

激光层析法简介

聂崇礼 张之珪

(兰州大学物理系)

一、前言

层析法一词,英文称为 Tomography,起源于美国的 A. M. Kermack 及英国的 G. H. Hensfield 所发明的计算机层析法 (Computerized tomography),过去在我国称为 X 射线体层照相扫描仪。他们二人在 1979 年曾因此得到诺贝尔医学、生理学奖金,这种照相扫描仪当今在全世界医学界有广泛的应用。

本文所讲的激光层析法,是把激光聚焦成细束,在透明晶体内分层扫描,利用晶体内杂质或畸变场对入射光的散射,把晶体内的杂质或缺陷显示出来。

在讲激光层析法之前,不能不提到 X 射线形貌法。由于兰氏透射形貌法早已建立,已有不少人报道过用这种方法所鉴定的晶体中的各种缺陷。研究激光层析法的人自然乐于把自己的试验结果和那些已发表的结果作对比,以证明他们的试验结果的可靠。一般说,激光层析法宜用于观察折射率变动距离比光波长 (500—600 毫微米)较短的缺陷,例如点缺陷及点缺陷的集合体; X 射线形貌法则较适用于观察具有长程(约数十微米)畸变场的缺陷,例如位错等。因此这两种方法,可以说是相辅相成的。

早在 1955 年^[1],阿美林斯克 (Amelinckx) 就曾用超显微镜观察氯化钠晶体中经过缀饰的位错。位错线经过缀饰,就含有一些杂质微粒,由于杂质对入射光的散射,使显微镜原来分辨不出来的微粒能被看出,故在显微镜前加上一个“超”字。为了避免入射光对散射光的干扰,一般总是在与入射光垂直的方向进行观察。并可用低倍的金相显微镜改装成此种超显微镜。

为了避免由于晶体表面不平所引起的散射,阿美林斯克把试件浸入折射率与氯化钠晶体相同 (~1.52) 的苯中。尽管他所用的设备很简单,但他所取得的成果是丰硕的,至今还令人向往。当时他所用的光源是汞弧光灯。到了 1968 年, Vand^[2] 用氦氖激光器作为光源,也用超显微镜法,观察到红宝石、氧化镁及氟化氢晶体中的缺陷。激光的优点是平行、单色,故便于会聚,且强度大。此外还有一优点,输出功率高的激光通常是线偏振光,如与人射光方向成 90° 进行观察,在水平方向振动的线偏振入射光的散射效率最佳。

当把人造水晶作为谐振器时,人造水晶中的主要杂质 OH 是有害的。但因至今尚无简便的观察手段,对于这种杂质在晶体内是以什么样的状态存在以及在什么样的生长条件下形成等问题,仍不怎么明了,用激光层析法观察人造水晶中的这种缺陷或许是比较理想的。

二、瑞利散射及激光层析装置

当角频率为 ω 的平面波被散射时,散射光的微分截面^[3]如下(用玻恩近似)

$$\sigma(Q) = (e^2/mc^2)^2 G^2(\omega) \sin^2\phi |f(g)|^2, \quad (1)$$

其中 Q 表示观察方向, $G(\omega)$ 为共振因数, e , m , 分别为电子的电荷及质量, c 为光速, ϕ 为入射光的振动方向 (\mathbf{E}) 和散射方向 (\mathbf{s}) 之间的夹角。当入射光为自然光时,

$$\sin^2\phi = (1/2)(1 + \cos^2 2\theta), \quad (2)$$

其中 2θ 为入射光和散射光之间的夹角。公式 (1) 中的 $f(g)$ 称为散射因数,

$$f(g) = \int \rho(r) \exp(i\mathbf{g} \cdot \mathbf{r}) dv, \quad (3)$$

其中 dv 为体积元, $\mathbf{g} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_0$, 称为散射矢, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $\rho(r)$ 为电子密度。

设散射体是半径为 a , 折射率为 n 的均匀球形粒子, 则按照洛伦兹-洛伦茨公式

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi e^2}{3m\omega^4} \rho G(\omega), \quad (4)$$

(1)式可写为

$$\sigma(Q) = \frac{9\pi^2}{\lambda^4} \sin^2\phi \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 V^2 \phi^2(kga), \quad (5)$$

其中 V 为散射体的体积, $\phi(kga)$ 为下列形式的函数,

$$\phi(\alpha) = (3/\alpha^3)(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha), \quad (6)$$

