

图6 LIA 在分析仪器中的应用

置。A点是电调制加于电子枪的位置。B点是在样品上加一调制电压的位置，周期地调制样品的发射电子。C和D也是加电调制的位置，加在扫描线圈和偏转线圈上。E和F点只能用斩波盘的机械调制。当然也可在能量分析器上，这在图中未标出，因为调制方法相同。既然至少可在A至F六个位置加以调制，至于选择何处为好，则要取决于测量要求。例如，若要得到清晰的衍射照片，就不能在电子枪A点调制；

若由于样品荷电而引起灵敏度降低或样品电流不能用作信息处理，则不能在B点调制，等等。另一方面，调制位置也取决于设备的空间结构，例如E点往往是在真空系统中，加入斩波器将带来漏气与密封的矛盾；F点则是在真空室外。所以需要根据实际情况而定。但一般来说，调制位置在系统中的较前端为好，例如E点优于F点，因为积累噪声较小，有利于检测。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组、江西庐山电子仪器厂，物理，6(1977)，206。
- [2] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组，物理，6(1977)，335；7(1978)，45。
- [3] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组，物理，9(1980)，236。
- [4] J. C. L. van Peppen, Modern Electronic Measuring Systems, Delft University Press, (1978), 119.
- [5] D. P. Blair and P. H. Sydenham, J. Phys. E, 8(1975), 621.
- [6] 陈佳圭，仪器仪表学报，1(1980)，108。

如何获得高分辨高质量的 X 射线形貌图

麦 振 洪

(中国科学院物理研究所)

X射线形貌术是研究晶体材料缺陷的重要工具之一。目前，它被广泛地用来研究晶体材料的生长缺陷、加工缺陷以及使用缺陷。

本刊已发表了若干文章，介绍了X射线形貌术的基本原理、实验方法、主要应用和发展方向^[1-3]。本文仅就如何获得高分辨、高质量的形貌图这个X射线形貌工作者最关心的问题，结合我们的工作，以Lang透射形貌术为例谈我们的体会，着重讨论影响形貌图质量的几个主要因素。

一、X射线源大小和波长发散度的影响

Lang相机的分辨率直接与X射线源的大物理

小和波长有关。有关分辨率的分析已有文章叙述^[4]，这里只从实验的角度来讨论。

1. 形貌图的垂直分辨率

这是影响形貌图分辨率最重要的参数，其值为 $\Delta X_{\perp} = h_{\perp} \cdot \frac{b}{a}$ ，其中a为光源到样品的距离，b为样品到底片的距离， h_{\perp} 为X射线源投影焦点的垂直高度。可见，使用小焦点光源，减少b和增大a是提高分辨率的措施。目前，国外一些形貌相机准直光阑长达1.5m，而且，对某些高分辨实验，b甚至只有2mm左右。应指出，采用小焦点X射线源对提高垂直分辨率尤为重要，如对高分辨形貌图 $\Delta X_{\perp} \sim 1\mu\text{m}$ ，若 $b = 5\text{mm}$ ，对 $h_{\perp} = 1\text{mm}$ ，即 $a = 500\text{cm}$ ；而对

$h_{\perp} = 0.2\text{mm}$, 只需 $a = 100\text{cm}$.

2. 形貌图的水平分辨率

影响水平分辨率的主要因素有三个:

(1) 完整晶体固有的 Bragg 反射角宽的影响: 根据 X 射线动力学衍射理论^[5], 完整晶体固有的 Bragg 反射角宽为

$$\beta = \frac{2N\lambda^2}{\pi \sin 2\theta} |F| k \frac{e^2}{mc^2},$$

其中 N 为单胞内原子数; $|F|$ 为结构因子; k 为偏振因子; θ 为 Bragg 角; $\frac{e^2}{mc^2}$ 为电子半径. 在底片上造成衍射象宽度 $\Delta X = b\beta$. 一般情况 β 值很小, 约几秒, b 为几毫米, 故此值可忽略.

