

(YIG)单晶球在6—300K温度范围内进行了三厘米波段铁磁共振测量, 所得结果如图3及图4所示. 结果与文献[6,7]报道的数据是符合的, 所以系统是可靠的.

这种低温容器不仅对一些磁学测量向液氮温度扩展提供了便利条件, 由于细管下端便于光和电磁波穿透, 在顺磁共振、核磁共振、光谱测量等多学科实验及测量向液氮温度扩展也提供了一定的技术参考.

对于书吉、高植权同志及上海玻璃仪器一厂加工

试制玻璃杜瓦瓶, 作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] A. S. Brill et al., *Magnetic Resonances in Biological Research*, (1971), 389.
- [2] 李荫远、李国栋, 铁氧体物理学(修订本), (1978).
- [3] G. K. 怀特著, 洪朝生等译, 低温物理实验技术, 科学出版社, (1962).
- [4] R. B. 斯科特著, 低温工程, 科学出版社, (1977).
- [5] J. F. Dillon, Jr. et al., *Rev., Sci. Instr.*, **30**(1959), 559.
- [6] E. G. Spencer et al., *Phys. Rev.*, **123** (1961), 1937.
- [7] J. F. Dillon, Jr., *Phys. Rev.*, **105** (1957), 759.

用X射线形貌术测定晶片的曲率

郭 常 霖

(中国科学院上海硅酸盐化学与工学研究所)

人工培育的晶体或天然的晶体一般都带有一定程度的应变. 用单晶体制作器件时, 往往又需加工成较薄的晶片. 通过各种工序, 晶片受到机械、高温等的作用, 将进一步产生范性或弹性形变. 过大的形变会影响器件的性能, 甚至不能使用. 因此, 对不同工艺过程中的晶片或经过使用的成品晶片, 进行弯曲形变程度的非破坏性定量测定是十分必要的.

Juleff^[1]曾对硅单晶器件晶片的单轴均匀弯曲用X射线形貌照相法作过测量. Cohen^[2]曾用双晶衍射仪测定晶片弯曲. 这些方法分析了单轴均匀弯曲且弯曲轴垂直于仪器水平面的情形. 本文对适用性强而又简便的透射形貌术用于晶片弯曲的测定作较详细的分析, 提出几种测定晶片弯曲程度的方法.

一、透射扫描形貌术测定晶片弯曲

普通的Lang形貌相机很适用于作晶片弯曲的非破坏性测量. 可测定曲率半径从0.3 m

至50 m的弯曲形变, 比较灵敏. 实验条件如X射线焦点大小、射线束发散度、晶片的厚度等的

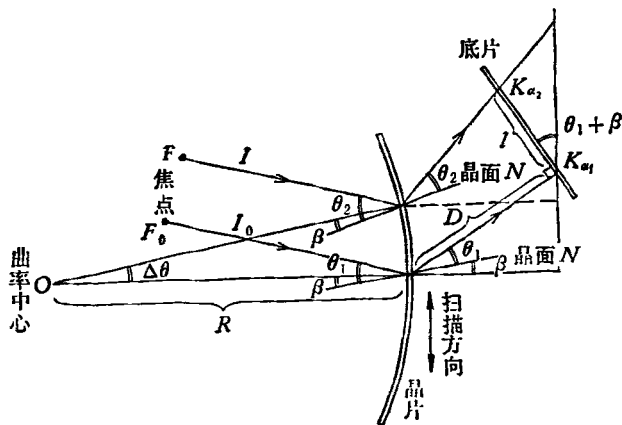


图1 单轴均匀弯曲晶片在理想情形下透射扫描形貌术衍射几何

不同对弯曲的测定都有影响. 下面分别对不同情况的衍射几何作一分析.

1. 理想平行窄入射线束情形

设射线源焦点为理想的几何点, 入射线为平行窄束, 无发散, 晶体厚度可忽略时的情形. 无论晶体弯曲与否, 调节晶体至衍射位置仅能获得一条细的圆弧形衍射线, 晶片较小而平时, 近似为直线.