α 接近于零时, 这函数的值接近于 1, 这时, 散射强度和散射体体积 V 的 2 次方成正比, 和波长 λ 的 4 次方成反比, 这就是所谓的瑞利散射, 适用于散射体大小比波长小得多的情况 (半径 $a < 0.1\lambda$)。

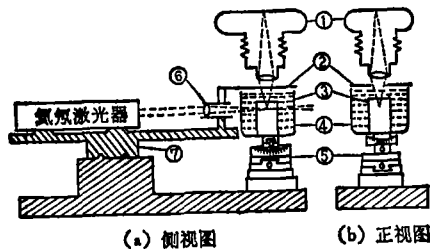


图 1 光散射层析装置示意图

1. 相机; 2. 狭缝; 3. 待测试样; 4. 玻璃容器 (其中装有折射率和晶体相同的液体);
5. 测角仪头; 6. 聚焦透镜; 7. 平行移动装置

图 1 为简单的激光层析装置。看来这种装置和阿美林斯克所用的相差不多。因为在观察线缺陷(如位错)和面缺陷时, 需要调整散射矢 \mathbf{g} 的取向使它和这些缺陷成适当的角度, 故加装了一个测角仪头; 为了便于扫描, 对晶体中某一层的缺陷进行照相, 故加装一平行移动装置。扫描速率一般为 100 微米/分。假使所鉴定的晶体是水晶, 应将其浸放在 26% (体积) 的二氯代素及 76% (体积) 的酞酸二甲脂的混合液中, 因为这种混合液的折射率和水晶的折射率 (~ 1.55) 大致相同。如果只作一般的观察, 不需要对晶体的表面进行抛光, 但如将面向显微镜物镜的表面加以抛光, 对于散射光的出射还

是有利的。所用激光器是功率为 3 毫瓦 (以前用的是 1 毫瓦) 的氩氟激光器, 用一会聚透镜 (焦距 25—46 毫米) 将其会聚成直径为 20 微米的激光束。光束细, 可使晶体内某些散射本领特别大的点状物体和照明束相遇的机率少, 使杂散光的强度降低, 而且由于光束细, 光的强度集中, 更易于看到从缺陷散射出来的光。

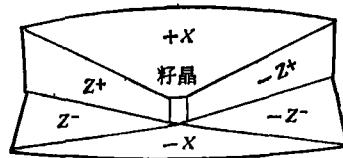


图 2 人造水晶晶体 Y 切片示意图

(图中标出了: +X, -X, Z+, Z-, -Z+, -Z- 各生长区)

如将图 2 所示水晶 Y 切片的 $X-Z$ 面平放在容器内, 使激光束从 $-X$ 向射入, 人在 Y 向观察, 由于各生长区所含缺陷不一样, 散射强度也就不同, 容易区别出来。由于高压釜内的对流所引起的温度波动, 使晶体生长速度变化, 在结晶时吸留的 OH 浓度也发生变化, 这就产生了生长条纹。观察的结果是, 在同一 $+X$ 区, 在靠近籽晶处和在远离籽晶处的条纹显然不同。这是因为在远离籽晶的生长区, 晶体生长速度较快, 吸留的 OH 多, 在该处的条纹也就更清楚一些, 这和红外吸收 (3500 厘米^{-1}) 试验结果是一致的。我们在 Z 区能看到许多平行的、细而密的生长条纹, 对此用 X 射线形貌法是难以辨别出来的。在各生长区还可以看到稀疏的、短的线状散射体, 这是一些由杂质所缀饰的位错线。其所以稀疏, 是因为激光光束很细, 因此只能看到在 20 微米厚度内的位错线。改变试件台的高度使激光束先后在生长成的水晶表面及在离表面数毫米的截面内扫描, 可看到在表面下数毫米和生长丘相对应的杂质堆积层, 虽散射矢改变, 层析像却不怎么改变, 这可说明杂质堆积层的形成是由于晶体生长时吸留的 OH , 从而能使我们对于晶体的生长过程有较深入的了解。

当人造水晶的 Q 值很高时, 散射光的强度

很弱，这时就要对试件进行热处理才能清楚地看到生长条纹。曾有人测出在水晶晶体中吸留的 OH 有一浓度阈值，为 28ppm。当超过此值时经过 500℃, 60 小时的热处理后，原来分散存在于晶体中的 OH 便将析出，聚集成为较大的粒子，散射本领较之处理前要大 20 倍。

