

同步辐射软 X 射线多层膜 分光反射率测试装置

薛松 邵景鸿 徐正良 孙剑辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 采用多层膜反射镜作为分光元件,成功地研制了同步辐射软 X 射线反射率计。可完成对各种光学反射镀层的光学常数的测试和评价。工作波段(2—20)nm,角分辨率 0.01° ,扫描范围(0—80)°。该装置安装在 BEPC 同步辐射实验室 3B1 光刻光束线上。

1 引言

多层膜元件以其高反射率特性、波长选择特性及偏振特性使得它在 X 射线光学及其相关许多领域的研究中,得到愈来愈广泛的应用。

目前,世界上一些国家的研究所和实验室,如德国的 BASSY^[1]、日本的 NTT^[2] 等,都已进行了多层膜作为 X 射线波段色散元件的研究与开发。我国一些单位也相继开展了多层膜元件的研制和应用。为了对多层膜元件及其它光学元件的光学性能进行测试、评价,并进行软 X 射线多层膜色散特性应用的研究,我们在北京正负电子对撞机(BEPC)同步辐射 X 射线光刻光束线(3B1)上进行了以一块多层膜反射镜作为色散元件的反射率测试装置的实际应用研究。

2 同步辐射多层膜反射率计的工作原理

根据多层膜的结构特性,对于周期间隔为 d 的多层膜,若入射 X 射线掠射角为 α 时,则可分离出满足 Bragg 公式波长的单色光,即: $2d \sin \alpha = k\lambda$; 如果多层膜的周期间隔在(1—10)nm 范围内变化的话,可获得(2—20)nm 以下的波长。也就是说象使用晶格常数为 d 的分光晶体一样。

根据这一基本原理设计多层膜分光反射率计光路如图 1 所示,同步光以 1.5° 掠入射角经光束柱面反射镜后到达单色器, M_1 是用于色散的多层膜反射镜, M_2 是被测样品, S_1 是单色器的入射狭缝,其后放置一低能及可见光吸收片, S_2 是单色器的出射狭缝, D 为探测器, α 、 θ 分别为单色器(M_1)和被测样品(M_2)的掠入射角。

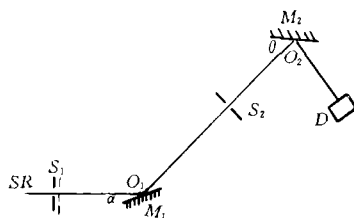


图1 反射率计光路

单色器部分由入射狭缝 S_1 、多层膜反射镜 M_1 和出射狭缝 S_2 组成；被测样品 M_2 和探测器 D 构成反射率计。测量时，由 M_1 镜将同步光单色化成为单色光，经 M_2 表面反射后到达探测器 D ，得到反射信号 V (V 正比于反射光强 I)，将样品移出光路并用探测器直接接收单色光，得到入射信号 V_0 (V_0 正比于入射光强 I_0)，这样掠射角为 θ 时的反射率 $R = I/I_0 = V/V_0$ 。

3 同步辐射多层膜反射率计主要参数指标

1. 检测波长范围：2nm—20nm；
2. 单色器：为多层膜反射镜系列单色器，Bragg 转角范围 3° — 70° ，角分辨率 0.0075° ；
3. 样品及样品台：样品尺寸 $\varphi 50\text{mm}$ ，每次可测三块；样品台 $B\beta$ ragg 转角范围 0° — 80° ，角分辨率 0.01° ，样品定位精度 0.05mm ；
4. 控制方式为手动和微机控制两种；
5. 系统真空度优于 $5 \times 10^{-6}\text{Torr}$ (实际工作时达 $7.8 \times 10^{-7}\text{Torr}$)；
6. 整套装置能够退出光路，以保证光束能够通过，不影响光刻实验。

