

硅片高温翘曲与常温机械强度*

谢书银 石志仪 陈忠祥

张维连

(中南工业大学应用物理与热能工程系 长沙 410083) (河北工业大学半导体材料研究所 天津 300130)

摘要 不同抗弯强度硅片高温弯曲度变化的实验结果表明,众多因素对抗弯强度和高温弯曲度的影响规律是一致的. 高温翘曲度或弯曲度与抗弯强度有内在联系. 抗弯强度不仅表示硅片在常温下的抗破碎能力,而且也反映了高温抗翘曲和弯曲能力.

PACC: 6220F, 6220M

1 引言

集成电路和其它硅器件高温工艺中,硅片的翘曲和弯曲现象是普遍存在的,它是器件工艺中最严重,最困难的问题之一. 硅片的翘曲给复杂线路图形的光刻工艺带来困难,超过 $10\mu\text{m}$ 的翘曲使 $3\mu\text{m}$ 线宽工艺难以进行,特别是在微米及亚微米图形工艺中,对硅片的平整度要求极为严格. 随着集成电路线宽的减小及所用硅片直径的增大,硅片翘曲和弯曲问题显得更为重要.

硅片的翘曲和弯曲是器件高温工艺过程中热应力导致塑性形变的结果. 当作用在滑移面上的剪切力超过临界分剪切应力 τ_c 时,在(111)解理面的[110]方向上将产生滑移,出现宏观的塑性形变. 一般认为硅片高温翘曲与高温工艺中升、降温速率^[1],扩散区应变^[2]和氧含量等^[3]因素有关,还没有见到过高温翘曲与常温机械强度关系的报道. 本文通过具有不同抗弯强度的硅片在模拟硅器件高温工艺中翘曲或弯曲度的实验,研究硅片抗形变能力与抗破碎能力,即硅片高温翘曲度与常温抗弯强度之间的关系.

2 实验方法

2.1 样品制备

将不同硅片单晶切成一定厚度(0.45mm 或 0.30mm)硅片. 用 M20 金刚砂研磨至表面无切痕及划伤,按对比实验要求用 HNO_3 及 HF 混合液将硅片表面腐蚀去掉一定厚度,制备出具有一定表面状态的硅片. 每种样品 14 片,其中 8 片测抗弯强度,另 6 片以平叠式放入

* 国家教委硅材料重点实验室基金资助项目

谢书银 男,1940 年生,副教授,半导体材料与器件专业

石志仪 女,1939 年生,副教授,半导体材料专业

1996 年 7 月 23 日收到初稿,1996 年 11 月 4 日收到修改稿

KG-2 高温扩散炉中进行 1200℃ 2 小时模拟器件高温工艺热处理后, 快速拉至石英管口处, 自然急冷。

2.2 抗弯强度测试及弯曲度测试

按国家标准 GB/T15615—1995 方法^[4]测定抗弯强度。

按国家标准 GB/T6619—1995 方法^[5]测定热处理前、后的弯曲度变化。

3 实验结果

3.1 表面状态对抗弯强度和弯曲度变化的影响

一段直拉 CZ 单晶($N-(100)$, $\Phi 59\text{mm}$)加工成厚度为 $270\mu\text{m}$ 左右的研磨片, 微腐片(研磨后双面微腐, 各去除 $7\mu\text{m}$)及仿 SiO_2 抛光片(一面去除 $38\mu\text{m}$ 损伤层, 一面去除 $8\mu\text{m}$), 抗弯强度及弯曲度变化测试结果列于表 1。

表 1 表面状态对抗弯强度及弯曲度变化的影响

样品编号	表面加工方式	抗弯强度 σ/MPa	平均弯曲度变化 $\Delta D/\mu\text{m}$
1	研磨片	278	31
2	研磨+微腐	368	14
3	研磨+仿抛	539	6.0

