

文章编号 1004-924X(2004)05-0480-05

合肥同步辐射反射率测量装置

薛松, 邵景鸿, 卢启鹏, 王兆岚, 徐仲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 分析设计并研制了同步辐射计量光束线的反射率计系统。该反射率计工作波长 5~100 nm, 角分辨率 0.005°, 样品台可做六维调整, 样品与探测器采用同轴扫描馈入机构, 大大提高了扫描运动及测量精度。样品和探测器均具有平移和旋转两种功能, 并且既可独立运动, 又可 θ - 2θ 同步联动, 样品和探测器均可退出光路, 通过束线差分系统和反射率计差分馈入系统可充分保证 10^{-6} ~ 10^{-8} Torr 的真真空度。对样品的反射率测试可分波长扫描和角度扫描两种方式。

关键词: 同步辐射; 反射率计; 测量

中图分类号: TH741 文献标识码: A

Reflectivity measuring device the in national synchrotron radiation laborator

XU E Song, SHAO Jing-hong, LU Qi-peng, WANG Zhao-lan, XU Zhong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The reflectometer in the National Synchrotron Radiation Laboator(NSRL) radiometry metrology experimental station was designed and developed. The wavelength range is 500~100 nm, and the angle differentiate is 0.005°. Sample table can be adjusted six dimensions. The together axis feedthrough is employed by sample scanner and detector scanner, so that the scan precision of movement and measurement are improved greatly. The sample and detector can both move and rotate, not only rotating singly but also together at θ - 2θ angle, and they can exit from light path. By using beamline difference system and reflectometer difference feedthrough system, 10^{-6} ~ 10^{-8} Torr vacuum is obtainable. The sample reflectivity can be measured by wavelength scan and angle scan.

Key words: synchronization radialization; reflectometer; measurement

1 引言

在光学系统的设计使用过程中, 为了满足光学元件的设计使用要求, 往往希望对光学元件的光学常数能够给出一个较为准确的数值, 而通过

计算得到的结果却经常与光学元件的实际结果有较大的出入, 因此对光学元件光学常数的实际测量有着十分重要的意义。采用同步辐射作为光源进行光学元件光学常数的测量现在已经得到普遍的使用, 目前国内外许多的同步辐射装置上都建有进行光学常数测量的反射率测量装置, 我们曾

收稿日期: 2004-07-22; 修订日期: 2004-08-26.

基金项目: 国家重大科学工程项目

经在北京正负电子对撞机同步辐射装置上先后建立了两套反射率测量系统^[4],但由于条件所限,仅能够进行标准尺寸样品的测试,对于较大尺寸的光学元件无法进行在线检测实验,从实际使用的角度出发,合肥同步辐射二期工程计量光束线的反射率计装置可以满足对 5~100 nm 波长,尺寸 $200 \times 100 \text{ mm}^2$ 的样品的实际光学常数测量。

2 结构总体方案

为了较好地满足对光学元件的测试,对于反射率计来说,最重要的在于提高它的测量精度,而仪器在使用时的测量精度主要取决于以下几个方面:

- (1) 光束线单色器系统的波长精度
- (2) 反射率计制造精度
- (3) 探测器测量系统精度
- (4) 反射率计在线调试精度(即反射率计自身光轴与同步光的重合精度)

2.1 反射率计主要参数指标

- (1) 波长范围: 5~100 nm
- (2) 波长精度及重复性: 0.1 nm
- (3) 样品最大尺寸: $200 \times 100 \text{ mm}^2$
- (4) 极限真空 $2 \times 10^{-8} \text{ Torr}$, 并可在 10^{-6} Torr 下工作

(5) 样品和探测器既可单独旋转又可 $\theta-2\theta$ 联动; 样品和探测器旋转精度 0.01° , 角分辨率 0.005°

(6) 样品台具有 X、Y、Z 平移及旋转功能, X 向平移 20 mm, 精度 $20 \mu\text{m}$; Y 向平移 20 mm, 精度 $20 \mu\text{m}$; Z 向平移 120 mm, 精度 $15 \mu\text{m}$; 绕 X 轴转动 $\pm 10^\circ$, 精度 0.01° ; 绕 Y 轴转动 $\pm 10^\circ$, 精度 0.01°

2.2 反射率计装置的组成

反射率计装置示意图如图 1 所示。

- (1) 可调光阑
- (2) 前后位置探测器
- (3) 光强探测器
- (4) 样品姿态调整机构
- (5) 样品、探测器扫描系统
- (6) 超高真空差分馈入系统
- (7) 超高真空系统
- (8) 计算机控制系统

