

## 基于同步辐射的时间分辨 X 射线铁磁共振方法

杨霞<sup>1,2</sup>, 李俊琴<sup>1,3</sup>, 曹杰峰<sup>1,3\*</sup>, 赵子龙<sup>3</sup>, 王勇<sup>1,3\*\*</sup>, 邵仁忠<sup>1,3\*\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海应用物理研究所上海光源, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海高等研究院上海光源, 上海 201204

**摘要** 基于同步辐射装置的时间分辨 X 射线铁磁共振方法采用了相移模式的“泵浦-探测”技术, 结合了铁磁共振和磁圆二色原理, 是研究自旋转移矩和自旋流等自旋电子学问题的一种独特手段。本文介绍了首次在国内第三代同步辐射装置——上海光源发展的皮秒级时间分辨技术以及搭建的 X 射线铁磁共振实验平台。利用该实验平台, 使单层坡莫合金( $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ , Py) 在 2.5 GHz 微波磁场的激励下发生铁磁共振, 并测量了  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  薄膜中 Ni 元素的电子自旋进动锥角沿光束方向投影随时间的变化曲线。实验结果证明, 该实验平台能在 GHz 量级上激发磁性元素产生电子自旋进动, 并且在皮秒级时间尺度上探测到电子自旋进动的振幅和相位。该实验平台的建立能为自旋电子学材料和器件的研究提供独有的技术支持。

**关键词** X 射线光学; 同步辐射; 时间分辨方法; 铁磁共振; 自旋进动

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1534002

## Time-Resolved X-Ray Ferromagnetic Resonance Method Based on Synchrotron Radiation

Yang Xia<sup>1,2</sup>, Li Junqin<sup>1,3</sup>, Cao Jiefeng<sup>1,3\*</sup>, Zhao Zilong<sup>3</sup>, Wang Yong<sup>1,3\*\*</sup>, Tai Renzhong<sup>1,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup> Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

**Abstract** In combination with ferromagnetic resonance and magnetic circular dichroism, the time-resolved X-ray ferromagnetic resonance method based on synchrotron radiation devices, which adopts the “pump-probe” technique of phase shift mode, is a unique technique to study a wide class of spintronics issues such as spin transfer torque and spin current. In this paper, an experimental apparatus that allows for the combination of the picosecond time-resolved technique and X-ray ferromagnetic resonance is introduced for the first time at the third-generation synchrotron radiation light source in China, Shanghai Synchrotron Radiation Facility. With this apparatus, the single-layer Permalloy ( $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ , Py) undergoes ferromagnetic resonance under the 2.5 GHz microwave excitation and we measure the time-dependent projection of electronic spin precession cone angle of Ni in the  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  film in the beam direction. The results show that the apparatus can excite the electronic spin precession of magnetic elements on the magnitude of 2.5 GHz and detect the amplitude and phase of electronic spin precession on the

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-01-26; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 工信部国家重点研发项目(2016YFB0700402)、科技部国家重点研发计划(2017YFA0403400)、国家自然科学基金(11875314, 11805260, U1632268)、上海市科委重大项目(17JC1400800)

通信作者: \*caojiefeng@zjlab.org.cn; \*\*wangyong@zjlab.org.cn; \*\*\*tairenzhong@zjlab.org.cn

picosecond scale. This apparatus can provide unique technical support for the investigation into the spintronic materials and devices.

**Key words** X-ray optics; synchrotron radiation; time-resolved method; ferromagnetic resonance; spin precession

**OCIS codes** 340.6720; 320.5390; 260.5740; 310.3840

## 1 引言

20 世纪 80 年代末巨磁阻效应<sup>[1-2]</sup> (GMR) 的发现使磁存储技术得到了具有革命性意义的提高, 电子自旋成为了新一代信息的载体。在计算机领域迅猛发展的势头下, 人类对磁存储基本电子元器件读写速度-磁矩翻转速度有了越来越高的追求, 开展超快时间尺度上的磁矩动力学研究<sup>[3-5]</sup> 就显得非常有意义。

目前超快磁矩动力学实验多采用时间分辨磁光克尔<sup>[6-7]</sup> 方法 (TR-MOKE), TR-MOKE 能在百飞秒级时间尺度上得到磁性样品表面的磁各向异性等信息, 但同时也受到激光光子能量低、可调谐范围窄等局限, 无法从芯能级上进一步探讨磁性机制或是分辨不同元素对磁性的贡献。基于同步辐射的时间分辨 X 射线铁磁共振方法<sup>[8]</sup> (TR-XFMR) 可以弥补这些不足。同步辐射光波段宽, 能量可调, 可测量 3d 和 4f 族磁性材料的芯能级电子跃迁, 得到元素、价态和配位等信息。同时, 同步辐射光也具有优良的脉冲时间结构并且偏振性也可以任意调节, 能在皮秒级时间尺度上利用磁圆二色/磁线二色技术 (XMCD/XMLD) 对铁磁、反铁磁材料进行研究。

