

同步辐射软 X 射线多层膜反射率 计测量控制系统

徐正良 孙剑辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130021)

摘要 本文介绍我们首先使用一块软 X 射线多层膜反射镜作为色散元件而研制的同步辐射软 X 射线反射率计的软硬件结构、功能与特点, 并报告了实测结果。

关键词: 通讯; STD-BUS; 操作系统; 数据获取

近十多年来, 国内外在软 X 射线波段的研究异常活跃。人工多层膜以其对软 X 射线的高反射率和色散特性而引起人们关注。1991 年我们为北京正负电子对撞机 (BEPC) 同步辐射实验室研制了一台使用多层膜反射镜作为色散元件的同步辐射软 X 射线多层膜反射率计, 安装在 3B1 光刻光束线上, 并于 1992 年 5 月投入使用, 取得了良好结果。

1 软 X 射线多层膜反射率测量原理

对于多层膜, 若周期间隔为 d , X 射线掠入射角为 α , 则分离出满足 Bragg 公式的单色光波长, 即 $\lambda = 2d \sin \alpha$ 。根据这一原理, 反射率计为复合的双重二倍角机构, 光路如图 1 所示。同步辐射光 SR 由多层膜反射镜 M1 色散成单色光, 经被测样品 M2 表面反射到探测器 D, 获得正比于反射光强 I 的反射信号 V 。然后将样品移出光路, 用探测器直接接收单色光, 得到正比于入射光强 I_0 的入射信号 V_0 。从而测出掠入射角为 α 的反射率

$R = I/I_0 = V/V_0$ 。图 1 中的虚框 B, 是样品与探测器的 $\theta - 2\theta$ 系统, 被测样品 M2 与探测器 D 满足准确的 $\theta - 2\theta$ 二倍角关系, 并安置在与随动摇臂成一体的样品台上, 能够绕 M1 镜的转动中心旋转, 以改变入射角和测量反射率随入射角的变化。虚框 A 是单色器与随动摇臂的 $\alpha - 2\alpha$ 系统。单色器 M1 与随动摇臂满足准确的 $\alpha - 2\alpha$ 二倍角关系。多层膜的反射率可随波长和入射角的改变而变化。一般有两种测试方法:

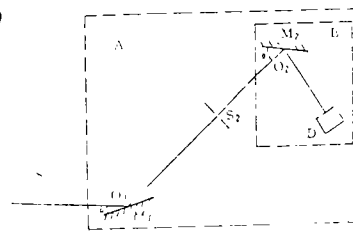


图1 多层膜反射率计原理简图

(1) $R-\lambda$ 方法 (波长扫描)

将样品和探测器固定在某一个 $\theta-2\theta$ 角下 (事先做过峰位搜索), 通过 M1 镜和随动摇臂的 $\alpha-2\alpha$ 二倍角关系扫描, 测出在这个 θ 角下的反射率随波长的变化。按照习惯, 有时波长由相应的 $\alpha-2\alpha$ 角给出。

(2) $R-\theta$ 方法 (角度扫描)

将单色器固定在某一波长, 即 M1 镜和随动摇臂固定在某一个 $\alpha-2\alpha$ 角下, 测量样品在不同掠入射角 θ 下的反射率。测量分两种情况: 一是样品与探测器保持 $\alpha-2\alpha$ 联动关系连续扫描, 测量 $R-\theta$ 扫描曲线; 一是样品转 θ 角, 然后探测器的在 2θ 角附近做微区扫描, 直到测得最佳结果, 反射率由峰值给出。

2 主要技术要求

该仪器是一个五维的高精度可控扫描与位置调节系统。执行元件为步进电机。

(1) 单色器的 Bragg 转角范围 $3^{\circ}-70^{\circ}$, 角分辨率 0.0075° ; 样品定位精度 0.05mm 。

(2) 控制方式: 分手动和微机控制两种。

(a) 手动: 具有本地和远地两种工作方式, 远地控制电缆线长 10 米。

(b) 微机控制: 主机通过 RS-232 串行接口与专用机通讯, 进行各种操作。

(3) 运行速度: 设 20、50、100、200、500 和 1000Hz 六档。

(4) 数据获取及处理。12 位 A/D 转换。

3 电路设计

软 X 射线反射率计测量系统方框图如图 2 所示。它由 STD 控制计算机、单色器及随动摇臂扫描控制电路、样品扫描及探测器测量控制电路、样品转换控制电路和数据获取系统等五部分组成。

(1) STD 控制计算机

STD-BUS 工业控制标准总线具有较大的通用性。我们选用了 Z80-CPU 插板、输入/输出 CPIO 接口板和系统复位插板组成专用控制计算机, 通过 RS-232 接口与主机通讯。操作系统程序是根据使用技术要求自行设计的。

(2) 单色器及随动摇臂控制电路

该控制电路主要用来控制单色器和随动摇臂的运行和扫描运动。控制方法分手动和微机控制两种。在手动时, 单色器和随动摇臂的同步运行或单独运行由工作状态控制器控制。在计算机方式时, 由键盘输入运行参数, 形成命令控制字控制。单色器和随动摇臂的始端和终端设有精零、粗零和限位开关。为了满足定位精度 0.05mm 的要求, 采用了定位精度为