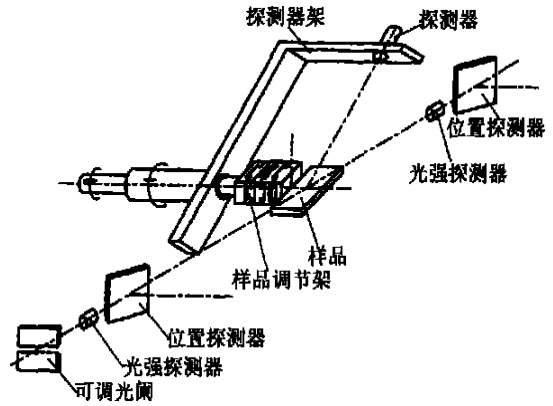


图 1 反射率计示意图
Fig. 1 Sketch map of reflectometer

2.3 超高真空差分馈入系统

反射率计的功能主要靠样品和探测器的 $\theta-2\theta$ 扫描机构来实现, 样品和探测器均应能够进行 360° 的旋转, 在实际测量时, 样品的转动范围在 $0 \sim 90^\circ$, 探测器的转动范围在 $0 \sim 180^\circ$, 并且可以实现两者的 $\theta-2\theta$ 同步扫描, 样品和探测器旋转精度 0.01° , 角分辨率 0.005° 。

实现样品和探测器扫描的运动是由大气中传入到主真空室内的, 因此馈入系统即要保证有较高的传动精度, 又必须能够满足超高真空密封的要求, 反射率计的极限真空一般在 10^{-8} Torr 。目前国内外各 SR 实验室反射率计上的馈入系统大都是采用差分馈入系统, 主要有两种类型: 一种是分离的双轴馈入系统, 如德国的 DESY-HASY-LAB^[5]、日本的 KEK-P.F.^[6] 等, BSRF 的高精度反射率计也是采用的这种型式。这种结构的最大好处是样品和探测器采用两套各自独立的馈入系统, 每套系统本身都可以方便地实现旋转和平移运动, 互不干扰, 而且测角仪和编码器可以同时与轴直接相连, 但这类系统在装调时较麻烦, 两套系统的同轴性需要靠调整来实现, 而且由于两套系统各自占用了主真空室的两侧, 更换样品只能从主真空室的上方进行, 很不方便。另一种是同轴转动、平移轴系馈入系统。如美国的 BNL-NSLS, 德国的 BESSY-PTB^[7] 等, 此类结构的优点在于更换样品可以从主真空室的侧面进行, 而且便于实现常规样品在真空状态下的切换, 使用十分方便, 最主要的是样品和探测器的同轴精度较高, 其缺点是编码器不能直接与轴相连。机械加工的难度较大, 真空差分系统也存在一定难度。

根据测量的实际需要, 以及加工、调试、检测的实际情况, 采用同轴转动、平移轴系差分馈入系统, 如图 2 所示, 外筒与真空室固定在一起, 内壁通过轴承使中间轴在其中保持转动和平动两种工作模式, 内轴以同样的方式与中间轴相隔离, 在轴

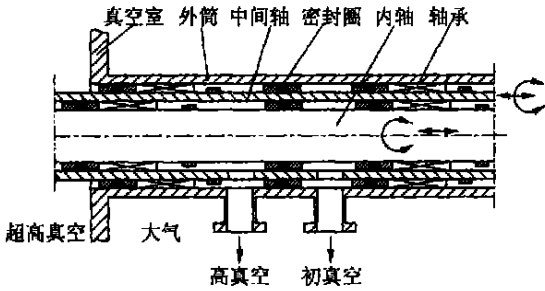


图 2 超高真空同轴旋转平移差分馈入轴系

Fig. 2 Difference feed through system of UHV high precision together axis rotation and movement

之间的空隙里, 又分别通过 3 道密封圈沿轴向隔成 4 个空间, 分别是大气、初真空区、高真空区和超高真空区, 形成从大气到超高真空的压力梯度, 在中间轴上对应高真空区和初真空区开有抽气口, 保证将其与内轴间的气抽走, 采用聚四氟乙烯弹性载荷密封圈作为转动平移的动密封元件, 用一台机械泵作为差分系统的初真空级, 一台 15L/S 的离子泵作为差分系统的高真空级, 配以分子泵作为预抽, 实现从大气到 10^{-8} 托的动密封差分。在传动上两套轴分别以步进电机驱动速比为 1:360 的 Huber 测角仪, 其角分辨率为 0.005° , 角度误差小于 $30''$, 带动两轴分别进行旋转, 以步进电机驱动蜗轮传动系统, 通过螺纹机构带动两轴分别进行平移。通过合理的精度分配, 保证同轴转动、平移轴系馈入系统的输出精度优于 $5 \mu\text{m}$ 。该系统已经获得实用新型发明专利。