对于均匀单轴弯曲晶片, 调节晶体使其弯曲轴垂直相机水平面时, K_{α_1} 衍射线为一条垂直的直线. 作扫描形貌术照相时, 相当于入射线束 I_0 相对于晶体作平行扫描, 衍射几何如图 1 所示. 假如晶片不弯曲, 扫描过程中一直满足 K_{α_1} 衍射而不出现 K_{α_2} 线; 因晶片弯曲, 扫描一开始晶片已立即偏离衍射位置. 在图 1 所示的扫描方向时, 衍射角逐渐增大, 所以入射线到 I 位置时, 符合 K_{α_2} 衍射条件, 出现 K_{α_2} 衍射线. 一般形貌照相中底片与衍射线垂直, 照片上 K_{α_1} 与 K_{α_2} 衍射线的距离 l 与晶片曲率半径 R 的关系可从图 1 求出

$$\begin{aligned} \frac{l}{\cos(\theta_1 + \beta)} &= D \cos(\theta_1 + \beta) \\ &\cdot \operatorname{tg}(\theta_2 + \Delta\theta + \beta) + R \cdot \operatorname{tg} \Delta\theta \\ &- D \cos(\theta_1 + \beta) \cdot \operatorname{tg}(\theta_1 + \beta) \\ &= \frac{D \cdot \sin 2 \cdot \Delta\theta}{\cos(\theta_1 + \beta)} + R \cdot \operatorname{tg} \Delta\theta, \end{aligned}$$

其中 β 为衍射晶面与晶片表面法线夹角, $\Delta\theta$ 为 K_{α_1} , K_{α_2} 对该衍射晶面的衍射角之差, 所以

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta.$$

因晶片至底片之距离 D 比曲率半径 R 要小得多, 且 $\Delta\theta$ 为几分的小角, 故前式可改写为

$$R = \frac{l}{\Delta\theta \cdot \cos(\theta + \beta)}.$$

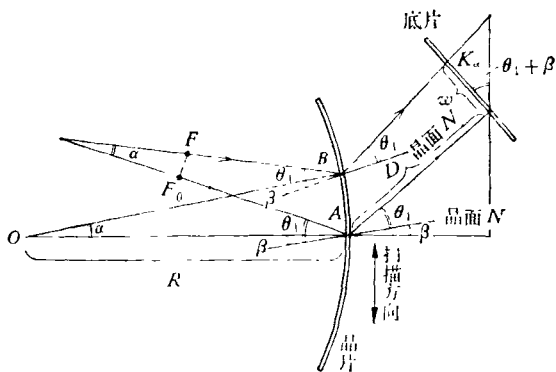


图 2 单轴均匀弯曲晶片在一般情形下透射扫描形貌术衍射几何

对于对称劳厄情形, $\beta = 0$, 故

$$R = \frac{l}{\Delta\theta \cdot \cos \theta} = \frac{\lambda \cdot l}{\Delta\lambda \cdot \sin \theta}.$$

从图 1 显然可见, 若晶片向如图的反向弯曲(即焦点 F_0 和曲率中心 O 在晶片的不同侧), 则图上 K_{α_1} 和 K_{α_2} 的位置也颠倒. K_{α_1} 线比 K_{α_2} 线强一倍, 故可从 K_{α_1} 和 K_{α_2} 的左右方位决定晶片的弯曲方向.

2. 一般发散入射线束的情形

实际情形焦点有一定大小, 设水平宽度为 f_H , 射线束发散度为 α , 若限制光阑水平宽为 S_H , 焦点至光阑距离 D_1 , 则

$$\alpha = \frac{f_H + S_H}{D_1}.$$

扫描形貌图上仍出现 K_{α} 双线, 当 f_H, α 不太大时, K_{α} 双线距离 l 与前一种情形一样. 每一线的宽度 w 则随 R 及 α 而不同. 从图 2 可知, 由于焦点有一定大小, 射线束又发散, 在扫描时, 一定范围内 K_{α_1} 衍射条件仍能满足. 从 A 向 B 扫描时, 要满足 K_{α_1} 衍射角 θ_1 , 则入射线入射角不断增大. 到 B 点时恰等于发散角 α , 故 AB 范围是能产生 K_{α_1} 衍射线的区域. 对应的 K_{α_1} 线宽 w 可从图 2 求出

$$w = R \cdot \alpha \cdot \cos(\theta + \beta),$$

所以

$$R = \frac{w}{\alpha \cdot \cos(\theta + \beta)} = \frac{w \cdot D_1}{(f_H + S_H) \cdot \cos(\theta + \beta)}.$$