目前国际上已有同步辐射装置应用了类似的实验方法。2004 年, Bailey 等<sup>[9]</sup> 在美国阿贡国家实验室 APS (Advanced Photon Source) 的 4-ID-C 线站上利用 TR-XFMR 方法, 在 2.6 GHz 微波激励  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (50 nm) 发生铁磁共振 (FMR) 的实验中, 首次探测到 Fe 和 Ni 的自旋进动过程, 时间分辨率为 90 ps。2016 年, Li 等<sup>[10]</sup> 在劳伦斯伯克利国家实验室的先进光源 ALS (Advanced Light Source) 的 4.0.2 线站基于 Py/Cu/Cu<sub>75</sub>Mn<sub>25</sub>/Cu/Co 多层膜中的 Py 发生铁磁共振, 将纯交流自旋流泵入 Cu<sub>75</sub>Mn<sub>25</sub>, 然后采用 TR-XFMR 方法测 Mn 的进动过程首次成功实现了针对交流自旋流的直接测量。

国内在自旋电子学领域的研究十分广泛, 在大陆目前唯一的第三代同步辐射装置<sup>[11-12]</sup>——上海光源发展磁动力学研究平台, 有助于磁学研究的发展。对于 TR-XFMR 方法, 其时间分辨率由加速器储存环中光子束团的脉冲宽度决定。与英国 Diamond<sup>[13]</sup>

和美国 ALS<sup>[14]</sup> 的 35 ps, 70 ps 的脉冲宽度相比, 上海光源单个光子束团的长度更短, 约为 13 ps, 理论上时间分辨能力更好。

本文介绍了在上海光源 BL08U 实验站搭建的时间分辨 X 射线铁磁共振实验装置, 阐述了利用同步辐射的特点实现时间分辨的方法, 制备了原位共面波导<sup>[15]</sup> (CPW) 和样品, 并首次在国内光源上测得了坡莫合金中 Ni 元素的自旋进动曲线。该实验方法的建立填补了国内空白, 为广大科研工作者提供了一个前所未有的研究平台。

## 2 TR-XFMR 方法

本次发展的时间分辨铁磁共振方法, 是一种“phase shift”模式的“pump-probe”时间分辨方法。同步辐射装置发出的 X 射线, 是由具有固定时间结构的一个个光子束团组成的 (上海光源储存环里的电子束团以约 500 MHz 的频率发射同步辐射光)。利用同步辐射具有周期性这个特点, 在测量可不断重复的物理过程时, 将激发物理现象的微波 (pump) 和测量物理现象的 X 射线光子束团 (probe) 同步, 在同一延迟时间测量过程中, 每个间隔为 2 ns 的光子束团测量的都是周期循环过程中的同一个时刻点, 这些信号累计后就得到某个时刻点的信息。下一次测量时, 改变 pump 和 probe 之间的相位差, 则得到另一个时刻点的信号, 将所有时刻点的测量数据排列出来即获得整个物理过程具有时间维度的变化曲线。“phase shift”模式时间分辨方法原理图如图 1 所示, 同一次采集中, 光子束团测量的是周期过程中的同一时刻点。

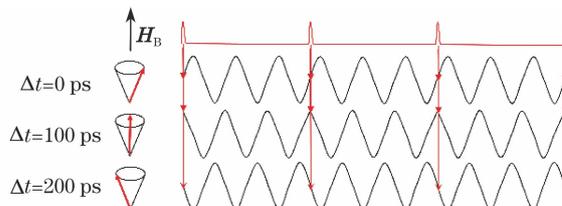


图 1 Phase shift 模式时间分辨方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the time-resolved method of phase shift mode

自旋泵浦<sup>[16]</sup> 是依据铁磁共振原理来实现的。在电磁波的作用下, 磁性材料中的磁矩在微波磁场

力矩的作用下绕着有效场的方向发生进动,产生能量损耗;当外加微波磁场的频率与磁性材料的本征共振频率相等时,磁矩进动振幅最大,发生共振,引起强烈的能量损耗<sup>[17]</sup>。磁矩进动的模型如图 2 所示。