2.4 样品台调整机构

样品除具有从外部馈入的转动和平移外, 在样品架上还应具有较高精度的 X 、 Y 向平移及绕 X 、 Y 轴转动的功能(如图 1 所示), X 向平移 20 mm, 精度 $20 \mu\text{m}$; Y 向平移 20 mm, 精度 $20 \mu\text{m}$; Z 向平移 120 mm, 精度 $15 \mu\text{m}$; 绕 X 轴转动 $\pm 10^\circ$, 精度 0.01° ; 绕 Y 轴转动 $\pm 10^\circ$, 精度 0.01° 。在结构通过采用复合叠加的双 V 型导轨结构, 保证各维运动能够达到各自的精度要求, 使用专门制作的真空步进电机, 从而保证对样品姿态的自

动调整和超高真空的要求。从能够对光学元件进行实测的角度出发, 样品架应保证能够装卡 $200 \times 100 \text{ mm}^2$ 的光学元件, 在进行非常规样品测试时, 样品更换只能通过打开主真空室的办法进行, 在进行数量较大的常规 $\Phi 50 \text{ mm}^2$ 样品检测时, 一次沿轴线排列 3~4 块样品, 通过平移完成样品切换, 待所有样品测完后, 打开主真空室更换全部样品。

2.5 样品及探测器随动机构

根据反射率计工作原理和满足实验工作的要求, 通过控制系统可以控制样品和探测器既可单独旋转又可 θ - 2θ 联动; 样品和探测器旋转精度 0.01° , 角分辨率 0.005° 。为了能够满足不同实验检测精度的要求, 设计了两种扫描方向不同的工作方式, 通过选择工作方式可以自动完成不同方式下的寻零和扫描工作。

2.6 前后光斑位置探测靶及强度探测器

反射率计最终的测量精度不仅仅取决于反射率计的制造精度, 同时也与它的在线调试精度有关, 通过前后荧光探测靶, 可将反射率计光轴与同步光光轴大致调至重合, 通过光强探测器可为反射率计光轴调整提供更精确的基准, 同时也可用来对入射光强进行修正。

为了保证仪器光轴与实际光轴相重合, 在反射率计镜箱前后各装上一个探测器, 装调时, 首先用激光器找准前后法兰中心, 以激光的光斑中心为基准来调整整个反射率计系统光路及零位, 使得激光的光斑中心成为反射率计系统的自身光轴, 并用前后位置探测记录下激光光斑中心位置, 在线装调时, 通过读取前后探测器上同步光的实际位置, 调整反射率计的光轴与同步光光轴相重合。

2.7 真空系统^[8]

整套装置的极限真空为 2×10^{-8} Torr, 为了保证反射率计能够同时工作在 10^{-6} Torr, 在反射率计前加入了一套差分泵抽气系统, 从而保证反射率计在 10^{-6} Torr 工作时不会影响到束线的真空度。整个样品及探测器系统置于真空系统中, 其中样品台平移和摆动所用的 4 个步进电机采用专门定做的真空电机, 主真空室选用 400L/S 的涡轮分子泵作为主泵, 并配以液氮冷阱防止油蒸汽的反流。

镜箱材料采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制造, 加工

时采用电解抛光工艺处理,使用氩弧焊接,经检漏合格后,按照超高真空要求进行严格的化学清洗。由于整套装置均放置在真空室中,为保证镜箱的真空度,镜箱内的所有构件的材料均需采用铝合金或不锈钢制造,并按照超高真空的要求进行严格的化学清洗和超声波清洗,步进电机、导线也均按照超高真空的要求进行严格的清洗,清洗后的零件只能戴清洁的手套操作。

为保证仪器的精度和系统的真空度,加工完成后,首先进行粗装,精度测试合格后,再将仪器分解、真空清洗、清洁安装与调试,最后在清洁的环境下进行最终精度测试。

3 反射率计系统的准直与调试

在同步辐射光束线工程中,束线和实验站的光学调试和标定工作占据着十分重要的地位,光学调试和标定工作进行的好坏,往往直接影响着束线和实验站的实际指标和使用效果,为了使束线和实验站的实际指标和使用效果达到最佳,除了设计、加工和调试外,更应该在设计阶段就充分地考虑到现场安装调试过程中可能遇到的问题,并事先给出调试所需的基准和辅助方法、手段和结构。在合肥国家同步辐射实验室二期工程计量光束线反射率计装置的设计和调试中,结合最终的现场调试和实验,在设计阶段充分考虑了仪器的现场检测、安装、准直、调试过程所需要的辅助手段和仪器光学基准的寻找与对准,为最终的安装和准直工作提供了方便。

