

同步辐射软 X 射线多层膜反射率计的设计

薛 松 邵景鸿

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 分析了同步辐射软 X 射线多层膜反射率计; 介绍了单色器系统、反射率计系统、真空系统以及双重二倍角机构的设计要点。

关键词: 同步辐射; 软 X 射线; 多层膜反射率计

用于 BEPC 同步辐射 3B1 光束线上的软 X 射线多层膜反射率计与通常所用的反射率计的主要区别在于它利用了多层膜反射镜的波长选择特性, 即满足 Bragg 公式 $k\lambda = 2d\sin\alpha$ 。用一块多层膜反射镜做单色器分光元件, 与通常采用光栅单色器分光的反射率计相比具有结构紧凑、单色器衍射效率高、光强损失小、成本低等优点, 但同时也带来了运动环节增加、结构较复杂等不利因素。本文对新研制的软 X 射线多层膜分光反射率计的特性和设计要点加以介绍。

1 单色器系统与反射率计系统

用于软 X 射线波段的单色器一般都是采用掠入射光栅做分光元件, 光栅的尺寸必然很大, 而且在软 X 射线波段采用衍射光栅时, 反射率只有百分之一以下, 相比之下多层膜的反射率可高达百分之几十^[1], 且可以在正入射条件下工作, 光学元件的尺寸可大大缩小, 成本也较光栅低得多。

多层膜反射率计的光路如图 1 所示^[2], 本装置的单色器部分由入射狭缝 S_1 后放置的低能及可见光吸收片、多层膜反射镜 M_1 和出射狭缝 S_2 组成。对于一般的光栅单色器, 其入射狭缝和出射狭缝都是固定不动的,

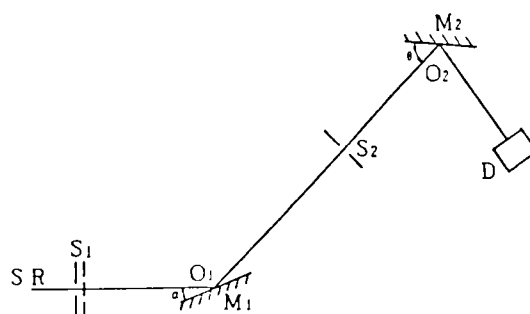


图 1 多层膜反射率计光路

在做波长扫描时只是光栅的单独转动,而本装置的单色器则不同,波长扫描时出射狭缝 S_2 必须随着多层膜反射镜 M_1 转动 α 角而转动 2α 角,却必须保证多层膜反射镜的入射角与反射角相等。这样,由样品台 M_2 和探测器 D 组成的反射率测试系统的实际运动就成为其整体绕 O_1 轴的转动和其自身绕 O_2 轴的扫描运动的复合运动。

用一套随动摇臂机构将单色器与样品台联接在一起,将单色器出射狭缝 S_2 固定在随动摇臂上,工作时只要满足多层膜反射镜 M_1 与随动摇臂的 $\alpha-2\alpha$ 关系,就可以进行波长扫描。在具体设计时,考虑到样品台作用于摇臂的一端,其相对于转动中心 O_1 的扭矩为 $\sum M' = 27.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$,整个摇臂偏载较严重,故在摇臂的另一端加上 $M'' = 24.2 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 的平衡块,因此在转动过程中电机的负载力矩仅为 $M = \sum M' - M'' = 3.3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 。

由于本装置是用于对样品软 X 射线反射率的测量,因此单色器和反射率计都必须在高真空状态下工作,而一次充气、更换样品、重新抽真空需要大约六、七个小时,为此特设置一套样品转换机构。样品台一次可装载三块被测样品,并在其上留有一个用于测定 I_0 的通孔,以保证能够较长时间地进行测试,而不必频繁地破坏真空。样品台由电机带动单向旋转,由定位元件提供定位和样品号选择,定位精度优于 0.01 mm ,样品转换完毕可自动显示当前样品号。

2 二倍角机构

在同步辐射软 X 线多层膜反射率测试装置中,两次使用了二倍角运动机构,第一次是单色器系统的多层膜反射镜 M_1 与其出射狭缝(以及其后的整个反射率测试系统)之间的 $\alpha-2\alpha$ 关系,即通过角度间的 $\alpha-2\alpha$ 关系,保证反射率测试在 $R-\lambda$ 波长扫描方式下进行;第二次是反射率计系统中的被测样品 M_2 与探测器 D 之间的 $\theta-2\theta$ 关系,即通过其角度间的 $\theta-2\theta$ 关系进行 $R-\theta$ 角度扫描方式下的反射率测试。而且,在 $R-\lambda$ 波长扫描方式时,必须保证样品 M_2 与探测器 D 在某一固定的二倍角状态下,即反射率计角度不变;在 $R-\theta$ 角度扫描方式时,也必须保证多层膜反射镜 M_1 与出射狭缝 S_2 在某一固定的二倍角状态下,即单色器波长不变。

二倍角机构是整个装置中的关键机构,其运动精度和角分辨率是决定反射率计测量精度的一个重要指标,为保证满足工程指标要求,在机构的技术设计中,如具体结构设计、材料的选择、各环节的精度分配、零部件形位分差的确定、机构的装调方法等方面都做了充分的考虑。

