

基于多层膜偏振元件的同步辐射光束线 偏振特性测量研究*

孙立娟¹ 崔明启^{1;1)} 朱杰¹ 赵屹东¹ 郑雷¹ 马陈燕¹ 陈凯¹
赵佳¹ 周克瑾¹ 王占山² 王洪昌²

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (同济大学 上海 200092)

摘要 利用自行研制的同步辐射软X射线多层膜综合偏振测量装置,对北京同步辐射装置(BSRF)的3W1B软X射线光束线的偏振特性进行了系统的研究.给出了多层膜偏振元件起偏前后的测量结果,测量能量为206eV时,经反射镜、光栅等光束线光学元件后输出的线偏振度(起偏前)为0.585,经多层膜偏振元件起偏后输出光的线偏振度达到0.995.

关键词 同步辐射 软X射线 偏振装置 多层膜偏振元件 偏振特性测量

1 引言

偏振特性是同步辐射光源的优异特性之一,现在,国际上利用同步辐射的偏振特性已经在生物、化学、物理、材料科学等领域开展了广泛的研究,在对于许多物质的研究中,偏振光与物质的相互作用的测量提供了一种新的洞察力和观察视角.例如:铁磁、反铁磁和顺磁物质的软X射线磁圆二色^[1]和磁线二色^[2]光谱测量、软X射线法拉第效应^[3]和克尔效应测量^[4]、偏振光自旋分辨的光电子^[5]和俄歇电子发射谱测量、软X射线共振磁反射测量以及软X射线偏振测量术等.在这些研究中,入射光偏振态的测量是极其重要的.

但是,在极紫外和软X射线能段,任何物质的折射率(实部)趋近于1,物质对于光的吸收强烈,不存在透明物质,因而,在其他能量范围内可以使用的偏振元件在该能区失去了偏振作用.在软X光能区,由于多层膜相干加强的结构^[6],国际上通常选择多层膜作为该能区的偏振元件.

本文报道了自行研制的基于多层膜的同步辐射软

X射线综合偏振测量装置,利用该装置的双反工作模式(起偏器和检偏器都是反射模式的多层膜偏振元件)对北京同步辐射装置(BSRF)的3W1B软X射线光束线的偏振特性进行了系统的研究,分别给出了使用多层膜偏振元件起偏前后的线偏振度,其结果显示线偏振度得到极大改善.

2 基本理论与分析方法

2.1 偏振光的检测(Malus定律)

对于入射光偏振特性的检验,遵循马吕斯(Malus)定律. Malus定律是描述偏振光经过偏振元件作用后光强变化情况的规律.当被检测光的光轴与检偏器的光轴夹角为 α 时,从检偏器输出光的强度 I_1 满足以下关系

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

其中 I_0 为入射光强度.

用可以测量的量把Malus定律改写成如下形式

$$I(\alpha) = (I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}}) \cos^2 \alpha + I_{\text{Min}}. \quad (2)$$

2006-08-02 收稿

* 国家自然科学基金(10275078,10435050)资助

1) E-mail: cuimq@ihep.ac.cn

2.2 同步辐射光源的偏振特性

同步辐射是一种接近光速的电子做圆周运动时沿切线方向发出的波长连续分布的电磁辐射, 偏振特性是同步辐射所特有的特性之一. 同步辐射的偏振特性与光源的物理性质有关, 例如磁铁的磁感应强度, 周期长度, 上下(或者左右)的间隙等等; 另外, 出射光的偏振特性与光线的发散角, 接收位置密切相关.

如图1的角度所示, Θ 是水平观察角, ψ 是垂直观察角. 在电子运动的轨道平面内, $\psi=0$, 在这个平面内输出的是完全线偏振光, 当 ψ 增大时, 线偏振度下降, 圆偏振度上升, 得到的是椭圆偏振光. 垂直观察角 ψ 离开的角度越大, 圆偏振度越高.

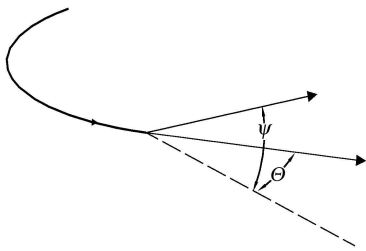


图1 电子在水平轨道内运动
 Θ 和 ψ 分别是水平和垂直方向的观察角.

