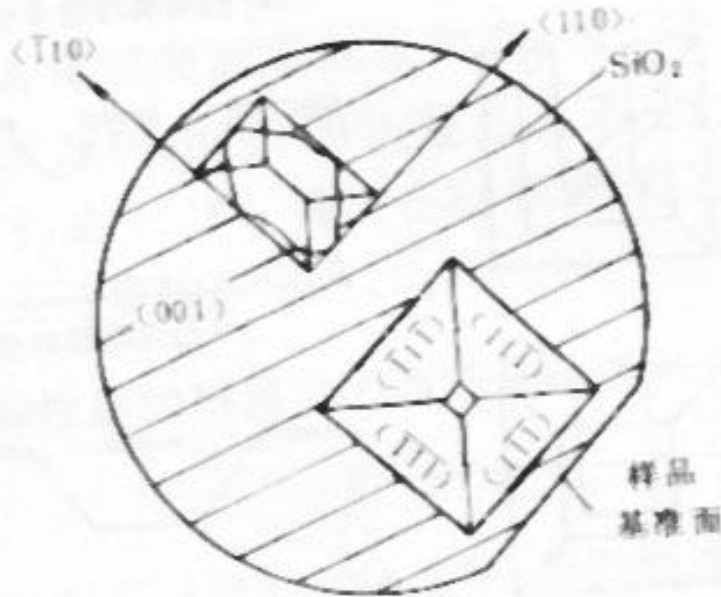
微结构特点：

(100) 衬底

不同掩膜的腐蚀结果

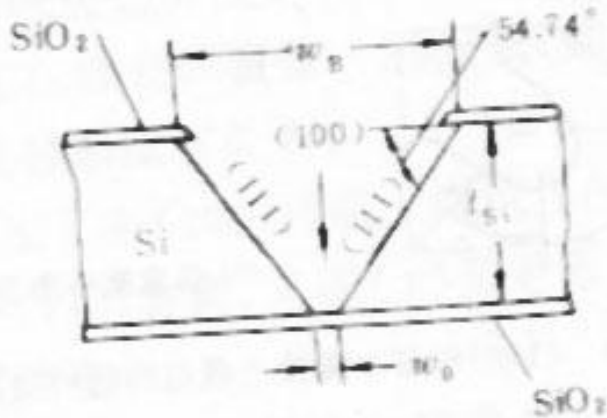


五、湿法腐蚀工艺



(100) 衬底上，
腐蚀 $\langle 110 \rangle$ 窗口
的几何尺寸

$$W_0 = W_{\text{si}} - 2 t_{\text{si}}$$



五、湿法腐蚀工艺

凸角腐蚀问题

