

基于多层膜偏振元件的软 X 射线 磁光 Faraday 偏转测量^{*}

鄢 芬¹⁾ 崔明启^{1)†} 陈 凯¹⁾ 孙立娟¹⁾ 席识博¹⁾
周克瑾¹⁾ 郑 雷¹⁾ 赵屹东¹⁾ 王占山²⁾
朱京涛²⁾ 张 众²⁾ 赵 佳³⁾

1) 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) 同济大学精密光学工程技术研究所, 物理系, 上海 200092)

3) 北京工商大学, 北京 100037)

(2007 年 10 月 8 日收到, 2007 年 10 月 30 日收到修改稿)

在北京同步辐射装置(BSRF)的 3W1B 软 X 射线光束线上利用自行研制的同步辐射软 X 射线综合偏振测量装置对 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近(60—70 eV)进行了软 X 射线磁光(magneto-optical)法拉第效应(Faraday effect)的偏转测量. 实验装置主要由起偏器、检偏器、样品架、圆形软铁磁永磁体和 MCP 探测器组成, 偏振元件(起偏元件和检偏元件)均采用反射式非周期性 Mo/Si 宽带多层膜. 实验采用反射起偏和反射检偏的模式, 得到一系列能量范围在 60—70 eV 间的法拉第偏转角结果. 结果表明在 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近法拉第效应最为明显, 当能量为 65.5 eV 和 68 eV 时, Faraday 偏转角分别为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$ (1.79° 为正反向磁场偏转角大小的平均值)和 $-0.76^\circ \pm 0.09^\circ$ (0.76° 为正反向磁场偏转角大小的平均值).

关键词: 软 X 射线, 磁光 Faraday 效应, 综合偏振测量装置, 宽带多层膜

PACC: 0782L, 0760F, 3320R

1. 引 言

近年来, X 射线磁光光谱学发展迅速, 并且发展了许多对于研究材料磁特性有价值的测量方法. 如软 X 射线磁圆二色(XMCD)^[1]、磁线二色(XMLD)^[2]、用于软 X 射线元素分辨的法拉第效应^[3]和克尔效应^[4]等. 在这些 X 射线磁光光谱学方法中, 普遍存在两大研究特点: 一是研究关于入射 X 射线的偏振状态是圆偏振光还是线偏振光, 二是经与磁性材料相互作用后的光束光强和偏振度是否被测量到^[5]. 用于测量 X 射线磁圆二向色性的 X 射线圆偏振光应用最为广泛; 用于研究 XMLD 和 X 射线法拉第效应(XFE)的 X 射线线偏振光应用范围相对较窄. XMCD, XMLD 均为强度测量, 而 X 射线法拉第效应则需要对偏振状态进行分析, 得到法拉第偏转(透射

后的偏振平面的偏转)和法拉第椭圆率(透射后变成椭圆偏振光的偏振度). X 射线法拉第效应是一项研究偏振的复杂的工作, 尤其在检偏元件稀少的软 X 能区. 最近的研究表明用 XFE 方法研究二向色性光谱学相对传统的 XMCD 方法更有优势, 表现在仅利用线偏振光进行 XFE 测量就可以得到吸收和散射光谱的二色部分^[5], 传统的 XMCD 方法只能得到磁光常数的虚部, 即吸收二色因子.

偏振特性是同步辐射光源优异特性之一, 在软 X 射线偏振应用研究方面, Faraday 效应是国际上对于偏振应用研究重点之一. 在软 X 能区, Faraday 的偏转角比在其他能段的要明显得多, 因为这段能区覆盖了大量元素的吸收边(2p 和 3p 边), 从而提供了一个全面获得磁性材料(3d 铁磁性金属: Fe, Co, Ni 等)元素细分的方法. 总之, Faraday 效应拓宽了同步辐射软 X 射线线偏振光的应用领域.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10275078, 10435050)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: cuiinq@ihep.ac.cn

本文将介绍在北京同步辐射装置(BSRF)的 3W1B 软 X 射线光束线^[6]利用自行研制的同步辐射软 X 射线综合偏振测量装置^[7]进行基于多层膜偏振元件的磁光 Faraday 偏转测量,研究 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近的 Faraday 偏转效应,给出不同能量、不同磁场方向下的偏转角和对比结果。