2.3 线偏振度的定义

通常, 从单色器输出的光, 其主要电矢量方向在同步辐射储存环的平面内(水平方向). 则入射的同步辐射光的线偏振度定义

$$P_i = (I_H - I_V) / (I_H + I_V), \quad (3)$$

此处 I_H 和 I_V 分别是水平和垂直方向的电矢量的强度. P_i 值在 $I_V=0$ 时为+1和 $I_H=0$ 时为-1之间变化.

当同步辐射的电子轨道面是沿着水平面方向, 则实验中在水平方向得到信号的极大值, 垂直方向得到极小值. 所以(3)式线偏振度的计算公式也可以写成

$$P_L = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

其中 I_{\max} 是在水平方向($\alpha = 0^\circ, 180^\circ$)测量的偏振光强度, I_{\min} 是垂直方向($\alpha = \pm 90^\circ$)测量的偏振光强度.

3 装置介绍

3.1 3W1B光束线简介

北京的同步辐射装置(BSRF)3W1B光束线是一条单色聚焦的软X射线光束线^[7], 由北京正负电子对撞机(BEPC)第III区的3W1扭摆器(Wiggler)引出.

Wiggler输出的同步辐射光在电子轨道平面是线性偏振, 而在偏离轨道的平面上, 由于从相邻部分产生的辐射光有着相反的偏振特性而产生相互干涉, 线性成分要多于椭圆偏振成分.

3W1B光束线主要光学元件包括球面镜(SM), 平面镜(PM)和变线距光栅(VSPG)如图2所示. 其中前置镜的作用是使光束线的水平偏转, 使光束线有足够的机械装配空间; 并使光斑在水平方向聚焦到样品; 同时吸收高能辐射, 以减低单色仪的热负荷. 单色器系统由平面镜和变线距光栅组成, 作用是消除像差影响, 使光斑在垂直方向上聚焦到出射狭缝, 并且使出射光方向与入射光一致. 光阑主要用来俘获零级光和其他方向的衍射光, 其目的也是为了进一步减少杂散光, 以提高单色器效率. 该光束线的能量范围为50—1600eV. 样品台位置处光斑尺寸2(V)mm×6(H)mm, 软X射线综合偏振测量装置安装在出射狭缝后4.3m的位置上.

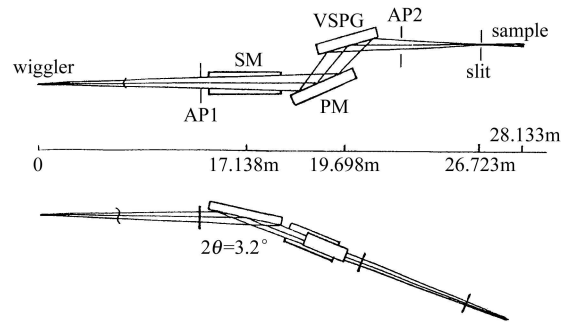


图2 3W1B光束线的光学示意图
AP1和AP2是光阑; SM是球面镜; PM是平面镜;
VSPG是变线距平面光栅; slit是出射狭缝.

3.2 同步辐射软X射线综合偏振测量装置简介

图3给出了偏振测量装置的结构示意图, 主要包括一套高精度微动准直系统(C)、 I_0 探测器(用以监测入射光强)、起偏器(P, 包括掠入射角 θ_P 的旋转, 起偏器方位角 α 的改变由腔体绕入射光轴旋转实现)、随动摇臂(R)、样品架(S)、检偏器(A, 包括检偏器的掠入射角 θ_A 旋转和方位角 β 旋转)、主探测器(D)、数据获取系统和控制系统. 其中样品入射角和起偏器方位角的操作是手动调节, 其余操作采用真空步进电机控制. 装置腔体的上游通过超高真空(UHV)磁流体密封装置与光束线连接, 可以保证腔体绕着入射光线的光轴旋转, 腔体固定在支撑平台上, 支撑平台可以实现三维运动以利于光路的调节. 在该装置上实现了多种工作模式, 主要包括反射起偏, 反射检偏(双反); 透射起偏透射检偏(双透); 反射起偏, 透射检偏(前反

后透); 透射起偏, 反射检偏(前透后反)4种工作模式. 该装置可用于多层膜反射率测量(包括P和S两个分量)、偏振元件的偏振特性测量(包括反射、透射和相移), 以及同步辐射光束线偏振特性的测量等.