(2) 入射束水平发散度的影响: 如果入射束 K_{α} 双线都参与衍射成象, 会使形貌图形成双象和图象弥散. 这个问题可采取下列办法克服: ① 采用 K_{β} 特征谱, 但其强度约只有 K_{α} 的 1/5; ② 采用滤波片把 K_{α} 两线中其中一条滤掉, 这也会使能量损失; ③ 用准直光阑或单色器. 单色器可获得水平发散度只有几秒的单色 X 射线, 而准直光阑水平发散度为

$$\Delta\theta_{\parallel} = \frac{h_{\parallel} + s}{a_1},$$

其中 h_{\parallel} 为 X 射线源投影焦点的水平尺寸; s 为准直光阑宽度; a_1 为光源到准直光阑的距离.

(3) 波长固有色散的影响: X 射线特征谱有一定谱宽 $\Delta\lambda$, 相应的 Bragg 角度变化为

$$d\theta_{\lambda} = \tan \theta \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

由此引起图象发散为 $\Delta X_{\lambda} = b \cdot d\theta_{\lambda}$. $\Delta\lambda/\lambda$ 值一般很小, 约为 10^{-4} 量级. 表 1 列出晶格常数

为 1\AA 和 3.5\AA 衍射各种特征辐射波长固有色散对衍射象的影响. 可见, 对 θ 角大于 30° 的情况, 必须使 b 小于 1cm 才能获得较好的分辨率. X 射线 K_{α} 两谱线引起的衍射角差比 K_{α_1} 固有色散造成的 $d\theta_{\lambda}$ 大许多倍 (见表 1). 故准直分离 K_{α_1} 和 K_{α_2} 非常重要, 即要求

$$\frac{h_{\parallel} + s}{a_1} < \tan \theta \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

通常情况下, 对每台形貌相机的 X 射线源和准直光阑是一定的, 也就是说 h_{\parallel} , h_{\perp} 和 a 是一定的, 一般只变动光阑宽度 s . s 的选择由照相方式、样品完整性、光源焦点大小等因素决定. 最好选用细焦点 X 射线源作辐射源. 由于照相底片乳胶颗粒度对分辨率的限制, 对一般透射投影形貌工作, 焦点选用 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$ 均可. 对大焦点的 X 射线源, 可采用第一狭缝 (以减少射线束的发散度) 和加大 a 等措施来提高分辨率. 其具体选用由入射束强度和所要求的分辨率等因素决定. 图 1 是 YAG 单晶的形貌图, 焦点尺寸为 $1 \times 10\text{mm}$, $a_1 = 1050\text{mm}$, 两狭缝采用 0.2mm 和 0.1mm . 从图可清楚地看到生长条纹和三种不同的位错线束, 说明其分辨率还不错.

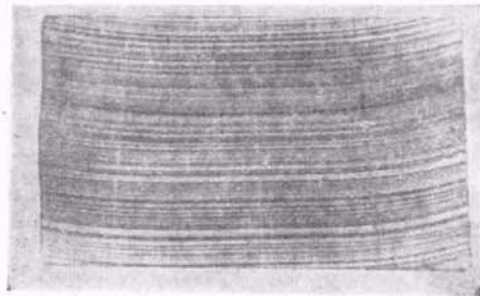


图 1 YAG 单晶透射投影形貌图
($\text{Mo } K_{\alpha_1}$ 辐射, 444 衍射)

表 1 X 射线固有色散对衍射象的影响 (设 $b = 10\text{mm}$)

特征辐射	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$d = 1\text{\AA}$				$d = 3.5\text{\AA}$			
		θ°	$d\theta_{\lambda}'$	$\Delta X_{\lambda}(\mu\text{m})$	K_{α} 双线衍射角差 $\Delta\theta'$	θ°	$d\theta_{\lambda}'$	$\Delta X_{\lambda}(\mu\text{m})$	K_{α} 双线衍射角差 $\Delta\theta'$
$\text{Cu } K_{\alpha_1}$	3.8×10^{-4}	50.35	94.57	4.58	1080	12.7	17.7	0.85	360
$\text{Mo } K_{\alpha_1}$	4.1×10^{-4}	20.75	32	1.55	1080	5.8	8.6	0.42	360
$\text{Ag } K_{\alpha_1}$	5.1×10^{-4}	16.25	30.5	1.48	720	4.58	8.4	0.40	360