2. 原 理

法拉第效应是法拉第于 1845 年发现的一种磁光效应,即非旋光性物质在纵向磁场(磁场方向与光传播方向平行)的作用下使线偏振光的振动面发生旋转的现象.实验表明线偏振光的振动面旋转的角度 θ 与磁场强度 H 及光在媒质中通过的距离 l 成正比,即

$$\theta = KHL, \quad (1)$$

其中 K 为费尔德常数(Verdet constant),它与光波波长和温度有关,与磁场强度无关。

在软 X 射线能区,入射的线偏振光可以分解成两束左旋和右旋圆偏振光,经过磁化样品透射后,两束圆偏振光间的相位发生变化,从而产生了磁光法拉第偏转,吸收的二向色性导致入射的线偏振光透射后变成一束椭圆偏振光,如图 1 示。

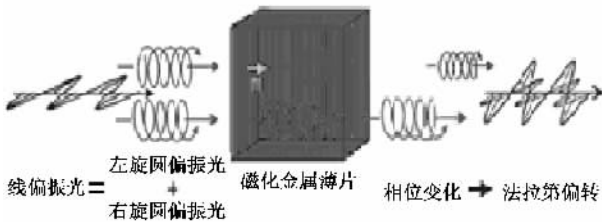


图 1 磁光法拉第偏转原理图^[8]

两束螺旋性相反的圆偏振光与磁性物质的相互作用可以用复折射率 n_{\pm} 来表示:

$$\begin{aligned} n_{\pm} &= 1 - \delta_{\pm} + i\beta_{\pm}, \delta_{\pm} = \delta_0 \pm \Delta\delta, \\ \beta_{\pm} &= \beta_0 \pm \Delta\beta, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 δ_0 为非偏振光的散射因子, β_0 为非偏振光的吸收因子, $\Delta\beta$ 为散射的二向色性因子,即由磁场引起的光学常数实部的变化量, $\Delta\delta \neq 0$ 表明两束左旋和右旋圆偏振光间存在相位变化,引起了偏振面的偏转.因此,入射的线偏振光($P_{L-in} = 1$)经磁化金属薄片透射后变成了椭圆偏振光. $\Delta\beta$ 为磁光常数的虚部,即吸收二色因子。

圆二向色性定义为光学常数的变化量:

$$\Delta n = 1/2(n_+ - n_-) = -\Delta\delta + i\Delta\beta. \quad (3)$$

吸收的二向色性决定 XMCD 的非对称参数 A , A 定义为

$$A = (T_- - T_+)(T_- + T_+), \quad (4)$$

其中透射系数 $T_{\pm} = \exp\{-2qd\beta_{\pm}\}$, q 为波矢(wave vector), d 为样品厚度。

通过对透射光的偏振分析可以得到两个量:与磁光光学常数相关的圆偏振光的偏振度 $P_{C-tran} = (1 - P_{L-tran}^2)^{1/2}$ 和法拉第偏转角 φ , 它们分别为^[9]

$$P_{C-tran} = A \approx 2qd\Delta\beta, \quad (5a)$$

$$\varphi = qd\Delta\delta, \quad (5b)$$

(5b) 式为法拉第偏转角在软 X 能段的表达式. 可见 P_{C-tran} 与 XMCD 的非对称参数 A 成正比, $\Delta\beta$ 可以通过(5a)式由测量透射光的圆偏振度得到, 而 $\Delta\delta$ 可以由实验测得的法拉第偏转角 φ 由(5b)式得到. XMCD 与法拉第偏转测量相结合可以对光学常数的圆二向色性进行全面系统地研究。

3. 实验方法

3.1. 实验装置^[7]

图 2 是综合偏振测量装置内部结构示意图, 主要包括一套高精度微动准直系统(C)、起偏器(P , 包括掠入射角 θ_p 的旋转、检偏器方位角 α 的改变由腔体绕入射光轴旋转实现)、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)。

Faraday 偏转测量实验在以上装置的基础上加入了专为样品架设计的附着在样品架上的圆形钕铁硼永磁铁, 如样品解剖图中所示, 组成了一套专门用于同步辐射多层膜偏振应用研究——Faraday 效应偏转角测量的实验装置。