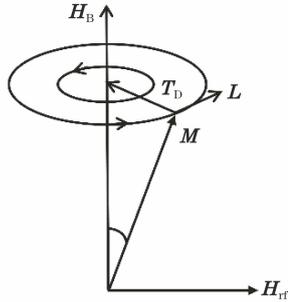


图 2 铁磁共振原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ferromagnetic resonance

将磁性材料置于外加直流磁场  $H_B$  中,由于磁性材料中轨道磁矩和自旋磁矩的影响,磁化强度  $M$  会受到力矩  $L = \mu_0 M \times H_B$  的作用,围绕恒磁场  $H_B$  进动,即所谓的拉莫尔进动<sup>[18]</sup>。由于磁性材料内部存在各种损耗,因此  $M$  在进动时会受到一定的阻力  $T_D$ ,  $M$  沿螺旋形轨迹做振幅和进动角  $\theta$  逐渐减小的

进动,趋于平衡方向。由于阻尼作用很大,  $M$  会在非常短的时间内达到平衡态稳定下来,不易探测。为保证磁矩进动一直进行,需要施加与  $H_B$  方向垂直的某一频率的连续微波磁场  $H_{rf}$  (由 CPW 提供) 来抵消进动中阻尼消耗的能量,当磁矩频率和微波频率一致时,发生共振吸收现象。

磁性元素自旋进动的频率一般在 GHz 量级(具体进动频率随恒磁场变化),要激发磁性元素自旋进动,需要给 CPW 输入 GHz 量级的并且具有相当功率的射频电流。此外,在探测中要实现泵浦探测技术就需要将激发自旋进动的射频电流的相位和 X 射线光子束团的相位同步。为同时达到同步、频率和功率这三点要求,需要一套电子学设备来实现。如图 3 所示,将加速器高频时钟信号通过单模光纤引入到定制的定时信号接收器(EVR),再通过光电转换器得到同步加速器时钟的约 500 MHz 的正弦波信号;EVR 同时具有延时调节功能,最小调节步长 5 ps;使用梳状波发生器将 500 MHz 正弦波信号倍频,得到 1 GHz、1.5 GHz、2 GHz 等一系列频率信号,再用滤波器选择特定频率,放大功率后输入给 CPW。

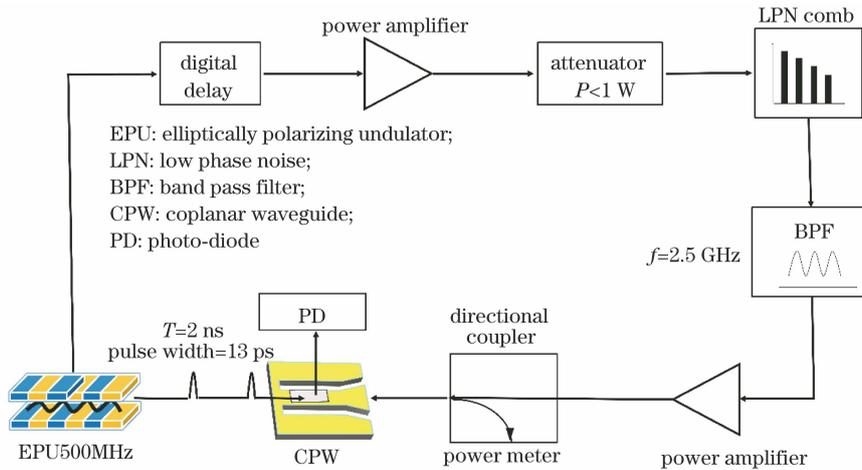


图 3 时间分辨电子学装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the time-resolved electronics device

自旋进动的锥角一般小于  $1^\circ$ <sup>[19]</sup>,为测量自旋磁矩进动振幅的变化,需要测量进动角沿光束方向投影的变化,这需要对磁矩取向特别敏感的测量方法。基于同步辐射的 X 射线磁圆二色原理,将入射的 X 射线能量固定为待测元素的吸收边,利用特征圆偏光对电子自旋向上和向下的吸收不同,当电子自旋围绕恒磁场  $H_B$  进动时,磁矩相对于 X 射线入射方向发生变化,X 射线吸收强度会随之发生改变,即测得了进动振幅随时间的变化曲线。

这种 TR-XFMR 方法,结合了铁磁共振和磁圆二色的原理,用同步加速器时钟的微波激发磁化的样品产生自旋进动,再用磁圆二色方法测量信号,通过改变微波和 X 射线脉冲之间的相位关系,得到进动过程中各时间点的信息。这种方法和单束团模式的时间分辨方法不同,其优势在于无需加速器改变通常的多束团运行模式,时间分辨能力理论上只受到单个光子束团时间长度的限制,不需要快速响应的探测器等。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 CPW 及样品制备