图2 钷榴石榴石单晶透射投影形貌图
(Mo K_{α_1} 辐射)

对投影形貌法, 光阑 s 约为 $100\mu\text{m}$. 但当样品完整性差, 如嵌镶结构严重, 若采用小狭缝, 所得形貌图中晶体各部分强度不均匀. 这时, 应采用大狭缝, 增大入射束的发散度, 从而得到较好的形貌图. 图2是钷榴石榴石单晶形貌图, 虽然嵌镶结构严重, 但采用 0.5mm 和 0.2mm 狭缝后衬度显著改善. 图3是不同狭缝 s 对投影形貌图的影响. 可看到, 狭缝宽为 $720\mu\text{m}$ 时, 反映样品内辐照损伤应力情况较好. 对截面形貌法, 光阑宽度 s 的影响较大. 图4是同一金刚石样品不同 s 的形貌图. 可看到小狭缝时分辨率显著提高. 如果 s 大于 $50\mu\text{m}$, 由于入射束各部分相互作用, 形貌图将变得模糊, 甚至看不清细节. 当然, s 不能太小, 否则入射束强度太弱, 而且, 光阑滑片加工不平行或不光滑都会引起入射束不均匀. 因此, 选择要适当.

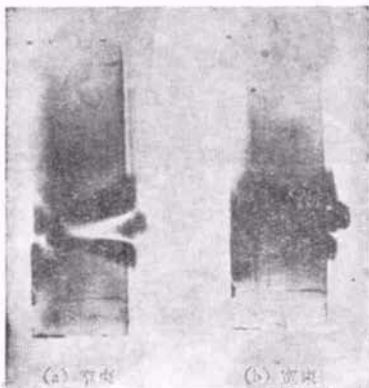
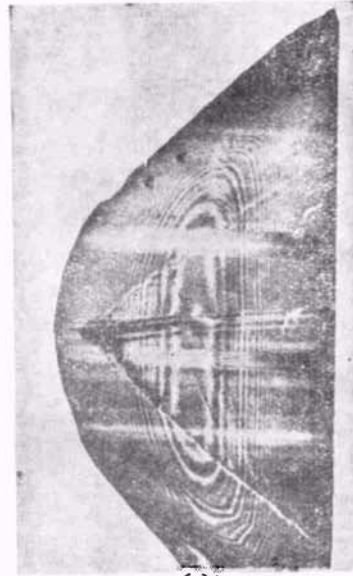
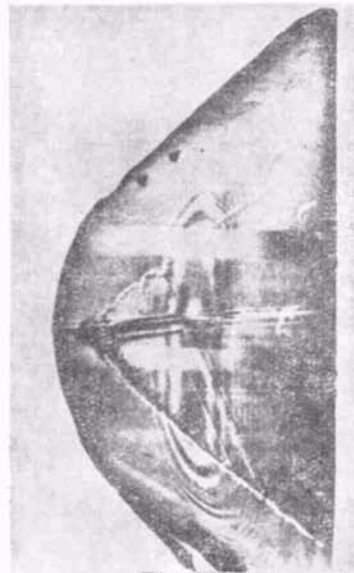


图3 不同狭缝 s 对投影形貌图分辨率的影响
[样品: 金刚石, Cu K_{α_1} 辐射, 220 衍射. 狭缝宽: (a) 为 $100\mu\text{m}$; (b) 为 $720\mu\text{m}$]



(a)



(b)

图4 不同狭缝 s 对截面形貌图分辨率的影响
[样品: 金刚石, Cu K_{α_1} 辐射, 220 衍射. 狭缝宽: (a) 为 $10\mu\text{m}$; (b) 为 $20\mu\text{m}$]

总之, 光源焦点、光阑宽度和准直管长度的选取是一个综合效应, 要考虑各种因素的影响和实验条件的限制, 从经验中选取最佳值.

