

硅片的抗弯强度及其测量*

谢书银 石志仪

(中南工业大学应用物理系 长沙 410083)

摘要 研究了硅片抗弯强度,提出了一种圆片冲击定量测定硅片抗弯强度的方法,讨论了其准确度及精度并通过实验进行了偏离小挠度的校准.

PACC: 6220, 0710, 8170

1 引言

单晶硅片的机械强度是影响半导体器件成品率的重要因素之一,随着使用硅片直径增大和厚度减小,硅片机械强度问题显得日益突出.

许多作者研究了锗、硅这类材料的常温抗破碎性能—抗弯强度, W. C. Dash^[1-3]等人用三点弯方法测定锗、硅在不同表面状态及外界条件下的抗弯强度,讨论了这类有代表性的脆性材料的破碎机理问题,这对于研究这类材料的力学性能有着重大的理论意义. 本文提出了一种测试抗弯强度的新方法,并讨论了其准确度及精度.

2 硅片的抗弯强度

抗弯强度是指试样破碎时的最大弯曲应力,对脆性材料通常是凸表面最大径向拉应力,表征材料的抗破碎能力. 硅是脆性材料,硅片在切、磨、抛加工过程及器件制作工艺中,经常发生破碎现象,破碎一般是沿(111)解理面进行. 硅片抗弯强度反映了硅片在常温工艺过程中抗破碎的能力,实验证明抗弯强度为 $45-52\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的硅片在器件制作中比强度为 $40\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的硅片破碎率下降 20% 左右. 而强度在 $35\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ 以下者,破碎率剧增.

实验发现,硅片常温下抗弯强度值与其高温下一些力学性能,如屈服应力,抗压痕扩展及抗位错滑移能力之间有着一定联系,将另文叙述.

3 硅片抗弯强度的测量

一般脆性材料用弯曲试验方法测抗弯强度. 对硅材料,以前多采用三点弯法. 该方法制

* 高纯硅国家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

1993年12月17日收到初稿,1994年3月4日收到修改稿

样过程麻烦,且测试结果分散度较大,用作常规测试有一定困难.美国 Silec 公司曾报道过以钢球冲击平板支撑样品的方法,但未进行定量的抗弯强度测定.我们用钢球从 1/4 滑轨下滚,冲击垂直简支(Simple supported)放置的圆片试样,推导出抗弯强度计算公式,定量计算抗弯强度值,并做出了相应的测量仪器获得了国家发明专利^[4].

3.1 圆片冲击法测定抗弯强度原理

钢球从 1/4 圆轨道下滚冲击到轨道底端垂直简支放置的圆片试样上,不断升高钢球下滚高度,直到打破试样(图 1).根据薄板理论,圆板受到垂直板面方向的轴对称载荷时,圆板呈对称弯曲.在小挠度情况下,用 q 表示轴对称分布载荷强度,薄圆板的弯曲挠度方程可写为

$$\frac{d^4W}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3W}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2W}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{dW}{dr} = \frac{q}{D} \quad (1)$$

式中 W 为圆板半径 r 处中心面弹性形变前后的相对位移(挠度), D 为圆板弯曲刚度,这个微分方程的解为

$$W = C_1 r^2 + C_2 r^2 \ln r + C_3 \ln r + C_4 + W^* \quad (2)$$

根据载荷情况和边界条件可定出特解 W^* 及积分常数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 ,就可求出圆板半径 r 处的挠度表达式和圆板中心的最大挠度.当圆板中心受到集中载荷时,最大压应力发生在圆板正面中心处,最大拉应力发生在圆板背面中心处.对于脆性材料一般用脆断时圆板背面中心处所受拉应力来表示材料的抗弯强度.硅是典型脆性材料,受冲击直到破碎塑性形变很小,均在弹性形变范围,结合弹性碰撞理论就可以导出硅圆片中心受到集中冲击载荷破碎时,圆片反面所需最小拉应力即硅片抗弯强度 σ_c .

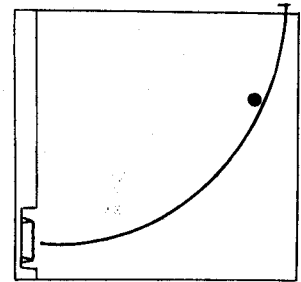


图 1 圆片冲击法示意图

$$\sigma_c = X(PH/B)^{1/2} \frac{1}{A} (Y \ln \frac{A}{B} + Z) \quad (3)$$

式中 $X(\text{kg}/\text{mm}^2)^{1/2}$ 、 Y 、 Z 为与硅材料弹性模量和泊松比有关的系数,例如对 $\langle 100 \rangle$ 硅单晶分别为 207, 0.621 及 1.146; P 为钢球质量 kg ; B 为圆片厚度 mm ; A 为圆片简支半径 mm ; H 为打破试样时钢球下落高度 mm ; σ_c 为抗弯强度测定值 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 或化为 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.2 圆片冲击法的准确性