微波磁场由 CPW 提供, CPW 由中心导体、接地板和介质基板构成, 基本结构<sup>[20]</sup>如图 4 所示, 样品沉积在共面波导的中心导体上, 共面波导产生的面内连续微波使磁矩围绕等效磁场稳定进动。CPW 的基底为高阻硅, 导体为铜, 一端通过 Sub-Miniature A (SMA) 连接器与同轴电缆连接, 另一端与接地导体短接。SMA 连接器和同轴电缆的特征阻抗均为  $50 \Omega$ , 因此, 为实现阻抗匹配, 尽可能减小误差来源, CPW 按照特征阻抗为  $50 \Omega$  设计结构尺寸。使用 HFSS 程序建模并仿真优化<sup>[21]</sup>, 同时考虑到实验腔体内空间的限制, 共面波导的尺寸取为  $16 \text{ mm} \times 12.18 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。当给定功率为  $1 \text{ W}$  的微波激励时, 在 CPW 表面会产生一个垂直于中心导体的微波磁场  $H_{\text{rf}}$ , 磁场大小约为  $1 \text{ mT}$ 。如果实验空间允许, 亦可采用大尺寸的共面波导, 直接将样品置于中心导体的上方。这样样品制备的方法更加便捷。

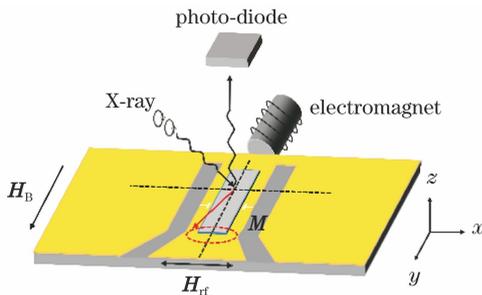


图 4 实验装置及进动原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental device and magnetization precession

恒磁场由直流线圈提供, 通过调节输入的电流来控制恒磁场的大小, 可调磁场大小为  $0 \sim 10 \text{ mT}$ 。如图 4 所示, 直流线圈沿 CPW 中心导体的方向放置, 提供沿  $y$  轴方向的恒磁场  $H_B$ , CPW 提供垂直于恒磁场方向沿  $x$  轴的微波磁场  $H_{\text{rf}}$ , X 射线沿着  $x-z$  平面入射, 与微波磁场的夹角约为  $45^\circ$ , 光电二极管 (PD) 放置于样品上方用来接收荧光信号。样品  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  用磁控溅射仪镀在共面波导的中心导体表面, 厚度为  $40 \text{ nm}$ 。

#### 3.2 FMR 测量

CPW 和样品制备完成后, 需用矢量网络分析仪 (VNA) 进行测试, 寻找产生铁磁共振时恒磁场大小和微波频率之间的对应关系。测试方法通常有两

种: 1) 固定微波频率改变恒磁场的大小, 这种方法称为扫场法; 2) 固定恒磁场的大小改变微波频率, 这种方法称为扫频法<sup>[22]</sup>。在本文中, 微波频率固定为  $2.5 \text{ GHz}$  (与 X 射线光电子束团的周期成整数倍), 所以采用扫场法。

测量时, VNA 向 CPW 输出功率为  $10 \text{ mW}$ 、频率为  $2.5 \text{ GHz}$  微波信号, 输入的微波信号被铁磁性薄膜吸收后再反输送回 VNA 中<sup>[23]</sup>。VNA 测量的回波损耗值  $S_{11}$ , 定义为传输线端口的反射波功率与入射波功率之比, 表示入射能量的一部分被反射回信号源, 可以反映出微波能量被铁磁性材料吸收的强弱。

$$S_{11} = 10 \log_{10} \left( \frac{p_r}{p_i} \right), \quad (1)$$

式中:  $p_r$  为反射功率;  $p_i$  为输入功率。VNA 输出的微波频率固定为  $2.5 \text{ GHz}$ , 改变恒磁场的大小, 得到 FMR 图, 如图 5 所示。在恒磁场为  $5 \text{ mT}$  时, 磁矩进动的频率和微波频率一致,  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  薄膜从微波磁场中吸收的能量达到最大, 发生了铁磁共振。