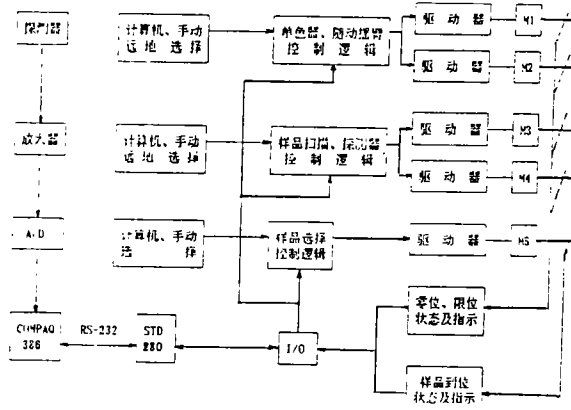


图2 软 X 射线反射率计测量控制系统框图

0.01mm 的霍尔元件作为定位开关。在系统复位时,单色器和随动摇臂准确的停在精零处,保证了测量位置的精确度。在手动方式下还设有远地有线控制器,电缆线长10米,以便在强辐射时在远地进行实验操作。为了便于调试和实验,还设计了计数保持电路和校对控制电路。当扫描到某一位置后,若将计数/保持开关拨向保持端,那么该波长值将一直保存,甚至在关闭主电源后此值也保持不变。校对控制电路用于对步进电机控制器的显示值和液晶显示器的显示值进行校对。此外,当处于校对状态时,步进电机控制器仍可继续操作,但单色器和随动摇臂的驱动电路已不工作,这样也可以用来进行某些功能测试或采集数据实验。

(3) 样品扫描及探测器测量控制电路

该电路用来控制样品台的扫描运动及探测器的随动,其控制电路和上述单色器及随动摇臂的控制电路相同,但负载和选用的电机、驱动电路是不同的。

(4) 样品转换控制电路

由于软 X 光反射率的测量是在高真空状态下进行的,为了避免频繁地破坏真空,在一个样品台上可一次装载三块样品,并留有一个用于测定 I_0 的通孔。样品转换控制电路主要用来选择样品,使其进入测量位置,由霍尔元件定位,定位精度达0.01mm。

(5) 数据获取系统

获取数据的原理和方法如图1和图2所示。

探测器为经过改造的对软 X 光灵敏的光电二极管,其输出直接送427电流放大器,转换为电压信号后经 A/D 转换送计算机。噪声信号 10×10^{-11} A 量级,光电信号为 10×10^{-9} A 量级。A/D 转换为12位,单极性,满刻度为5V。A/D 转换由软件启动。

4 程序设计

本装置自带 STD 微机系统,在计算机工作方式时,与主机联机使用。程序设计分为 STD 系统程序和主机操作系统程序两大部分。

4.1 STD 系统程序设计

STD 系统程序是 Z80 机器语言的专用程序,对整个控制电路进行系统管理与检测,并通过 RS-232 串行接口与主机通讯。当系统加电或复位之后,STD 系统进入待命状态。一旦主机发送操作命令,就进行相应操作,实时向主机报告当前运行状态及操作结果。命令完成后,STD 系统返回待命状态,准备接受下一个命令。

4.2 操作系统程序

该操作系统采用菜单和人机对话方式。菜单分为主菜单、分菜单和子菜单三种。主菜单为操作方式、数据处理和测试等功能选择。分菜单提供该功能的各种不同操作和命令。子菜单为命令参数选择。

操作系统软件有四种操作方式:全自动波长扫描、全自动样品掠入射角扫描、半自动扫描和实时图形方式。该软件具有数据存取、读写文件、数据平滑、作图打印和自检等功能,并可进行样品选择,单色器与随动摇臂单元同步或单独运行、样品扫描与探测器单元同步或单独运行、各单元系统复位、A/D 转换及单点测量等各种操作。在波长扫描方式下,对给定的样品掠入射角和探测器转角,可以连续扫描测量 I 、 I_0 及 I/I_0 。在角度扫描方式下,对给定的单色器掠入射角和随动摇臂转角,连续扫描测量 I ,并在第一步测量 I_0 。对给定的单色器掠入射

角、随动摇臂转角和样品扫描掠入射角,可令探测器进行微区扫描,寻找峰值。扫描速度由软件设置为20Hz、50Hz、100Hz、200Hz、500Hz和1000Hz。采样步长任选,最小步长可令步进电机走一步。在进行扫描或定点运行过程中每次启停既不丢步也不加步,并可随时通过键盘输入使操作暂停、继续进行和退出,跟踪其当前位置。

主机和STD系统之间的通讯是程序正确运行的关键,并从以下三个方面做了精心考虑:

(1) 在STD系统程序的入口处加了适当的软件延时,保证可编程串行接口芯片8251经过一个内部过程可靠的完成初始化。

(2) 进行通讯诊断。这是一个功能检测命令。输入该命令,屏幕上连续出现十六进制数字0—F,即表示主机和STD系统通讯正常。

(3) 错误检测。为了防止主机通过串行口发出的命令出现错误而使STD系统发生误动作,当一方向另一方发送一个字符时,由发送方接收之后再回送给对方,由原发送方接收并进行比较检验,如后来接收的字符与原发送的字符相同则程序往下执行,否则主机显示传送错误,返回DOS,STD返回待命状态。这个方法在本系统对通讯速度要求不甚高的情况下,是极为安全可靠的。

在程序设计中,对各种输入参数都进行有效性检查,如发现非法输入或超限参数,即返回相应信息,要求重新输入,从而保证了整个系统运行的安全可靠。

程序设计还保证了本操作系统在主机下达命令之后,仍享有对STD系统的控制权。STD系统正确无误地执行主机命令后,屏幕显示:OPERATING……。在这种状态下主机键入S,操作立即停止。再按任何一键(除Q外),操作继续进行。在任何情况下,如果键入Q,则退出该命令。

在命令执行过程中或完成后,屏幕上显示有关的信息或参数,使操作者一目了然。

5 测试结果和结语

软X射线多层膜反射率计投入使用两年多以来,中国科学院高能所同步辐射室光测组以

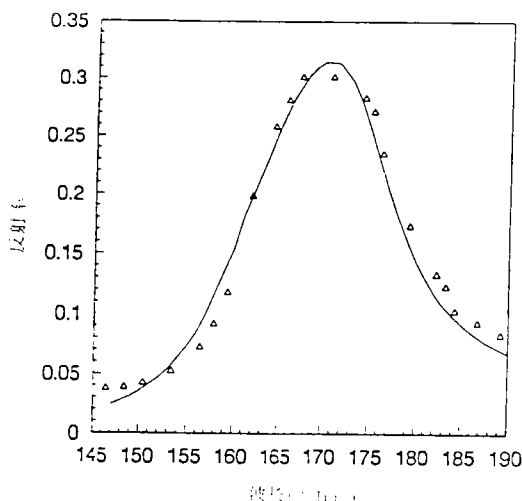


图3 Nb/Si 多层膜样品反射率随波长变化曲线

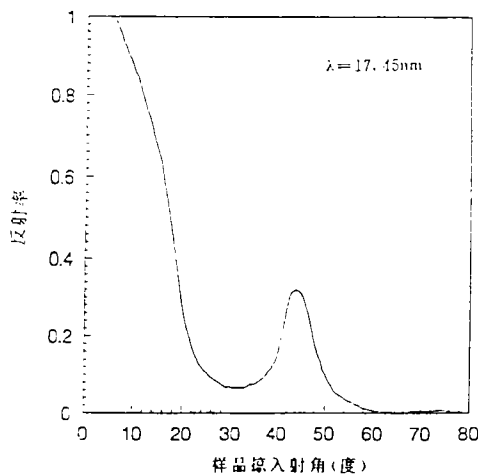


图4 Nb/Si 多层膜样品反射率随样品掠入射角变化曲线(经过平滑处理)

及国内不少单位利用该装置不断进行多层膜元件的测试,取得了大量的测试结果,为多层膜深入研究提供了可靠的依据。同步辐射室光测组对自制的 Nb/Si 多层膜样品在两种工作模式下的测试结果如图3和图4所示。(1) 单色器波长扫描

样品 $d = 13.45\text{nm}$, 掠入射角 $\theta = 42^\circ$, 单色器波长扫描范围 $14.5\text{nm} - 19.0\text{nm}$ 。符号线为实测结果,实线为模拟计算结果。

(2) 样品角度扫描

样品同上,单色器出射波长 $\lambda = 17.45\text{nm}$, 样品角度扫描范围 $6 - 80^\circ$, 所示曲线为数据平滑后的结果。

两年来的实验和实测结果表明,作为对多层膜元件的实际应用研究,我们在国内外首先使用一块多层膜反射镜作为单色器色散元件进行反射率测试取得了成功。该反射率计操作方便,安全可靠,测试精度高。软件内容丰富,功能齐全。该装置的研制成功,为我国发展软 X 射线光学元件性能测试做出了积极的贡献。

该项工作得到了邵景鸿同志和薛松同志的大力支持,并提出宝贵意见。高能所崔明启和刘丽冰等同志在调试实验中给予诸多帮助。谨致衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 石井芳一, NTT R & D, 1990, 39 (4)
- [2] F. Schaeffers et al, Proc. SPIE 1988, 984
- [3] 张秀琼, 吴定荣, 微型计算机原理及应用基础. 北京: 北京科学技术出版社, 1984
- [4] 路贵增, 宜国昌译, IBM-PC BASIC 程序设计语言. 上海: 同济大学出版社, 1985
- [5] 徐正良, 光学机械, 1988, (4): 64

Measuring and Control System for Sychrotron Radiation Soft X-ray Multilayer Reflectometer

Xu Zhengliang, Sun Jianhui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun130021)

Abstract

This paper introduces structures functions and specialities of the hardware and software for synchrotron radiation soft X-ray reflectometer, which is developed by us first using a soft X-ray multilayer mirror as a dispersive element. Practical measurements are reported.

Key Words: Communication, STD-BUS, Operating system, Data acquisition