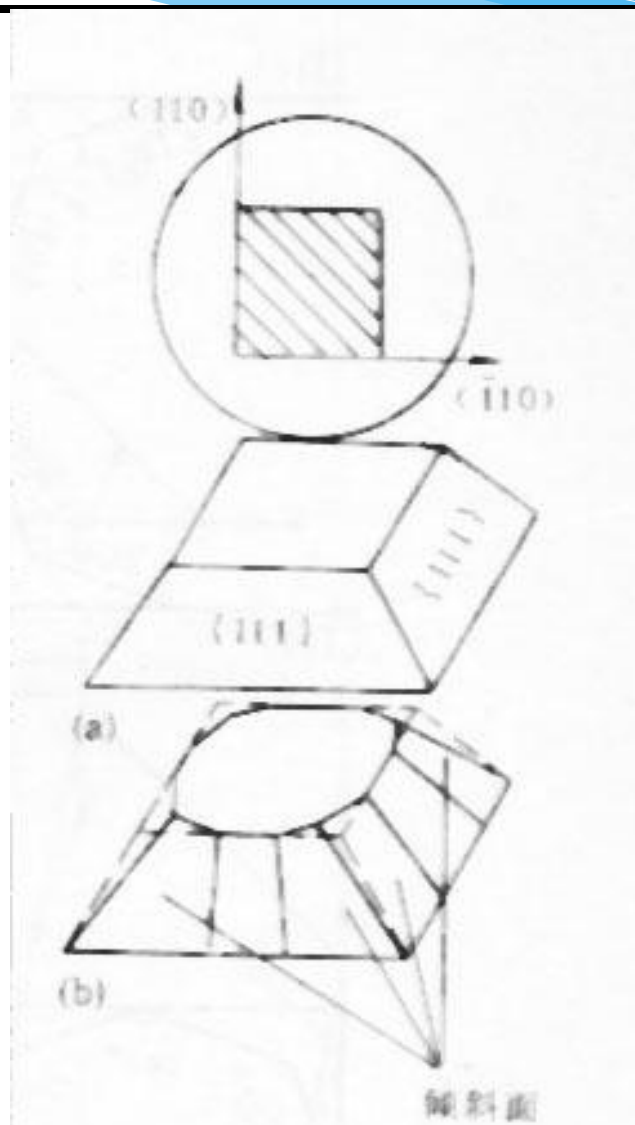


图 3.43 台面结构的凸角

五、湿法腐蚀工艺

凸角腐蚀的补偿

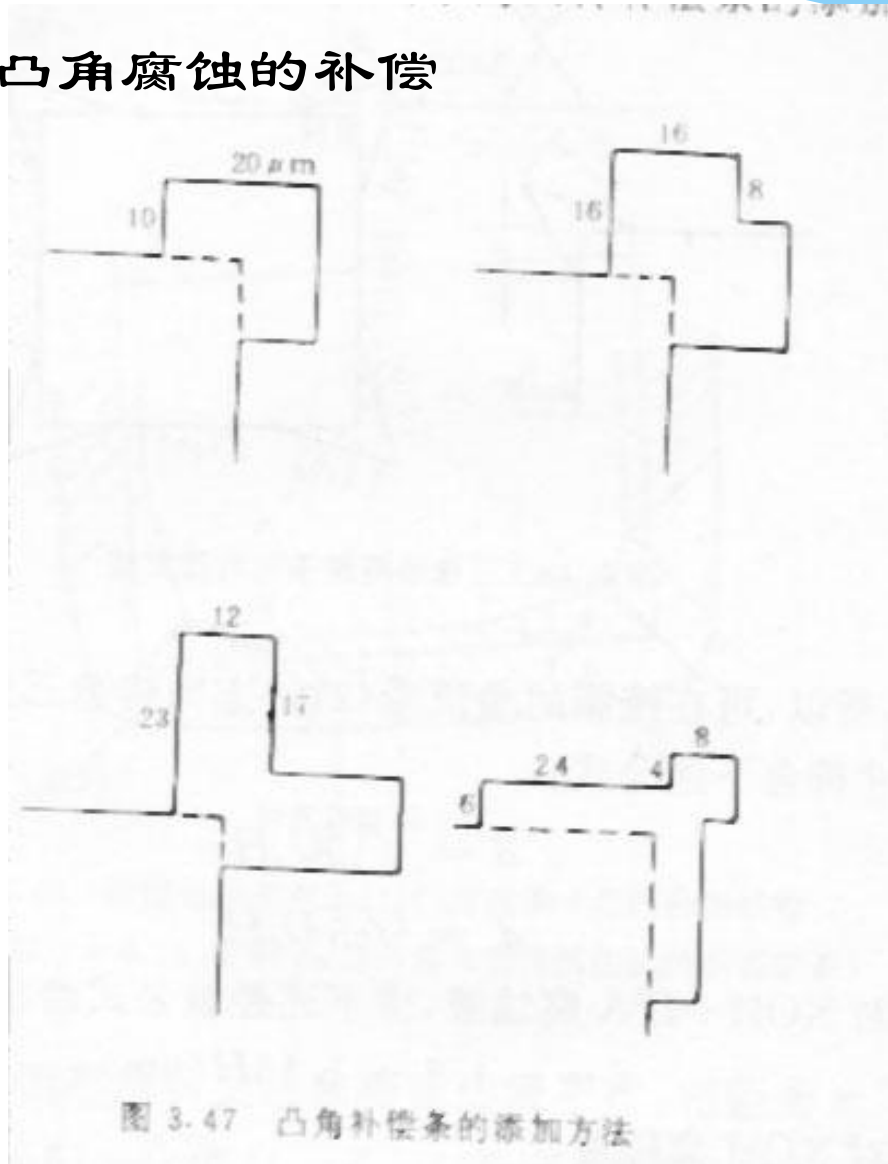


图 3.47 凸角补偿条的添加方法

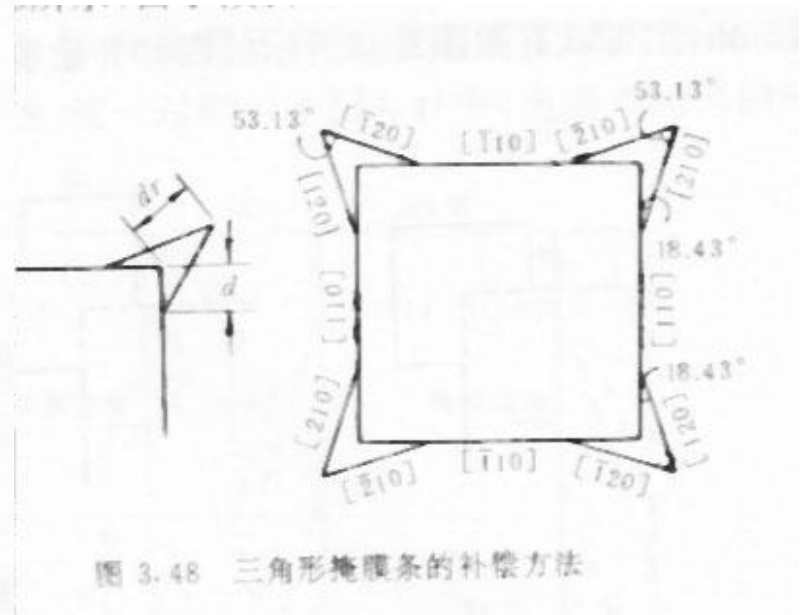


图 3.48 三角形掩膜条的补偿方法

五、湿法腐蚀工艺

微结构特点：

(110) 衬底

腐蚀结果