首先用氦氖激光器作为调试的基准,使激光光斑通过前后法兰和样品中心,以此作为调整各维运动机构精零位的基准,以及调试样品探测器 θ 扫描运动的零位基准,此时将前后光强探测器移入光路,微调探测器使每个探测器的信号均达到最大,记录下每个探测器此时的位置,从而完成以氦氖激光器作为调试基准到以光强探测器为在线准直的基准转换。在以同步光进行现场调试时,通过前后荧光探测靶,可将反射率计光轴与同步光光轴大致调至重合,通过光强探测器可为反射率计光轴调整提供更精确的基准,这时,只要通过调整系统的微调机构将四路光强探测器的信号调至最大,就完成了系统光路与同步光的准直。准直和初步调试后的反射率计内部结构和馈入系

统如图3和图4所示。

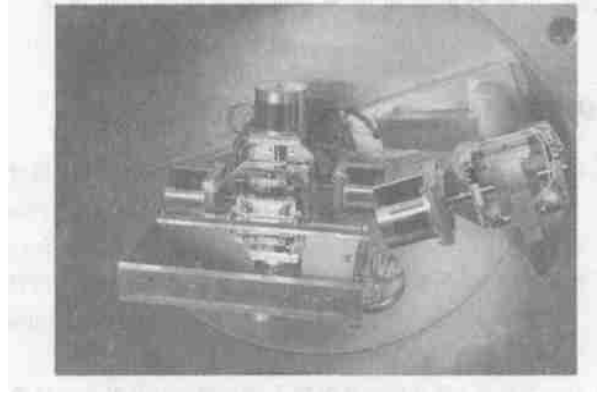


图3 反射率计内部结构
Fig. 3 Structure inside the reflectometer



图4 反射率计及馈入系统
Fig. 4 Reflectometer and feed through system

4 测试方法

4.1 波长扫描

将反射率计的样品和探测器固定在某一 θ 角下,利用单色器进行波长扫描,测出该 θ 角下反射率随波长的变化。

4.2 角度扫描

将单色器固定在某一波长,反射率计做 θ 角度扫描,测量样品在不同掠射角 θ 下的反射率。

5 结果

该套装置经过现场安装调试,所有技术参数均达到设计指标,能够满足使用要求,与光束线一起通过中科院组织的专家组测试验收,现已对国内外用户开放实验,合肥同步辐射反射率测量装置的研制成功,为在该波段的光学元件的光学常

数在线检测提供了必要手段和条件,特别是对我 件。
国同步辐射光束线光学元件的实际检测提供条

参考文献:

- [1] 薛松,邵景鸿,除正良,等.同步辐射软 X 射线多层膜分光反射率测试装置[J].光学精密工程,1993,1(3):24-28.
XUE S, SHAO J H, XU ZH L, *et al.* Reflectivity-measuring equipment for soft X-ray synchrotron radiation using a multilayer dispersing[J]. *Optics and Precision Engineering*. 1993, 1(3):24-28. (in Chinese)
- [2] 薛松,邵景鸿.同步辐射软 X 射线多层膜反射率计的设计[J].光学精密工程,1994,2(3):85-88.
XUE S, SHAO J H. Design of soft X-ray synchrotron radiation multilayer reflectometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(3):85-88. (in Chinese)
- [3] 崔明启.北京同步辐射软 X 光反射率计装置及其物理工作[J].高能物理与核物理,1995,19(1):82-86.
CUI M Q. New soft X-Ray reflectometer on beijing synchrotron radiation facility and some basic results of physics work [J]. *High Energy Physic and Nuclear Physic*, 1995, 19(1):82-86. (in Chinese)
- [4] 孙可煦.软 X 光平面镜反射率标定实验[J].光学学报,2002,22(3):379-382.
SUN K K. Reflectivity calibration of soft X-Ray planar mirror in the BSRF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3):379-382. (in Chinese)
- [5] HOGREFE H, GIESENBERG D, HAELBICH R P. A New VUV-reflectometer for UHV- applications[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1983, 208: 415-418.
- [6] MIHIRO Y. Soft x-ray reflection from SiC, TiC, and WC mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(24): 4586-4590.
- [7] FUCHS D. HIGH precision soft x-ray reflectometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66(2): 2248-2250.
- [8] 达道安.真空设计手册[J].北京:国防工业出版社,1991.
AN D A N. Design handbook of the vacuum[J]. *Beijing: National Defense Industry Press*, 1991. (in Chinese)

作者简介:薛松(1962—),男,天津人,1984年毕业于东北工学院真空专业,一直在长春光学精密机械与物理研究所工作,研究员,博士生导师,主要研究方向为同步辐射光束线工程研制工作。