二、照相底片的影响

要精确记录缺陷细节, 除相机的分辨率外, 照相底片的影响也很大. 首先, 要求底片乳胶

颗粒度小,以确保相机的分辨率。国外X射线形貌工作普遍用ILFORD公司生产的L4型核乳胶片,其颗粒度未显影前约为 $0.14\mu\text{m}$ 。对高分辨形貌图甚至要采用颗粒度更小的核乳胶片。但颗粒度越小,曝光时间越长。目前,国产的X光软片颗粒度约为 $10\text{--}20\mu\text{m}$,不能用于截面形貌图,远不适应形貌和电镜工作的要求,呼吁有关部门给予重视。中国科学院原子能研究所和天津感光材料厂生产少量核乳胶底片,颗粒度比前者有明显改善。但使用核乳胶片时,曝光时间比普通X光软片约增加10倍以上。

其次是乳胶层厚度。乳胶层要求均匀和一定厚度。如果乳胶层太厚,底片又不垂直于衍射束,由于X射线倾斜通过乳胶层而使分辨率降低。但是,如果乳胶层太薄,容易引起对光子吸收的统计起伏,从而影响形貌图的质量。一般使用的厚度:对 $\text{Ag } K_{\alpha}$ 为 $100\mu\text{m}$, $\text{Mo } K_{\alpha}$ 为 $50\mu\text{m}$, $\text{Cu } K_{\alpha}$ 为 $25\mu\text{m}$ 。对 $100\mu\text{m}$ 厚的乳胶层,要求底片垂直衍射束,其偏离小于半度。

第三是底片显影、定影过程的影响。对核乳胶片,建议在低温下显影(如 $-1\text{--}5^{\circ}\text{C}$),最好不超过 10°C 。因为扩散速率随温度变化不大,而显影速率却随温度的自然幂指数变化。因此,在低温下,显影时间要增长,可得到清晰、黑度均匀的图象。对普通X光软片,也建议在较低温度下进行为好。为消除双面乳胶的影响,可采取单面显影的办法。暗室操作必须十分小心,以防止损伤乳胶层。图5是单晶硅的投影

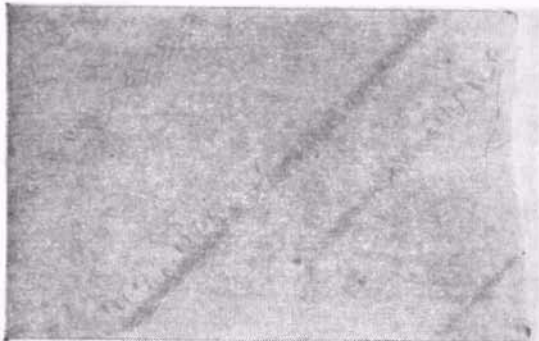


图5 硅单晶透射投影形貌图
($\text{Mo } K_{\alpha}$ 辐射, 220 衍射)

形貌图,由它可清晰地看到位错、滑移线等缺陷。但由于暗室操作不小心,使图5所示的照片上部和右上角的乳胶层损坏,从而使照片的质量大大降低。

核乳胶片的显影、定影比较复杂,而且不同种类和不同乳胶层厚度的核乳胶片的操作程序、显影液、安全灯颜色都不一样。因此,使用时应十分注意。表2是ILFORD公司生产的L4型核乳胶片和国产的核乳胶片操作程序比较。

表2 ILFORD公司生产的L4型核乳胶片与国产核乳胶片操作程序比较(时间单位:分钟)

	L4			国 产	
				核2	核3、核4、核5
显影液	D-19			F1 或 ID19	ID196
显影温度	-1°C			18°C	
安全灯	黄 色			红 色	
乳胶层厚度(μm)	25	50	100	50	
浸 水	5	10	20	2—3	
显 影	12—30	15—60	30—60	36	
停 影	5	10	20	6	
定 影	30	60	120	60	
水 冲	60	120	240	60	

三、形貌图底板光学复制过程的影响

形貌图底板最后要经过光学复制负片、放大才得到所需要的正空间形貌图。在光学复制过程中,同样需要特别小心,才能保持所得到的分辨率和高质量。主要问题是厚的乳胶层所应用的黑度范围远超过所用的光学感光材料。因此,要求光场均匀。在某些情况下,甚至需要用特殊的照相技术进行放大。