三、面缺陷及线缺陷的观察

假设有一片状缺陷^[4]（例如杂质的堆积），其形状如图 3(a) 所示，在其中的电子密度和周围材料中的电子密度有所不同，设差值为 $\Delta\rho$ ，(3) 式可写为

$$f(g) = \Delta\rho \iiint \exp[ik(g_x x + g_y y + g_z z)] dx dy dz \\ = \Delta\rho V \frac{\sin(kg_x a)}{kg_x a} \cdot \frac{\sin(kg_y b)}{kg_y b} \cdot \frac{\sin(kg_z c)}{kg_z c}, \quad (7)$$

其中 $V = 8abc$ 。设缺陷是和 Z 轴垂直的，且 $a \sim b \gg c$ ，则必有 $g_x = g_y = 0$ ，即当散射矢和缺陷面垂直时才能看到散射光。设有一表面抛光的水晶晶体如图 4 所示，将其装在测角仪头上使 X-Y 面朝上，调测角仪头使散射矢 g 和 $(\bar{1}010)$ 面垂直，出射光 s 就能直射入显微

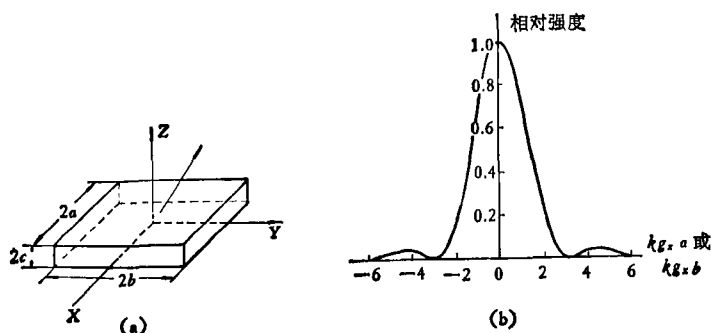


图 3 (a) 片状散射体；(b) 片状散射体的散射强度

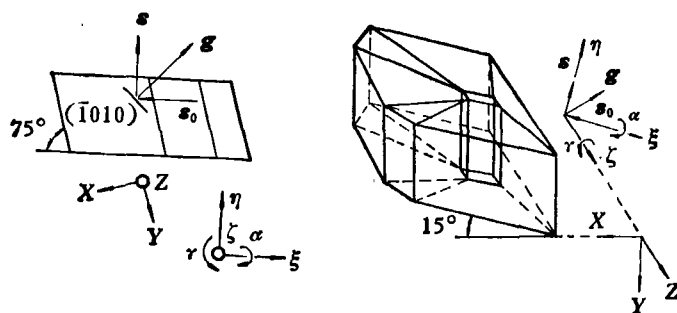


图 4 调节观察坐标以使散射矢 g 和片状缺陷垂直
(晶体坐标系 X, Y, Z , 观察坐标系 ξ, η, ζ)

筒中，经过一狭缝(约 1 毫米宽)射到照像底片上。因此在试件座和底片盒之间就要有一联动装置，当试件座载着试件以速度 v 向左平移时，底片盒以速度 mv 向右平移， m 为显微镜物镜的放大倍数。这种装置显然和图 1 所示的装置不同，有兴趣的读者请参看参考文献[4]中的附

图。当如图 4 所示，沿 ξ 轴转动 α 角，可使 g 分别与 $(\bar{1}010)$ 面或 $(1\bar{1}00)$ 面上的缺陷垂直。在 $\alpha = -20^\circ$ 时，沿 ζ 轴转动 γ 角，当 $\gamma = \pm 3^\circ$ ，又可使散射光的强度有很大的改变，从而可将片状缺陷的长和宽求出。

在刃型位错的周围^[5]，可以近似地认为具

有下列的体积应变:

$$\varepsilon(r, \varphi) = -\frac{b}{2\pi} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{\sin\varphi}{r}, \quad (8)$$