3.2. 宽带多层膜偏振元件准布儒斯特角及其带宽的测量

实验在 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近(60—70 eV)能段进行, 采用 Mo/Si 非周期宽带反射式多层膜偏振元件^[10]作为起偏镜和检偏镜, 起偏镜用以产生此能段的连续线偏振光. 为抑制高次谐波在装置前加入 Al 滤片. 多层膜偏振元件的入射角必须工作在准布儒斯特角^[11], 首先需要通过测量确定该元件的准布儒斯特角和带宽。

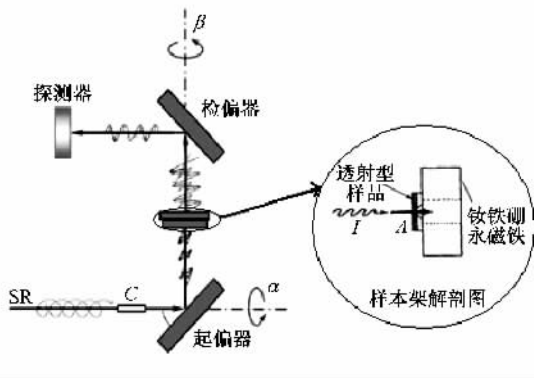


图 2 综合偏振测量装置内部结构示意图

测得两块 Mo/Si 多层膜的准布儒斯特角分别为 49.5° 和 49°，在其准布儒斯特角处的抑制比分别达到 31 和 27.5。图 3 和图 4 分别为两块多层膜不同能量处测得的 I_s （相对于入射光中的 S 分量）和 I_p （相对于入射光中 P 分量）以及抑制比 I_s/I_p 曲线，从图中可以看出，在 60—70 eV 范围内 I_s 和 I_p 以及抑制比 I_s/I_p 三条曲线均比较平滑。

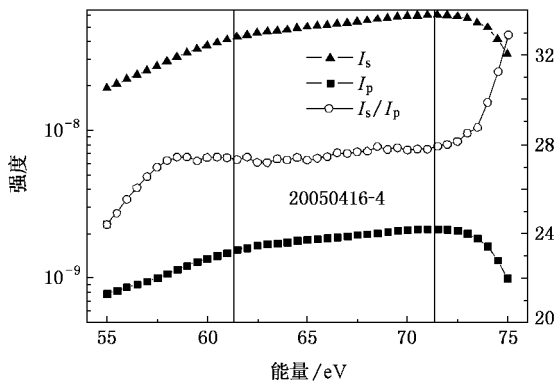


图 3 不同能量时的 I_s 和 I_p 以及抑制比 I_s/I_p 曲线

为检测起偏镜反射后的线偏光经附加磁场样品透射后的偏振平面偏转状况，通过检偏镜方位角扫描测得曲线偏移状况，曲线应严格遵循马吕斯（Malus）定律^[12]。测量时起偏镜方位角 $\alpha = 0$ ，起偏镜和检偏镜掠入射角均置于准布儒斯特角，MCP 探测器置于相对于检偏镜 $2\theta_A$ 处，转动检偏镜方位角 β 。图 5 为起偏镜和检偏镜共同工作时能量在 68 eV 时的检偏器方位角 β 扫描曲线，测得经起偏镜起偏后的光的偏振度达到 98.5%。