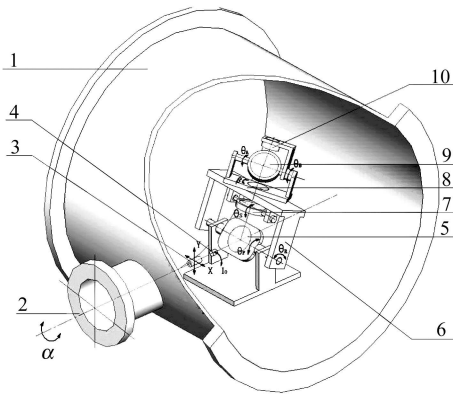


图 3 偏振装置结构示意图

1 腔体; 2 起偏器方位角 α ; 3 准直平台; 4 I_0 探测器; 5 起偏器入射角 θ_P ; 6 随动摇臂 θ_R ; 7 样品架; 8 检偏器方位角 β ; 9 检偏器入射角 θ_A ; 10 MCP 探测器入射角 θ_D .

4 偏振特性测量

4.1 多层膜偏振元件准布儒斯特角的测量

软X射能区采用多层膜偏振元件, 对于反射模式的元件, 由于材料有吸收, P偏振光反射率等于0的布儒斯特角不存在, 因而取S偏振光的反射率极大而P偏振光的反射率极小所对应的角度作为准布儒斯特角. 无论是作为起偏器还是检偏器, 都要求偏振元件能够更好的抑制入射光中一个方向的分量, 在另一个方向得到更加完美的线偏振光. 这就要求多层膜偏振元件的入射角必须工作在准布儒斯特角^[8]. 偏振元件在使用前, 首先要通过测量确定该元件的准布儒斯特角.

使用同步辐射软X射线综合偏振测量装置测量偏振元件的准布儒斯特角, 首先移走检偏器A, 探测器保持 0° , 摇臂带动探测器转动, 这样起偏器的光学元件与探测器独立构成 θ 和 2θ 关系, 图4给出了测量装置的示意图, 起偏器偏振元件采用Cr/C($N=100$, $d=4.318\text{nm}$)多层膜, 入射光能量206eV.

当起偏器方位角 $\alpha=0^\circ$, 测量的反射光强度(I_S)是相对于入射光中的S分量, α 置于 90° 时, 反射光强度(I_P)测量的是相对于入射光中P分量. 采用2倍角扫描($I-\theta$)的方法分别测量S光和P分量的反射强度, 即, 能量为206eV, 起偏器的掠入射角 θ_P , 探测器的角度

(即摇臂转动的角度)二倍角关系 $2\theta_P$ 进行角度扫描, 测量得到偏振元件掠入射角变化时的反射强度曲线. 图5分别给出了S和P分量的反射强度和消光比 I_S/I_P 曲线. 选择S分量的反射强度和S与P分量反射强度的消光比 I_S/I_P 取得极大值所对应的角度作为偏振元件的工作角度, 该角度称为多层膜的准布儒斯特角 θ_{PQB} , 实验测量得到该偏振元件的 θ_{PQB} 为 45.2° .

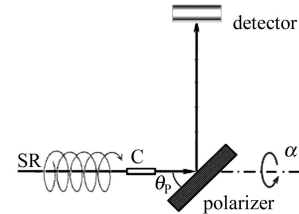


图 4 反射偏振元件测量束线输出光线偏振度的装置示意图

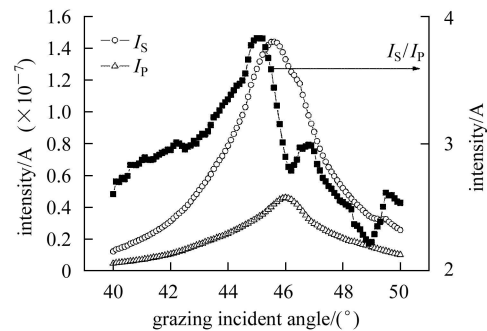


图 5 准布儒斯特角的确定: 通过二倍角扫描($I-\theta$)的方法测量S, P分量的反射强度和S与P分量反射强度的消光比 I_S/I_P 在 θ_P 为 45.2° 时取得极值

4.2 光束线输出偏振特性的测量

光束线输出光的偏振特性测量是根据Malus定律进行的. 检偏器掠入射角置于准布儒斯特角 θ_{PQB} 时, 旋转检偏器的方位角, 进行角度扫描, 获得相对于方位角变化的强度曲线.