4 同步辐射多层膜反射率计系统

4.1 光源

本装置安装于北京正负电子对撞机 (BEPC) 同步辐射 (SR) 光刻光束线 (3B1) 上，以同步光作为光源，具有波段范围宽、强度高、稳定性好等特点。

4.2 单色器系统

同步光经 3B1 束线到达反射率计后，经过单色器系统，产生测量所需波长的单色光。目前国外用于同步辐射软 X 射线反射率计上的单色器系统大多采用衍射光栅作为色散元件，这样就只能采用掠入射光学系统，使用大口径的光学元件，这对于加工和应用都是很不利的，而且在软 X 射线波段光栅的衍射效率只有百分之一以下。

我们采用一块多层膜反射镜作为分光元件，其反射率可达到百分之几十，同时光学元件的尺寸大大缩小，并且整个反射率计的结构非常紧凑，真空腔体大为减小，工程造价也大幅度降低，仅为光栅反射率计的五分之一。

整个单色器系统由前置软 X 射线滤光片、入射狭缝 S_1 、多层膜反射镜 M_1 、出射狭缝 S_2 组成。为了满足波长扫描和测试的要求，作为单色器色散元件的多层膜反射镜 M_1 必须与单色器出射狭缝 S_2 及被测样品 M_2 保持准确的二倍角 $\alpha - 2\alpha$ 联动关系，由三块多层膜反射镜提供的单色器工作波段分别为：2nm—5nm；5nm—12.4nm；12.4nm—20nm；角分辨率为 0.0075° 。

4.3 反射率计系统

反射率计由样品台和探测器构成。与光栅单色器反射率计不同的是在满足被测样品 M_2 与探测器 D 的 $\theta-2\theta$ 二倍角扫描关系的同时,整个反射率计必须能够绕 M_1 镜的转动中心旋转,即当单色器进行波长扫描时, M_1 镜每转过 α 角,整个反射率计系统必须与其同步绕 M_1 的转动中心旋转 2α 角度。反射率计系统的角分辨率为 0.01° ,样品台的转角范围为 $0^\circ-80^\circ$,探测器转动范围 $0^\circ-160^\circ$,样品台每次可装载三块样品。

4.4 真空系统

以上所有的单色器系统和反射率计系统,均放置在一个 $\varphi 500 \times 420 \text{mm}^3$ 的真空腔体中,用一台 220L/s 的溅射离子泵作为主泵,一台 450L/s 的涡轮分子泵机组做为其预抽泵,系统的实际工作真空度为 $7.8 \times 10^{-7} \text{Torr}$ 。

4.5 控制系统

全部运动及测量系统均由一台微机控制完成,控制系统具有以下功能:

(1)完成单色器系统的多层膜反射镜 M_1 与出射狭缝 S_2 及样品 M_2 之间绕 M_1 中心轴的 $\alpha-2\alpha$ 二倍角同步联动或各个运动环节的单独控制;

(2)完成样品 M_2 与探测器 D 之间绕 M_2 中心轴的 $\theta-2\theta$ 二倍角同步联动或各个运动环节的单独控制;

(3)自动完成样品的转换和定位,显示样品所停位置;

(4)为各个运动提供零位和自动复位;

(5)角度、波长寻峰;

(6)特定波长、角度扫描;

(7)测量结果的采集、存贮、数据处理、打印、曲线绘制。

5 测试实验

利用我们所研制的软 X 射线多层膜反射率计,在 BEPC 同步辐射 3B1 束线上对高能所研制的 Nb/Si 多层膜反射镜进行了测试实验,两种工作模式下的测试结果如下:

(1)单色器波长扫描

3° 样品、Nb/Si 多层膜反射镜、 $d=13.45 \text{nm}$,样品掠射角 θ 分别固定在 40° 、 46° 、 48° 、 45° ,驱动单色器进行波长扫描,其掠射角 α 扫描范围为 $45^\circ-70^\circ$,对应波长为 $15.68 \text{nm}-20.84 \text{nm}$,测得信号如图 2 所示。