3.3. 磁光 Faraday 偏转测量

同步辐射光电子轨道平面发出的同步辐射光是

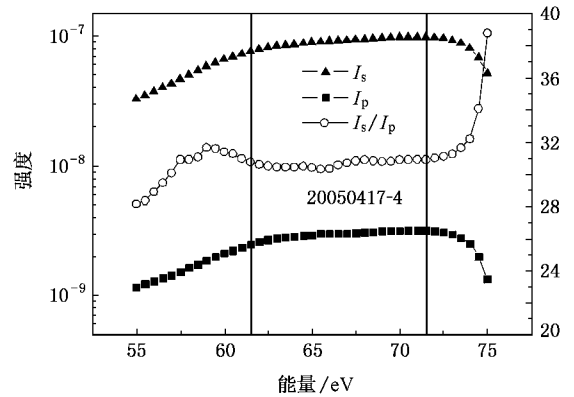


图 4 不同能量时的 I_s 和 I_p 以及抑制比 I_s/I_p 曲线

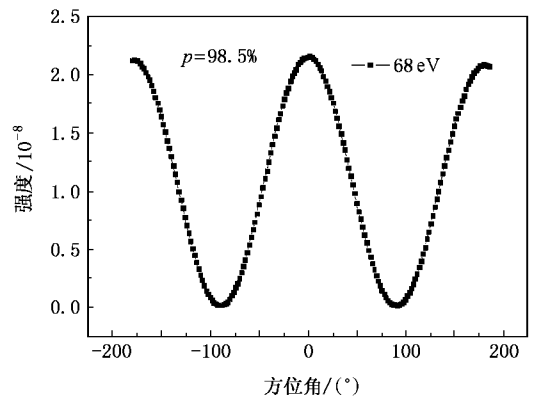


图 5 能量为 68 eV 时 β 方位角扫描曲线

完全偏振光，偏振向量在轨道平面，可知入射光是偏振度比较高的线偏振光，整套实验装置采用双反式工作状态（反射起偏 + 反射检偏），经起偏镜起偏后的光具有更高的线偏振度，可近似为纯线偏振光，再经透射型样品架入射到检偏镜上，最后经检偏镜反射到 MCP 探测器上，检偏镜检测线偏光通过附带磁铁样品架后的偏振状态，测量光路图见图 2。

实验采用定能量检偏镜方位角 β 扫描方法，即固定一能点，进行检偏镜方位角 β 扫描，扫描范围 $-180^\circ - +180^\circ$ ，对通过样品后的偏振光进行逐点检测，然后改变另一能量，重复扫描。其中起偏镜和检偏镜均置于各自的准布儒斯特角位置，样品处于起偏镜和检偏镜之间。样品为 Ni 透射膜，厚度为 31 nm，采用铜网支撑，在 60—70 eV 能段铜网的透过率约为 30%，圆形永磁铁中心透过 Ni 样品的磁场强度为 0.14 T。实验主要测量在不同能量条件下，磁场方向与入射光方向平行，磁场方向与入射光方向反平行以及不加入磁场三种状态下的 Faraday 偏转角偏移状况。

4. 结果与讨论

图 6 是能量为 65.5 eV 时测量的三组数据,分别是磁场与入射光方向平行和反平行以及不加磁场三种不同实验状态下测得的结果,从图中的放大部分可以清晰地看到不同状态下检偏镜方位角扫描曲线的偏移.当不加磁场时,没有任何偏移,当加上正向磁场时,曲线沿 X 轴正向移动,当改变磁场方向时,曲线明显向 X 轴反向移动,经拟合得出二者移动距离相等.在 65.5 eV 时 31 nm 厚度的 Ni 在磁场作用下的法拉第偏转角测量结果为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$.

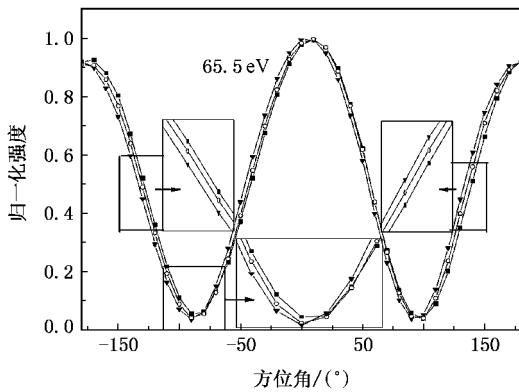


图 6 磁场方向与入射光方向平行(■),反平行(▼)以及不加磁场(○)三种状态下的 β 方位角扫描曲线对比图

当能量不同时,偏转状况也会不同,法拉第偏转角大小会随着能量的不同而不同,图 7 给出了能量分别为 65.5 eV、66.5 eV、68 eV 时的测量结果,从图中放大部分可以清晰看到不同能量间存在沿 X 方向的曲线偏移.