本次实验采用上面测量的Cr/C多层膜偏振元件作为检偏器, 单色器的能量206eV, 检偏器置于准布儒斯特角 θ_{PQB} , 45.2° , 探测器的掠入射角分别置于 $2\theta_{PQB}$, 即 90.4° , 然后旋转检偏器方位角, 获得相对于检偏器方位角强度曲线.

4.3 起偏后输出光的偏振特性

由于诸多因素的影响, 从单色器出射光的线偏振度通常不能满足实验的需要. 为了获得线偏振度更高的输出光, 通常采用的方法是在光路中增加起偏器, 本次实验所用偏振元件为两个反射式多层膜, 采用双反模式检测经过起偏后出射光的偏振特性, 测量装置

示意图如图6所示. 起偏和检偏使用的偏振元件为性能参数基本相等的一对多层膜, 其中起偏器是在3.1节已经测量的Cr/C($N=100$; 起偏器, $d=4.318\text{nm}$)多层膜.

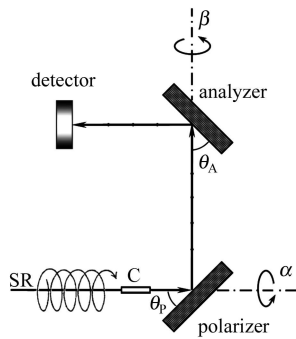


图6 起偏后输出光的线偏振度测量

双反模式(两个偏振元件都是反射式): 两个元件分别独立绕光轴旋转, 同时MCP探测器探测反射光强.

5 结果与讨论

图7给出的是检偏器Cr/C多层膜($N=100$; 检偏器, $d=4.35\text{nm}$)准布儒斯特角的测量曲线, 即, 能量为206eV时, 检偏器的S和P分量的反射强度与抑制比 I_S/I_P 曲线. 由曲线可以得到其准布儒斯特角 θ_{AQB} 为43.2°. 图8给出的是反射强度与方位角($I-\beta$)的曲线, 即, θ_P 和 θ_A 分别置于各自的准布儒斯特角45.2°和43.2°, 并且起偏器和随动摇臂满足二倍角关系, 同时检偏器与探测器也满足各自的二倍角关系, 测量检偏器方位角 β ($-180^\circ \leq \beta \leq +190^\circ$)扫描过程中强度变化的曲线. 检偏器方位角 $\beta=0, \pm 180^\circ$ 时获得信号的极大值, 相对于S分量的测量, $\beta = \pm 90^\circ$ 相对于P分量.

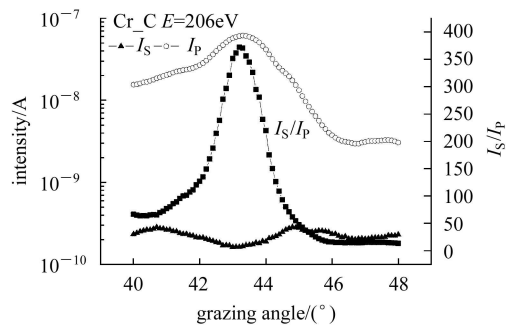


图7 双反模式下, 能量206eV时, Cr/C做偏振元件的测量结果

采用二倍角扫描($I-\theta$)的方法测量S和P分量的反射率和 I_S/I_P 的抑制比曲线, θ_A 在43.2°时 I_S/I_P 取得极值.

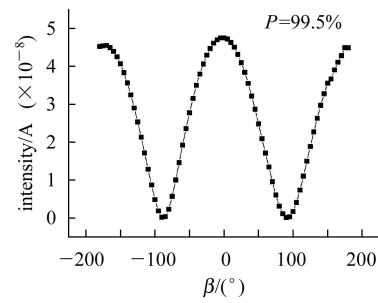


图8 方位角扫描($I-\beta$)测量曲线

当检偏器掠入射角 θ_A 为43.2°, 检偏器的方位角 β 从 -180° 到 $+180^\circ$ 旋转而获得强度曲线. 线偏振度可达0.995.