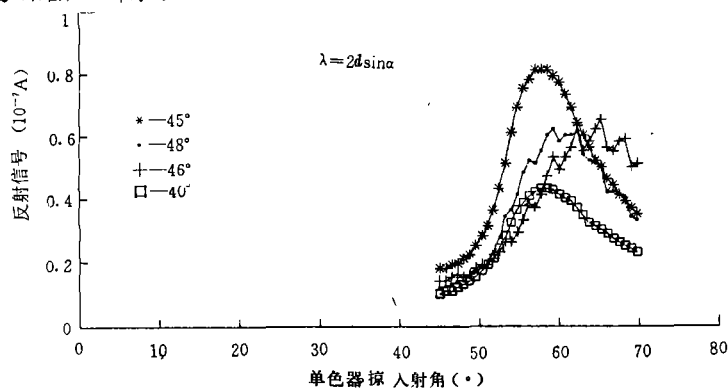


图 2 反射信号随波长变化曲线

(2) 样品角度扫描

3" 样品、Nb/Si 多层膜反射镜、 $d=13.45\text{nm}$ ，单色器出射波长 $\lambda=17.45\text{nm}$ ，驱动反射率计进行角度扫描，测得 $R-\theta$ 反射率曲线如图 3 所示。

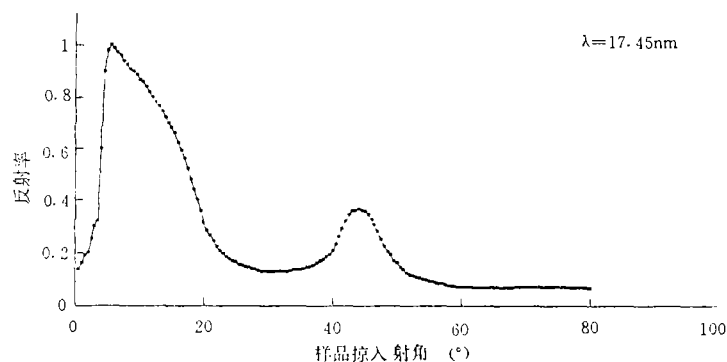


图 3 反射率随角度变化曲线

6 结 论

同步辐射软 X 射线多层膜反射率测试装置的研制成功和在 BEPC—SR—3B1 上的实测结果表明：作为对多层膜元件的实际应用研制，在国内外首次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并取得了成功。其主要参数指标均已达到工程设计要求，具有集单色器和反射率计为一体、结构紧凑、单色器反射效率高、成本低等优点，并为利用同步辐射光源进行软 X 射线波段的光学元件反射率测量提供了条件。

目前，在测试实验中已初步取得的数据结果进一步证明了该装置的实用性。在实验中，也发现了由于同步光的强辐射给系统光学元件带来的辐射损伤问题，作为单色器的多层膜反射镜在同步光长期照射下，出现的灼伤痕迹导致分光强度的下降。显然，这就为多层膜反射镜研制提出了一个耐辐射能力问题。

最后，我们感谢高能所 BEPC 同步辐射室光测组组长崔明启同志在“在线测试实验”中所进行的有效的现场实验组织工作及所提供的实测结果。

参 考 文 献

- [1] F. Schaefer et al, SPIE, 984, 1988
- [2] 石井芳, NTT R&D, Vol. 39, No. 4, 1990

Reflectivity—Measuring Equipment for Soft X—ray Synchrotron Radiation Using a Multilayer Dispersing

Xue Song, Sao Jinghong, Xu Zhengliang and Sun Jianhui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Using a multilayer as a dispersive element (a monochromator), we have developed a soft X—ray synchrotron reflectometer. The measurement and evaluation of optical constants of optical reflecting coats can be done by this system. The main parameters of the system are: wavelength from 2 nm to 20 nm, angle resolution 0.01 degree, and sample scanning range from 0 to 80 degree. This equipment is installed at 3B1 beam line of the Synchrotron Radiation Laboratory at BEPC.