同一单晶制成的硅片, 由于加工方式不同, 表面损伤状况不同, 导致抗弯强度出现明显差别。热处理前后, 弯曲度变化测定结果表明表面损伤小抗弯强度高的

硅片弯曲度变化小。

3.2 硅片种类对抗弯强度和弯曲度变化的影响

直径 2 英寸的 FZ(111) 及 CZ(111) 单晶各一段, 分别加工成厚 $280\mu\text{m}$ 左右的研磨片及双面化腐片(每面去除 $25\mu\text{m}$), 抗弯强度和弯曲度变化测定结果显示表 2。

表 2 的结果, 除了进一步说明表面状态对抗弯强度及弯曲度变化的影响外, 还反映了不同品种的硅片, 抗弯强度高者, 热处理前后弯曲度变化较小。

3.3 硅单晶工艺对抗弯强度和弯曲度的影响

表 2 FZ 硅与 CZ 硅抗弯强度与弯曲度变化比较

编号	种类及表面状况	抗弯强度 σ/MPa	平均弯曲度变化 $\Delta D/\mu\text{m}$
1	FZ 研磨	210	10.11
2	FZ 双面化腐	439	6.3
3	CZ 研磨	219	7.8
4	CZ 双面化腐	504	3.2

从硅器件生产单位和硅单晶生产厂家生产线上抽取不同单晶工艺的三组对照试样, 三组试样表面状况各自相同, 其抗弯强度和弯曲度测试结果列入表 3。

表 3 单晶工艺对抗弯强度及弯曲度的影响

编号	来源	工艺特征	直径/mm	厚度/ μm	表面状态	抗弯强度 σ/MPa	弯曲度变化 $\Delta D/\mu\text{m}$
1	T-60	FZ NTD	60	280	研磨	395*	17.8
	E-60	FZ NTD	60	300	研磨	478*	7.2
2	B-50	FZ	50	620	碱腐蚀	339	3.0
	E-50	FZ	50	425	碱腐蚀	313	5.2
3	96-H-33	H ₂ -FZ 热处理	33	430	研磨	498*	2.1
	96-1-33	H ₂ -FZ	32.5	430	研磨	474*	4.1

有“*”抗弯强度是在每面化腐去除 $25\mu\text{m}$ 的状况下测定的。

第 1 组与第 2 组对比试样为不同单晶生产厂家生产的同种规格的研磨片及碱腐蚀硅

片,因生产工艺不同,抗弯强度及热处理前后的弯曲度变化都有差别,抗弯强度大者,热处理前后弯曲度变化较小。第3组是氢气氛下的区熔单晶,强度测试表明,经过热处理的96-H-33硅片比未经热处理的96-1-33抗弯强度高,尽管硅片直径较小,产生的弯曲度变化也小,但弯曲度变化的实验结果仍表明常温抗弯强度值高的硅片,高温弯曲度变化较小。

4 讨论

硅器件高温工艺过程中,硅片的翘曲或弯曲是各种应力引起塑性形变的结果,产生这些应力的原因很多,除了硅器件高温工艺因素外,单晶硅片本身的因素,如单晶生长及硅片加工工艺,硅片表面损伤状况,硅片位错密度及氧、氮杂质含量及形态也会引起应力。

硅高温塑性形变是位错在(111)面上滑移的结果,晶体中原有位错以及在高温工艺中新产生的位错及它们的运动对滑移起着关键的作用。硅片表面损伤,内部细微裂纹及其它缺陷或第二相沉淀处,因存在的应力场降低了位错成核的能量,形成大量新位错。这些位错按F-R机制增殖和运动,最终导致硅片宏观上的滑移形变。表1和表2实验结果证实了上述分析。表2中,CZ研磨硅片和化腐硅片比FZ研磨硅片和化腐硅片弯曲度变化都小是因为CZ硅中含有比FZ硅高两个数量的氧,氧与硅形成的硅氧络合物集团对位错有钉扎作用^[6],使CZ硅中的位错增殖和运动受阻,难以滑移形变所致。FZ硅中,因缺少这种钉扎力,位错运动及增殖所需阈值应力较低^[7],所以抗翘曲能力较弱。