通常硅片用三点弯法测定抗弯强度,我们将本法与三点弯法结果进行比较.取一段单晶间隔切片分成两组,一组制成规定尺寸^[5]的条状试样(20—30 条)供三点弯测试用.另一组制成直径 $\Phi 40\text{mm}$,厚度为 1mm 的圆片试样(10 片),两组严格进行同样表面加工处理后分别用三点弯法及冲击法测定抗弯强度,表 1 列出五段单晶的对比数据,由表可见冲击法测得的抗弯强度与三点弯法一致性相当令人满意.一般三点弯法结果比冲击法稍低,这可能是三点弯法所用条状试样侧面状态对测试影响较大所致,两种方法相比,圆片冲击法精度优于三点弯法.

3.3 圆片冲击法的精度

为进一步检验冲击法的精度,取八段单晶分别连续切成一定厚度硅片十片左右,经严格

表面加工后测其抗弯强度、求平均值 $\bar{\sigma}$ 及相对标准偏差列于表 2. 表 2 结果表明, 圆片冲击法测定抗弯强度相对标准偏差约为 5—8%.

表 1 圆片冲击法与三点弯法比较

编 号	冲 击 法		三 点 弯 法	
	抗弯强度平均值 $\bar{\sigma}$ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	相对标准偏差 $S/\bar{\sigma}$ %	抗弯强度平均值 $\bar{\sigma}$ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	相对标准偏差 $S/\bar{\sigma}$ %
1	55.7	9.2	53.2	28
2	54.1	8.9	52.5	20
3	36.8	8.5	34.3	20
4	17.0	8.3	15.9	14
5	18.6	9.1	17.8	14

3.4 强度的校准

公式(3)的推导过程中, 假定试样破碎时, 圆片中心的最大挠度 W 比圆片厚度 B 小^[6], 因此使用此公式进行强度计算时, 要求圆片试样有一定厚度, 且硅片强度值越高, 所需试样厚度也应相应加大. 实际市售硅切割片, 研磨片和抛光片的厚度一般都达不到此要求, 为了能直接测定市售各种硅片抗弯强度, 我们通过实验进行了当硅片厚度较小及强度值较大时偏离小挠度条件的校准, 求得校准系数 K .

表 2 圆片冲击法的精度

编号	抗弯强度 $\bar{\sigma}$ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	相对标准偏差 $S/\bar{\sigma}$ %
1	79.8	8.0
2	54.2	6.6
3	35.9	8.3
4	22.2	5.4
5	21.4	8.4
6	19.5	5.6
7	19.5	8.2
8	15.0	5.3

表 3 硅片强度 $\bar{\sigma}_c$ 与厚度 \bar{B} 的关系

编号	厚 度 \bar{B} mm	抗弯强度 $\bar{\sigma}_c$ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$
12-1	0.302	52.6
12-2	0.420	45.7
12-3	0.548	42.4
12-4	0.705	35.8
12-5	0.909	35.6

取十五段单晶, 每段分别间隔切成 5 种不同厚度(厚度公差在 $10\mu\text{m}$ 以内)的硅片 50 片, 按厚度分成 5 组, 各组硅片都严格按照规定的研磨或研磨加抛光进行同样表面加工后, 测定各组硅片的强度并取平均值 $\bar{\sigma}_c$ 为该组的抗弯强度, 该组硅片平均厚度为 \bar{B} . 表 3 列出某段单晶的 $\bar{\sigma}_c$ 与 \bar{B} 的关系. 得到 σ_c - B 曲线如图 2, 由图可见随 B 增大, σ_c 下降并趋近常数 σ , σ 为该单晶在符合小挠度条件下测得的抗弯强度值, 即该单晶硅片的真实抗弯强度. 令 σ 与曲线上不同厚度时的 σ_c 之比 $\frac{\sigma}{\sigma_c} = K$, K 就是厚度为 B , 强度为 σ_c 时的校准系数. 其余各段单晶同样做出各自的 σ_c - B 曲线, 取其中两条绘入图 2. 取 $B=0.3$ 时各曲线上的 σ_c 与相应的 K 值对, 得到 $B=0.3$ 的 K - σ_c 曲线, 见图 3, 同样可得 $B=0.35, 0.4, \dots, 0.9\text{mm}$ 时的 K - σ_c 关系曲线, 从各曲线上读出 K 与 B 及 σ_c 关系列成 K - B - σ_c 关系表(略). 当偏离小挠度情况时, 硅片抗弯强度测试值 σ_c 乘以校准系数 K 即为硅片的真实强度:

$$\sigma = \sigma_c K \tag{4}$$

为验证 K 值的准确度,取三段单晶按前述方法各自加工成不同厚度硅片,测得各不同厚度硅片的抗弯强度测试值 $\bar{\sigma}_c$,查表找到相应 K 值并按(4)计算各自抗弯强度真实值列于表 4,由表 4 可见,由不同厚度硅片测得的抗弯强度测试值 $\bar{\sigma}_c$ 经用校准系数校准后所得的真实强度值之间有很好的—致性,说明校准系数 K 值是可靠的.