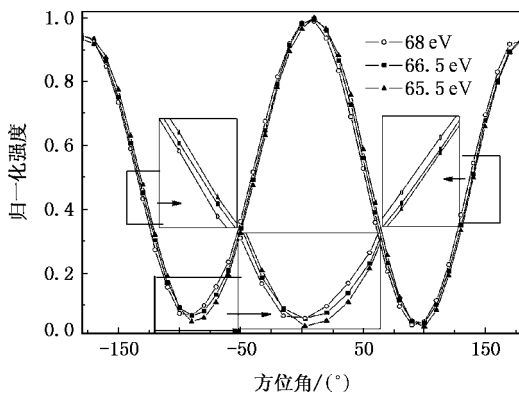


图 7 固定磁场方向及大小不变时不同能量之间的 β 方位角

表 1 给出了 60—70 eV 能量范围(涵盖 Ni 的 $M_{2,3}$ 边)的全部测量结果,从表中可以看到,随着能量越来越接近 Ni 的 $M_{2,3}$ 边,法拉第偏转角逐渐增大.当能量达到 65.5 eV 时,法拉第偏转角达到最大,为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$ (1.79° 为正反向磁场偏转角大小的平均值),然后再减小,到能量为 67 eV 时,法拉第偏转方向发生改变,即 67 eV 是法拉第偏转角偏转方向的一个临界点,当磁场方向不变时,能量大于和小于此能量间的法拉第偏转角偏转方向是正负相反的,此时法拉第偏转角接近 0.随着能量逐渐接近 68 eV 法拉第偏转角逐渐增大,当能量达到 68 eV 时达到反向最大,为 $-0.76^\circ \pm 0.09^\circ$ (0.76° 为正反向磁场偏转角大小的平均值),之后随着能量逐渐远离 Ni 的 $M_{2,3}$ 边法拉第偏转角逐渐变小为零.通过表中不确定度值可以知道加正反磁场两种情况下的法拉第偏转图是基本对称的,这些不确定度主要是由于数据的拟合造成的.

表 1 不同能量处正反磁场的法拉第偏转角大小和不确定度

能量/eV	正向磁场时 Faraday 偏转角($^\circ$)	反向磁场时 Faraday 偏转角($^\circ$)	不确定度($^\circ$)
60	0.44	-0.38	0.06
61	0.52	-0.58	0.06
62	0.63	-0.75	0.13
63	0.73	-0.90	0.18
64	1.0	-1.13	0.13
64.5	1.23	-1.26	0.04
65	1.43	-1.50	0.08
65.5	1.88	-1.69	0.19
66	1.26	-1.37	0.11
66.5	0.48	-0.62	0.15
67	-0.13	0.03	0.10
67.5	-0.63	0.53	0.10
68	-0.80	0.72	0.09
68.5	-0.55	0.50	0.05
69	-0.38	0.32	0.06
70	-0.28	0.21	0.08

日本 Tohoku 大学在 UVSOR 同步辐射装置上,利用 Al/YB₆ 多层膜偏振元件在 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近进行法拉第偏转测量实验,Ni 样品厚度为 31.5 nm,磁场大小为 0.82 T,在 Ni 的 3p 边得到最大法拉第偏转角约为 4.5° ,对应能量约为 65.2 eV^[13].德国在 BESSY 同步辐射装置上也对 Ni 的 3p 边进行法拉第偏转实验,得到 Ni 3p 边的最大散射的二向色性因子 $\Delta\delta$ 为 0.45×10^{-2} ^[14],对应能量为 66 eV,由(5b)式计算得当 Ni 厚度为 31 nm 时法拉第偏转角为

2.67°. 而我们在能量为 65.5 eV 处得到的最大法拉第偏转角为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$, 三个实验的结果之间存在大小差异, 这主要与磁场大小, 光源稳定性, 实验精度和效率, 检偏元件性能等的不同有关, 而且在我们的实验中, 由于束线尚无用于产生专用可调偏振光的插入件——波荡器, 所以利用多层膜起偏镜获得的线偏振光并不是完全线偏振光, 而是偏振度为 98.5% 的部分线偏振光, 再加上多层膜的粗糙度和 Ni 样品被氧化的影响, 使得数据间存在差异性. 因此, 更加优化细致的实验有待于我们进一步的分析研究.

5. 结 论

在 Ni 的 $M_{2,3}$ 边附近进行了磁光 Faraday 偏转测

量, 并得到一系列能量范围在 60—70 eV 间的法拉第偏转角结果. 结果表明在能量为 65.5 eV 处, 法拉第偏转角最大, 为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$, 67 eV 是法拉第偏转角偏转方向的一个临界点, 在能量 67 eV 处, 法拉第偏转角偏转方向发生改变, 在 68 eV 时法拉第偏转角达到反向最大, 为 $-0.76^\circ \pm 0.09^\circ$. 而且通过改变磁场方向(让磁场与入射光反平行)得到了另一组数据, 偏转角的偏转方向与加正向磁场时相反, 大小基本不变(存在不确定度), 这些不确定度主要源于数据拟合误差, 实验重复性误差, 角度分辨, 多层膜的粗糙度影响以及光源稳定性等. 总之, 我们在 Ni 的 $3p$ 边得到的最大法拉第偏转角为 $1.79^\circ \pm 0.19^\circ$, 并与国外相关实验结果进行对比和分析. 这仅是针对磁光 Faraday 效应的初步应用研究, 更加深入的分析有待于进一步研究.