由于乳胶层厚度和颗粒度的影响,在选择放大显微物镜时不要使用太高的倍数。一般情况下,对 $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 厚的核乳胶底板,显微物镜的焦深应分别小于10,20和

40 μm . 在洗印正片时,可变化显影液的浓度、显影时间、曝光时间来控制黑度和衬度。

总之,要获得一张高质量的形貌图,必须考虑过程中每一步对分辨率极限的贡献。尽量使各因素的影响大致差不多。这样,可以估计最后达到的分辨率。同时,整个过程中每一步都要十分细致、小心,才能保证形貌照片的高分辨和质量。

参 考 文 献

- [1] 许顺生,物理,8(1979),306.
- [2] 许顺生等,物理,9(1980),434.
- [3] 周衡南等,物理,9(1980),427.
- [4] A. R. Lang, In *Diffraction and Imaging Techniques in Material Science*, eds. S. Amelinckx et al., North-Holland, (1978), 623.
- [5] R. W. James, *The Optical Principles of the Diffraction of X-rays*, G. Bell and Sons LTD, (1945).

激光器锁模的一些技术问题

孟绍贤 蒲朝顺 杨义
龚维燕 张伟清 康玉英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

超短脉冲激光产生以来,引起了广泛的注意,大大推进了许多科学技术的发展^[1]。但是如何获得所需波长的好的锁模,仍是值得认真讨论的问题。我们将以钕玻璃锁模激光器为例,提出获得好的锁模的一些技术要求,这些要求原则上也适用于紫外或红外锁模激光器。

1. 腔结构的选择

我们在实验中,先后选用驻波腔和行波腔(如图1和图2所示)。对于驻波腔又先后采用

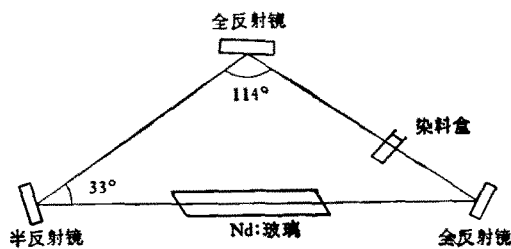


图1 驻波腔锁模激光器

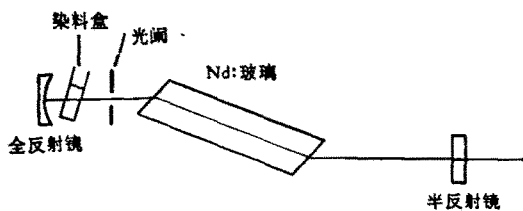


图2 行波腔锁模激光器

平面平行腔和半共焦腔。

行波腔振荡条件为

$$RTe^{\sigma N_1 l} = 1, \quad (1)$$

其中 R 为输出镜反射率, T 为染料的透过率, σ 为工作物质的受激发射截面, N_1 为反转粒子数, l 为工作物质长度。

驻波腔振荡条件为

$$RT^2 e^{2\sigma N_2 l} = 1, \quad (2)$$

N_2 为反转粒子数。在我们的实验条件下, $R = 50\%$, $T = 50\%$, $\sigma = 3 \times 10^{-20}$ 厘米², $l = 15$ 厘米,由此可求出

$$\frac{N_1}{N_2} = 1.3, \quad (3)$$

即行波腔要求的泵浦强度约为驻波腔的1.3倍。我们的实验证实了这个理论结果。

行波腔为双向输出,若外加一个全反射镜或腔内加法拉第旋转器,同样可获得单向输出。行波腔锁模脉冲序列发展比驻波腔慢,且脉冲序列较长,每个脉冲强度较低。行波腔为获得偏振输出,只要使一全反射镜和光束方向成布儒斯特角;而驻波腔,则需要把工作物质两端磨成布儒斯特角,或把染料盒及一平行平板放成与光束方向成布儒斯特角。行波腔和驻波腔两