硅片加工和硅器件生产流程中,硅片的破碎通常是沿(111)面解理破裂,断裂面一般都是整齐的(111)面。在抗弯强度测试中,无论是研磨片还是化腐抛光片,(111)硅片断口通常呈60°或120°,(100)硅片呈90°,断面都是(111)面。研磨硅片由于表面损伤较严重,在较低的外力下,就达到表面裂纹扩张的阈值应力,硅片呈大块解理破裂,硅片强度值低。微腐硅片表面存在较小损伤或裂纹,抛光片表面损伤虽已去除,但硅片内部还存在缺陷及细微裂纹,在进行强度测试中,就由这些较小裂纹或细微裂纹尺寸决定硅片破碎时所需施加的最小外力,所以抛光片的强度比微腐片高,微腐片比研磨片高。CZ硅抗弯强度比FZ硅高是因为CZ硅中硅氧络合物对位错的钉扎作用,阻碍位错运动,减缓了位错塞积,限制硅片内部细微裂纹的形成及长大,使CZ硅解理破碎所需的外力比FZ要大。所以,抗弯强度的高低反映了硅片常温抗破碎的机械性能的好坏。

由上述分析可见,硅片高温下的形变翘曲与常温下的破碎是位错在(111)面上的滑移或是在(111)面解理所致,都与微观上的位错滑移或钉扎有关,高温形变翘曲与常温抗弯强度之间关系密切。各组对比试样可以看出,表面损伤状况,氧的含量及形态,不同的单晶生产和硅片加工工艺等因素对硅片抗高温形变能力及抗常温破碎能力的影响规律是完全一致的,凡是热处理前后弯曲度变化小者,抗弯强度值均较大,既常温抗弯强度值的大小,可以反映硅片在高温器件工艺中的抗形弯能力。这一内在联系的发现,对硅材料力学性能的研究及集成电路与硅器件工艺中有效地控制翘曲都是有益的。

5 结论

1. 硅片表面损伤状况,氧含量及其形态以及硅单晶生长和硅片加工工艺等条件对硅片

高温抗形变能力和常温抗破碎能力的影响规律是一致的,抗弯强度值小的硅片,高温下翘曲形变都比较严重。

2. 高温翘曲或弯曲度与常温抗弯强度关系密切。硅片常温抗弯强度的大小可预示其高温翘曲程度。

参 考 文 献

- [1] K. Morizane and P. S. Gleim, J. Appl. Phys., 1969, **40**: 4104.
- [2] Y. Takano, N. Namba and M. Maki, in: «Semiconductor silicon 1977», (Electrochemical Soc., Princeton., N. J., 1977), 695.
- [3] Yojiro Kondo, in «Semiconductor silicon 1981», edited by H. R. Huff and R. J. Kriegler (The Electrochem. Soc., Inc., Pennington, NJ. 1981), 220.
- [4] 谢书银,石志仪,GB/T 15615—1995,硅片抗弯强度测试方法,北京:中国标准出版社,1995。
- [5] 王从赞,郭瑾,袁景怡,GB/T 6619—1995,硅片弯曲度测试方法,北京:中国标准出版社,1995。
- [6] J. R. Patel in «Semiconductor Silicon 1977», (The Electrochem Soc., princeton, N. J., 1977), 521.
- [7] K. Sumino, H. Harada and I. Yonenaga, J. J. Appl. Phys., 1980, **19**: 49.

Warpage at High Temperature and Mechanical Strength of Silicon Wafers

Xie Shuyin, Shi Zhiyi and Chen Zhongxiang

(Central South University of Technology, Department of Applied Physics and Heat Engineering, Changsha 410083)

Zhang Weilian

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Received 23 July 1996, revised manuscript received 4 November 1996

Abstract The relationship of the warpage at high temperature and flexure strength of silicon wafers is studied by measurement of flexure strength and change of bowingness of silicon wafers after heat treatment. The laws of effect of various factors on warpage and flexure strength of silicon wafers are all the same. The flexure strength of silicon wafer can reflect its ability of anti-warping or bowing at high temperature to a certain degree.

PACC: 6620F, 6620M