二、直接用计数率计测定单轴均匀弯曲

在 Lang 形貌相机上调节晶片方位至出现 K_{α_1} 衍射, 并在计数率计上出现强度极大值. 平移扫描晶片, 因偏离衍射条件, 强度降低并趋向于零. 从图 2 可知, 若旋转晶片, 又可满足衍射条件. 平移晶片使 B 至 A , 并旋转 α 角, 则又出现 K_{α_1} 衍射. 所以, 若平移距离为 S , 旋转晶片 ϕ 角后, 又从计数率计上出现 K_{α_1} 强度极大值, 则

$$R = \frac{S}{\phi} \quad (\phi \text{ 以弧度为单位}).$$

显然这种办法比照相法更为方便快速. 可以边平移一段距离 S 值, 边读出此时需转的角度 ϕ , 来检查晶片不同部位曲率半径的变化.

这一方法对不均匀形变不适用。这种情形在调节晶体时计数率计也能出现强度极大值。然而它仅是不均匀衍射花样的一种叠加效应，测出的数据并不正确反映晶片的曲率半径。因此，照相法仍有其重要作用，它能反映晶片整体的弯曲状况，特别是不均匀弯曲的状况。

三、X射线摄象电视系统直接测定弯曲

用计数管探测衍射线强度使单轴均匀弯曲晶片的弯曲轴调到垂直相机水平面是很费事的，对于不均匀弯曲的晶片，更难分别测定各部分的曲率半径。用X射线摄象管电视显示系统可以克服这些困难。由于只需直接观察衍射线方位，故可用分辨率不高但比较灵敏的X射线图象增强管或正析摄象管。我们曾将X射线摄象管用于形貌术的晶体调向工作。实际上，测定晶片曲率时，摄象管电视系统起的作用就是调向的作用。

晶片不扫描时，一定发散度的人射X射线

也可将某一段衍射线调成垂直，并记住衍射线在电视屏上的位置。平移晶体一段距离 S ，并旋转晶片一定的 ϕ 角，使该段衍射线重新移回到电视屏上原来的位置。可以利用计数管测定晶片弯曲的公式 $R = S/\phi$ 来求出晶片曲率。

从原理上，X射线摄象电视系统测定晶片曲率与用计数管的方法完全相同，然而电视方法十分直观，适应性强，调向方便，能迅速定量测定不均匀弯曲晶片的各部分形变，因而是很有前途的方法。

四、测定实例

我们对硅、云母、氟化锂、铈酸锂等许多晶体的加工或成品晶片进行了弯曲程度测定。下面以云母为例。

1. 单轴均匀弯曲晶片

在合成氟金云母大面积(001)晶片中，有些带有均匀的弯曲形变。从一块厚约1mm的晶片两头切下两小块(晶片A及B)，因而曲率应大致相同。形貌照片(图4)表明：它们均为单