二倍角机构可采用两种设计方案:一是机械方法,用一台步进电机同时带动两套速比为 $1:2$ 的传动机构,这种方法在机构调准后重复性和准确度较高,电机丢步时,二倍角关系也不会发生变化,但在调整时不太方便、不能做探测器微区扫描,测量单色光 I_0 时要专门增加一个探测器;第二是电控方法,通过控制系统同时驱动两台步进电机,经过各自的传动系统,产生不同的角速度,这种方法较机械方法在装调和使用时要方便得多,但有可能由于电机丢步使角度关系不对应。设计中采用了第二种方法,并分别在轴上装了两套轴角编码器,用以对轴的实际转角进行监测,以便发现电机是否产生丢步。这样,在进行 $R-\lambda$ 波长扫描或 $R-\theta$ 角度扫描时,只要将选择开关打到“同步”档或通过计算机发出“同步”命令,就可完成 $\alpha-2\alpha$ 或 $\theta-2\theta$ 同步扫描。

3 升降机构

单色器及反射率计固定在一块底板上,通过底板的升降带动整个机构进入或退出光路。大气和真空之间的运动传递和密封是通过一段焊接波纹管来实现的,为保证工作时能够准确地回到工作位置,用一高精度圆柱型滑动导轨提供导向,以三点确定底板的工作平面位置。

4 真空系统

真空系统如图 2 所示,用一台 220l/s 的溅射离子泵作为主泵,一台 450l/s 的涡轮分子泵机组作为其预抽泵。真空室更换样品需经常开启的门采用 kF600 法兰氟橡胶密封,另一端不常开启的门采用银丝密封,其余所有法兰均采用 CF 刀口法兰无氧铜密封。为方便经常开启,在真空室上装有手动充气阀,在开启前充入干燥的氮气。

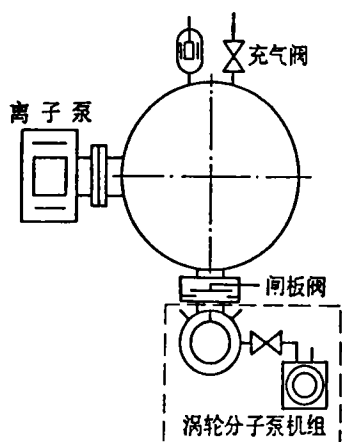


图 2 多层膜反射率计真空系统

对本真空系统的极限真空度计算如下:

(1) 真空室内部气载计算

①真空室内表面气载 $Q_1 = S_1 \cdot q_1$

S_1 —真空室内表面积, $S_1 = 13400 \text{ cm}^2$;

q_1 —真空室内表面的出气率,材料 1Cr18Ni9Ti,经化学清洗后, $q_1 = 1 \times 10^{-9} \text{ Torr} \cdot \text{l/S} \cdot \text{cm}^2$;

则: $Q_1 = S_1 \cdot q_1 = 1.34 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/S}$ 。

②机芯零部件表面气载 $Q_2 = S_2 \cdot q_2$

S_2 —机芯的总表面积, $S_2 = 2568 \text{ cm}^2$;

q_2 —机芯的出气率,铝合金经超声波化学清洗后, $q_2 = 5 \times 10^{-9} \text{ Torr} \cdot \text{l/S} \cdot \text{cm}^2$;

则: $Q_2 = S_2 \cdot q_2 = 1.28 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/S}$ 。

③环氧树脂粘结剂的气载 $Q_3 = S_3 \cdot q_3$

S_3 —粘结剂的表面积, 10 cm^2 ;

q_3 —粘结剂的出气率, $6 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/S} \cdot \text{cm}^2$;

则: $Q_3 = S_3 \cdot q_3 = 6 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/S}$

④步进电机的气载 $Q_4 = S_4 \cdot q_4$

S_4 —步进电机内外表面积,每个电机按 100 cm^2 计算, $S_4 = 5 \times 100 = 500 \text{ cm}^2$;

q_4 —步进电机出气率,因步进电机不能按高真空要求进行严格的化学清洗,故采用丙酮、酒精将其定子与转子表面分别进行清洗,取 $q_4 = 6 \times 10^{-7} \text{ Torr} \cdot \text{l/S} \cdot \text{cm}^2$;

则: $Q_4 = S_4 \cdot q_4 = 3 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/S}$

⑤总气载 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 9.26 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/S}$

(2) 极限真空度计算

$P = Q/S = 4.2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$

这里: S—泵的有效抽速, 220l/S。

5 测试方法

(1) R— λ 方法 (波长扫描):

将样品和探测器固定在某一 θ — 2θ 角下 (事先做过峰位搜索), 驱动单色器部分做波长扫描 (通过 M_1 镜和随动摇臂的 α — 2α 二倍角扫描), 测出这个 θ 角下反射率随波长的变化, 这种方法非常适用于多层膜反射率和光栅效率的测量。

(2) R— θ 方法 (角度扫描):

将单色器固定在某一波长 (即 M_1 镜和随动摇臂固定在某一个 α — 2α 角下), 测量样品在不同掠入射角 θ 下的反射率, 直到测得最佳结果。测量时样品转 θ 角, 然后探测器在 2θ 角附近做微区扫描, 反射率由测量得的峰值附近点做曲线拟合后得出。该方法精度高, 较适于光学常数的测量。

同步辐射软 X 射线多层膜反射率计已于 1992 年 5 月在北京正负电子对撞机国家实验室同步辐射 13# 大厅现场安装调试完毕, 完成了反射率计与 3B1 光束线的对接, 测试结果已另文报导^[2]。

参 考 文 献

[1] 石井芳一, NTT R&D. 1990, 39 (40)

[2] 薛松等, 同步辐射软 X 射线多层膜分光反射率测试装置. 光学精密工程, 1993, 1 (3): 24—28

Design of Soft X-ray Synchrotron Radiation Multilayer Reflectometer

Xue Song, Shao Jinghong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun130022)

Abstract

The characteristics of soft X-ray synchrotron radiation multilayer reflectometer are analysed. The main points of designing for monochromator system, reflectometer system, vacuum system and two double-angle mechanisms are introduced.

Key Words: Synchrotron radiation, Soft X-ray, Multilayer reflectometers