其中 b 为伯格矢量, ν 为泊松比, φ 为 b 和 r 之间的夹角, r 为从位错到观察点的距离. 设电子密度 ρ 随体积应变线性地变化:

$$\rho = \rho_0 + K\varepsilon(r, \varphi), \quad (9)$$

其中 K 为比例系数. 将(9)式代入(3)式以求散射因数,其结果是,当 $g_y \approx 0$ 时,只有当 $g_x \sim g_z \sim 0$ 时,散射光最强. 所以应按照图5的方式,设法将水晶的 Y 切片放在图中和 Y 轴垂直的位置,使 Y 切片的 Z 轴及 X 轴分别和图5中的 Z 轴及 X 轴同向. 在此应说明的是原来在对散射进行计算时,是假设晶体中的刃型位错线沿 Z 向,布氏矢沿 X 向的. 但实际上,我们并不知道放在试件台上的晶体试件中刃型位错在晶体中的确切方向,只是由 X 射线形貌法早已得知^[6],人造水晶的刃型位错几乎完全位于 $X-Z$ 面. 因此要以不同 s_0 方向的激光束在晶体的

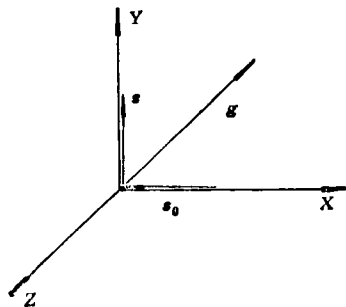


图5 s_0 与位错线(Z 向)及布氏矢(X 向)所决定的平面垂直

$X-Z$ 面内进行探索. 若 s_0 已调至和位错线垂直(即和 X 轴反向),则 $g = s - s_0$ 亦必和位错线垂直,故 $g_z = 0$. 这时 g 为 s_0 和 s 之间的角平分线,而 g_x 不为零. 因此在小川智哉^[7]的论文中指出的只是: Z 区的位错线在底片上所形成的黑线,明显地随 s_0 取向而改变. 换言之,只要 s_0 的取向和位错线垂直,即使 g_x 不为零仍可清晰地看到刃型位错线. 在照片中,还会看到一些由杂质所装饰的位错线,但它们的出现,是和 s_0 的取向无关的. 在观察刃型位错时,为尽量避免杂乱的散射光,要将 Y 切片的六个面均磨成光学平面并将其浸入前面所述的折射率相同的混合液中.

综上所述,激光层析法在鉴定透明晶体的缺陷方面确实有其优点,因为使用时间不长,应用范围尚待推广,例如可用以深入探索人造水晶晶体中 OH 缺陷的形成机理以进一步提高产品的质量,可研究用这种方法观察螺型位错,也可研究将这种方法应用于其它晶体,我们相信是可能取得丰硕成果的.

参 考 文 献

- [1] 钱临照等,晶体缺陷和金属强度(上册),科学出版社,1963年.
- [2] V. Vand et al., *J. Appl. Phys.*, 37(1966), 251.
- [3] 加藤範夫,回折と散乱,朝倉书店出版,(1978), 84.
- [4] K. Moriya et al., *Phil. Mag. A*, 44(1981), 1085.
- [5] K. Moriya et al., *Phil. Mag. A*, 41(1980), 191.
- [6] F. Iwasaki, *J. Cryst. Growth*, 39(1977), 291.
- [7] 小川智哉、守矢一男,日本物理学会志, 35 (1980), 306.

华东六省一市物理学会召开了第二届联合年会

华东地区六省一市(山东、安徽、江苏、浙江、江西、福建,上海)物理学会第二届联合年会于1983年11月5日至10日在南京召开. 出席会议的正式代表150人,列席代表44人. 周培源、彭桓武等为特邀代表.

开幕式上,管惟炎代表中国物理学会对会议表示祝贺. 周培源代表中国科协对会议表示祝贺并讲话.

这次联合年会以物理学的边缘领域的内容作为重点,安排了“量子生物学”,“计算物理方法与凝聚态物理研究”,“分岔、混沌、奇怪引力子、湍流及其他”等10篇特邀报告. 会议收到学术论文146篇,涉及边缘领

域(约占报告总数15%)、凝聚态物理、光学、电磁学、场论、核物理、粒子物理、声学、理论物理等十分广泛的内容,还有大学和中学教学经验交流报告70余篇. 会议期间还举办了物理教学仪器展览,展出了物理实验教学仪器160余件.

这次年会在物理学学术领域和物理教学经验交流以及实验教学等方面都有较大的收获,对华东地区的物理学科研究和教学事业都有促进作用.

(刘荣川)