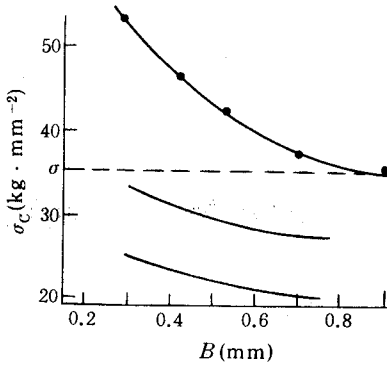


图 2 σ_c - B 关系曲线

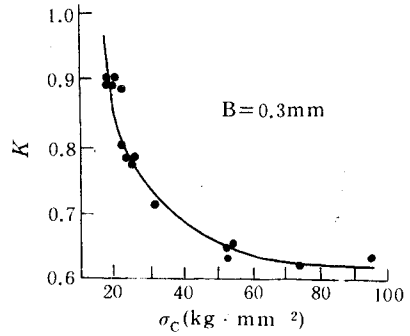


图 3 $B=0.3$ 时, K - σ_c 关系曲线

表 4 K 值准确度的验证

CZ(111)研磨片				FZ(111)抛光片				CZ(111)抛光片						
编号	\bar{B} mm	$\bar{\sigma}_c$ kg · mm ⁻²	K	σ kg · mm ⁻²	编号	\bar{B} mm	$\bar{\sigma}_c$ kg · mm ⁻²	K	σ kg · mm ⁻²	编号	\bar{B} mm	$\bar{\sigma}_c$ kg · mm ⁻²	K	σ kg · mm ⁻²
1-1	0.32	23.0	0.81	18.6	2-1	0.40	57.4	0.69	39.6	3-1	0.33	47.2	0.68	32.1
1-2	0.41	22.2	0.87	19.3	2-2	0.48	50.5	0.74	37.4	3-2	0.43	45.6	0.74	33.3
1-3	0.52	19.9	0.93	18.5	2-3	0.60	50.8	0.79	40.1	3-3	0.56	43.7	0.80	34.9
1-4	0.67	19.5	0.97	18.9	2-4	0.87	46.5	0.94	43.7	3-4	0.73	36.1	0.92	33.2
										3-5	0.97	32.0	1.00	32.0
$\bar{\sigma}_1=18.8, S/\bar{\sigma}_1=1.9\%$				$\bar{\sigma}_2=40.2, S/\bar{\sigma}_2=6.5\%$				$\bar{\sigma}_3=33.2, S/\bar{\sigma}_3=3.6\%$						

4 结论

硅片抗弯强度反映常温下硅片在加工工艺中的抗破碎性能. 本文提出了一种圆片冲击法测定硅片抗弯强度的定量方法,并给出了当不符合小挠度情况时的校准系数,该方法简便准确,适用于硅片抗弯强度常规测试.

参 考 文 献

- [1] W. C. Dash, in *Growth and Perfection of Crystals*, edited by R. H. Doremus. Wiley, New York, 1958, 189.
- [2] O. W. Johson and P. Gibbs, *Fracture of Solids*, AIME Metals. Soc. Conference, Vol. 20, NY 1962, 315.
- [3] J. V. Craig and E. N. Pugh, *Acta. Met.*, 1967, **15**:1309.
- [4] 谢书银, 石志仪, 施锦行, 脆性材料强度测试方法及其测试仪, 中南工业大学, 中国, 发明专利, 85 1 00343. 5, 1988-03-09.
- [5] 石志仪, 谢书银, 余思明, *半导体学报*, 1993, **14**:174.
- [6] 钱伟长, 叶开沅, *弹性力学*, 北京: 科学出版社, 1956, 253.

Flexure Strength of Silicon Wafer and Its Measurement

Xie Shuyin and Shi Zhiyi

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

Received 17 December 1993, revised manuscript received 4 March 1994

Abstract The flexure strength of silicon wafer is investigated. A test method for measuring flexure strength quantitatively is put forward. It adopts circular wafer sample and impact loading. The accuracy and precision are discussed, and the calibration factor for deviation from small deflection is determined through experiment.

PACC: 6220, 0710, 8170