- [1] Wang J, Li H H, Li R P *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5475 (in Chinese) [王 杰, 李红红, 李锐鹏等 2005 物理学报 **54** 5475]
- [2] Scholl A, Stohr J, Lu-ning J *et al* 2000 *Science* **287** 1014
- [3] Mertins H C, Schafers F 2000 *Phys. Rev. B* **61** R874
- [4] Guedes I, Grimsditch M, Metlushko V *et al* 2003 *Phys. Rev. B* **67** 024428
- [5] Kunes J, Oppeneer P M, Mertins H C *et al* 2001 *Phys. Rev. B* **64** 174417-1
- [6] Zhu J, Cui M Q, Zheng L *et al* 2004 *Nucler Techniques* **27** 489 (in Chinese) [朱 杰, 崔明启, 郑 雷等 2004 核技术 **27** 489]
- [7] Sun L J, Cui M Q, Zhu J *et al* 2007 *HEP&NP* **31** 403 (in Chinese) [孙立娟, 崔明启, 朱 杰等 2007 高能物理与核物理 **31** 403]
- [8] Mertins H C, Valencia S, Gaupp A *et al* 2005 *Appl. Phys. A* **80** 1014
- [9] Lovesey S W, Collins S P 1996 *X-ray Scattering and Absorption by Magnetic Materials* (Oxford : Clarendon)
- [10] Wang Z S, Wang H C, Zhu J T *et al* 2006 *J. of Appl. Phys.* **99** 056108-2
- [11] Wang H C, Wang Z S, Li F S *et al* 2003 *Opt. Tech.* **29** 277 (in Chinese) [王洪昌, 王占山, 李佛生等 2003 光学技术 **29** 277]
- [12] Sun L J, Cui M Q, Zhu J *et al* 2007 *HEP&NP* **31** 402 (in Chinese) [孙立娟, 崔明启, 朱 杰等 2007 高能物理与核物理 **31** 402]
- [13] Hatano T, Hu W B, Saito K *et al* 1999 *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **101-103** 287
- [14] Valencia S, Gaupp A, Gudat W *et al* 2006 *New Journal of Physics* **8** 254

Soft X-ray magneto-optical Faraday rotation measurements with the multilayer polarizer^{*}

Yan Fen¹⁾ Cui Ming-Qi^{1)†} Chen Kai¹⁾ Sun Li-Juan¹⁾ Xi Shi-Bo¹⁾
Zhou Ke-Jin¹⁾ Zheng Lei¹⁾ Zhao Yi-Dong¹⁾ Wang Zhan-Shan²⁾
Zhu Jing-Tao²⁾ Zhang Zhong²⁾ Zhao Jia³⁾

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

²⁾ *Tongji University, Shanghai 200092, China*

³⁾ *Beijing University of Technology and Business, Beijing 100037, China*

(Received 8 October 2007; revised manuscript received 30 October 2007)

Abstract

We measured magneto-optical (MO) Faraday rotation around the $M_{2,3}$ edges (60—70 eV) of Ni film on 3W1B beam line of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) in the soft X-ray region through a versatile polarimeter with multilayer polarizers, which is mainly composed of polarizer, analyzer, sample frame, round NdFeB permanent-magnet and MCP detector. We used the reflective aperiodic molybdenum/silicon broadband multilayer polarizers as the polarizer and the analyzer in the versatile polarimeter, and obtained a series of Faraday rotation results in the 60—70 eV region. The results demonstrate that the Faraday rotation angles are obviously large around Ni $M_{2,3}$ edges, the rotation angles are $1.79 \pm 0.19^\circ$ (average rotation angle in parallel and antiparallel magnet fields) and $-0.76 \pm 0.09^\circ$ (average rotation angle in parallel and antiparallel magnet fields) at the energy 65.5 eV and 68 eV, respectively.

Keywords : soft X-ray, magneto-optical Faraday rotation, versatile polarimeter, broadband multilayer

PACC : 0782L, 0760F, 3320R

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10275078, 10435050).

[†] Corresponding author. E-mail : cuiinq@ihep.ac.cn