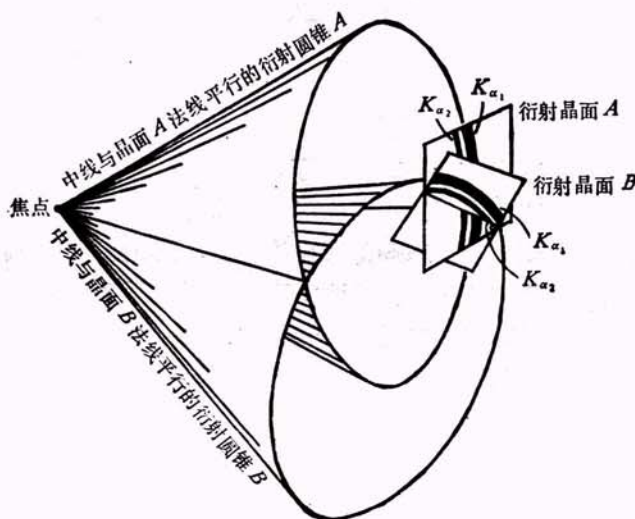


图3 不扫描时的衍射几何。晶面方位不同，衍射双线方位也不同。衍射圆锥A及B的中线分别与晶面A及B的法线平行

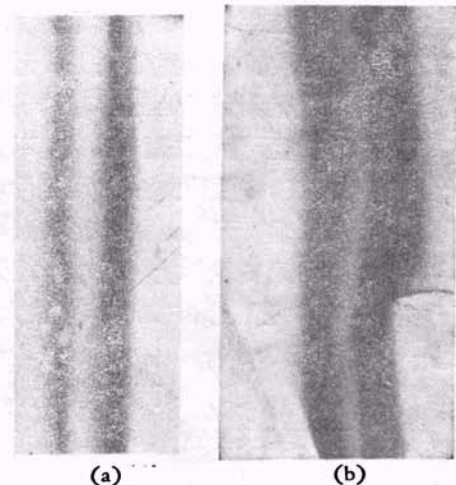


图4 单轴均匀弯曲的合成云母晶片透射形貌图 (Mo靶,微焦点X光源,(060)衍射,照片放大约4倍)

束将产生 K_{α} 。双线衍射花样(图3)，不均匀形变的晶片，其 K_{α} 。双线受到扭曲。用衍射线电视图象作为监控手段，可以很容易调节晶体将某一对衍射线调成垂直取向。即使是不均匀形变，

轴均匀弯曲且弯曲轴垂直于相机水平面。形貌照相条件为：微焦点X射线源(靶面焦点小于 200μ ，故 f_H 约为0.02mm)，Mo靶，30kV， $350\mu A$ ，限制光阑对晶片A及B分别为 $S_H = 0.2$

mm 及 0.4 mm, $D_1 = 300$ mm, 选云母 (060) 衍射, $\theta = 13.4^\circ$.

用测双线距离 l 、线宽 w 后进行计算及用计数率计直接测定等三种方法测定两晶片的曲率, 结果如表 1 所示。

表 1 单轴均匀弯曲晶片 A 及 B 的曲率半径测定数据

方 法	晶 片 A		晶 片 B	
	测量数据	曲率半径	测量数据	曲率半径
线距法	$l=2.5$ mm	1.8 m	$l=2.4$ mm	1.6 m
线宽法	$w=1.2$ mm	1.9 m	$w=2.1$ mm	1.6 m
计数率计法	$S = 27$ mm $\phi = 0.78^\circ$	2.0 m	$S=5.0$ mm $\phi=0.175^\circ$	1.6 m

可见几种测定方法结果相近。线距法测大曲率半径较好, 不然因 l 值测量误差容易引起 R 值不准。线宽法最好用大的限制光阑 S_H , 如晶片 B 测定例, 曝光时间宜长些。只要确准为单轴均匀弯曲, 计数率计法最方便, 也不易引入误差。

2. 不均匀弯曲晶片

经过多道工序后的极薄云母晶片 (15μ) 常出现不均匀形变。在未拍形貌图前无法用计数率计法或双晶衍射仪法测定。若拍出的形貌图 K_α 双线不垂直于衍射矢量 (图 5), 不能准确进行定量测量, 仅能估计。若旋转晶片, 另找衍射, 使 K_α 双线垂直于衍射矢量 (图 6), 则可定量测定曲率。如图 6 晶片上部曲率半径为 3.0 m, 下右部曲率半径则为 0.45 m, 相差较大, 中间经过一个转折。

用 X 射线摄象电视系统很容易将图 5 那样取向的衍射双线调向成图 6 那样取向的双线, 并可直接用摄象电视法测定各部分曲率。

3. 极不均匀弯曲的晶片

只出现很不规则的衍射图案 (图 7), 已分



图 5 不均匀弯曲电容器成品合成云母晶片透射形貌图



图 6 不均匀弯曲合成云母晶片透射形貌图



图 7 极不均匀弯曲天然云母晶片透射形貌图

不出 K_{α_1} , K_{α_2} 双线了, 要定量测定曲率半径是不可能的。但可从不同晶片衍射图案的不均匀程度估计不均匀形变的程度, 这在实际应用上是有价值的。例如, 不均匀形变严重的天然云母不能作 X 射线分光晶体。因而, X 射线形貌术估计晶片的不均匀弯曲程度可用于分光晶体的初选和检查中。

参 考 文 献

- [1] E. M. Juleff, *Inter. J. Electronics*, **19**(1965), 153.
- [2] B. G. Cohen and M. W. Focht, *Sol. State Electronics*, **13**(1970), 105.