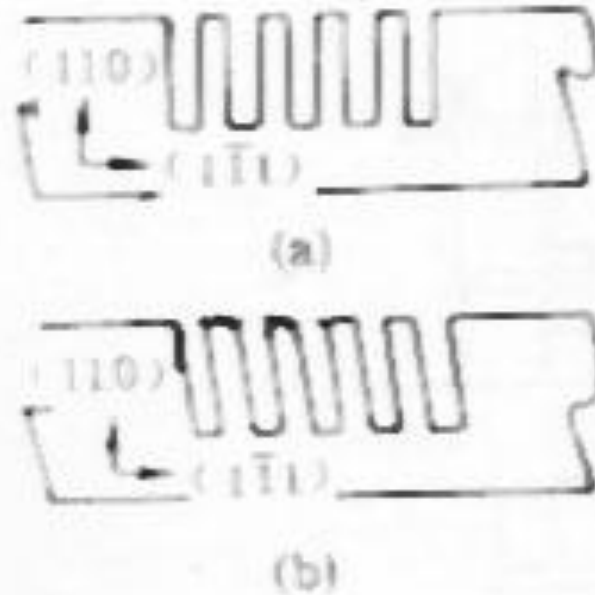


图 3.42 (110)衬底上腐蚀出的纵向结构

(a)标准(110)衬底；

(b)偏离(110)衬底的硅

六、划片

机械划片



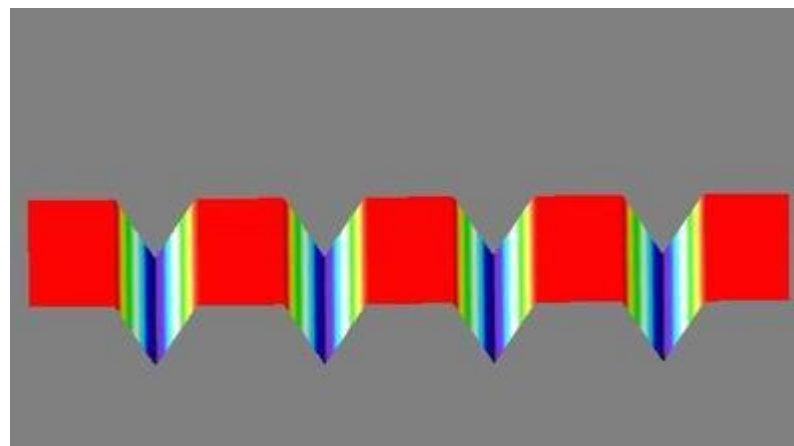
激光划片



产品图片




硅V型槽照片



三维轮廓仪测量结果

从照片看，硅槽侧壁呈现完美的镜面，线条没有缺陷
从测量结果看，槽的周期精度小于0.3微米，精度很高



谢谢！