由线偏振度的计算(4)式可知, 为了计算线偏振度, 需要S和P分量的反射强度, 即检偏器方位角为 0° 或者 $\pm 180^\circ$ 时获得信号的极大值, 相对于S分量的测量, 方位角为 $\pm 90^\circ$ 相对于P分量. 则(4)式可以写成

$$P_L = \frac{I_S - I_P}{I_S + I_P}. \quad (5)$$

由图5可以得到光束线的起偏前的反射强度, 方位角为 0° 和 90° 分别对应 I_S 和 I_P , 则3W1B光束线在能量为206eV时的线偏振度为0.585.

从图8得到经过起偏器起偏后的出射光在不同方位角所对应的反射光强. 把 I_S 和 I_P 分别带入(5)式, 计算得到经过起偏以后线偏振度可达0.995.

由两个实验的测量结果可以看出光束线输出光在线偏振度为0.585时, 经过多层膜起偏后, 输出光的线偏振度为0.995, 说明经过起偏后, 输出光的线偏振特性得到了明显的改善.

6 结论

利用基于多层膜偏振元件的测量装置对同步辐射软X射线光束线的偏振特性进行了系统的测量, 测量能量为206eV时, 经反射镜、光栅等光束线光学元件后输出的线偏振度(起偏前)为0.585, 经多层膜偏振元件起偏后输出光的线偏振度达到0.995. 结果表明采用多层膜偏振元件构成的测量装置可以很好的测量光束线的线偏振度, 并且使用多层膜偏振元件起偏可使出射光束的线偏振度得到极大改善. 这对于线偏振度要求较高的实验有很大益处, 也为BSRF拓宽研究领域提供了一个重要的研究手段.

参考文献(References)

- 1 Eimüllera T, Kato T, Mizuno T et al. Appl. Phys. Lett., 2004, **85**: 2310
- 2 Scholl A, Stöhr J, Lüning J et al. Science, 2000, **287**: 1014—1016
- 3 Mertins H C, Schafers F et al. Phys. Rev., 2000, **B61**: R874
- 4 Guedes I, Grimsditch M, Metlushko V et al. Phys. Rev., 2003, **B67**: 024428
- 5 Waddill G D, GUO X, TONG X Y. Phys. Rev., 1994, **B50**: 6774
- 6 Kortright J B, Rice M, Kim S K et al. Mater., 1999, **91**: 79
- 7 CUI Ming-Qi, CUI Cong-Wu, ZHAO Yi-Dong et al. Atomic Energy Science and Technology, 1998, **32**: 492—498 (in Chinese)
(崔明启, 崔聪悟, 赵屹东等. 原子能科学与技术, 1998, **32**: 492—498)
- 8 WANG Hong-Chang, WANG Zhan-Shan, LI Fu-Sheng et al. Opt. Tech., 2003, **29**: 277—280 (in Chinese)
(王洪昌, 王占山, 李佛生等. 光学技术, 2003, **29**: 277—280)

Polarization Characteristic Measurements of the Synchrotron Radiation Beamline Based on Multilayer^{*}

SUN Li-Juan¹ CUI Ming-Qi^{1:1)} ZHU Jie¹ ZHAO Yi-Dong¹ ZHENG Lei¹ MA Chen-Yan¹

CHEN Kai¹ ZHAO Jia¹ ZHOU Ke-Jin¹ WANG Zhan-Shan² WANG Hong-Chang²

1 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Using the home-made synchrotron radiation soft X-ray polarimeter based on multilayer elements, the polarization characteristics of the Beamline 3W1B have been measured at Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF). This paper compares the measuring results of using polarizer with the results without the polarizer at 206eV. The degree of linear polarization without the polarizer is 0.585. However, the degree of linear polarization is up to 0.995 when the beam is polarized by multilayer optical elements.

Key words synchrotron radiation, soft X-ray, polarimeter, multilayer polarized element, measurement of polarization characteristic

Received 2 August 2006

* Supported by NSFC (10275078, 10435050)

1) E-mail: cuimq@ihep.ac.cn