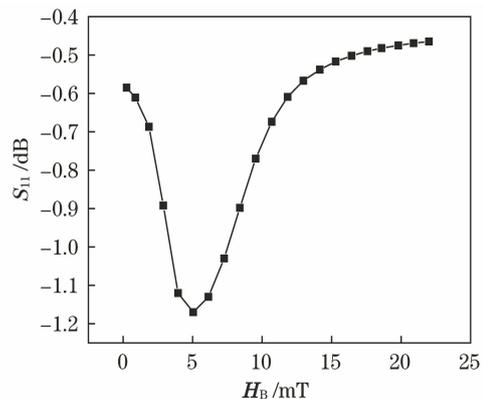


图 5  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  薄膜在  $2.5 \text{ GHz}$  的微波频率激励下的 FMR 谱

Fig. 5 FMR spectra of  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  film excited by  $2.5 \text{ GHz}$  microwave frequency

#### 3.3 自旋进动测量

在测量坡莫合金  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  薄膜中 Ni 元素的动态磁矩变化曲线之前, 先测量了 Ni 元素的 XMCD 谱。实验时, 用  $30 \text{ mT}$  的磁场将样品饱和和磁化, X 射线的能量选在 Ni 元素的 L 吸收边附近, 并将 X 射线分别调为左旋和右旋圆偏振态, 用全电子产额方法 (TEY) 测量 Ni 元素的近边吸收谱<sup>[24]</sup>。从图 6(a) 可以看到, 在 Ni 元素  $L_3$  和  $L_2$  吸收边附近, X 射线吸收强度有很大不同。图 6(b) 是两条吸收谱的差谱, 也就是通常所说的 XMCD 谱。实验结果显示,  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  薄膜具有明显的铁磁性材料的磁圆二色性。

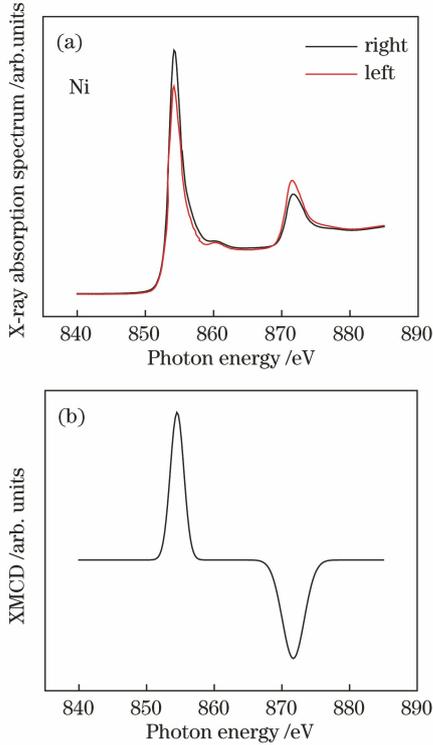


图 6 实验结果。(a) Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 中 Ni 元素的 L<sub>3</sub>、L<sub>2</sub> 吸收边附近的 X 射线吸收谱；(b) Ni 元素的 XMCD 谱  
Fig. 6 Experimental results. (a) X-ray absorption spectrum near the absorption edge of L<sub>3</sub> and L<sub>2</sub> of Ni element in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>; (b) XMCD spectrum of Ni

在 TR-XFMR 实验中, X 射线的能量固定在 Ni 元素的 L<sub>3</sub> 吸收边, 调为圆偏振光。通过如图 3 所示的一系列电子学设备, 给 CPW 输入与加速器高频时钟信号同步的、功率为 400 mW、频率为 2.5 GHz 的射频电流, 在 CPW 中心导体表面产生微波。微波触发磁性元素的电子围绕着恒磁场方向做拉莫尔进动, 自旋磁矩沿 X 射线方向的分量大小周期性变化, 相当于磁矩随着磁场发生翻转, X 射线的吸收强度也随之发生改变。基于第 2 节介绍的“phase shift”模式的“pump-probe”时间分辨实验原理, 每次测量时改变 pump 和 probe 之间的延时(本次实验中, 步长取 20 ps), 即不断改变相位差, 得到完整的进动过程曲线, 如图 7 所示。不同恒磁场下所测量的实验数据用实心点标出, 为了清楚起见, 数据沿垂直方向平移, 分开显示。从图中可以看出, 在 2.5 mT 磁场处, 振幅最大。其中, 实线是数据点的正弦拟合曲线。

图 7 表示在 2.5 GHz 微波激励下, Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 薄膜置于不同恒磁场(1.2~6.1 mT)中, 采集到的一系列 Ni 元素的 TR-XFMR 谱。图中每一个数据点

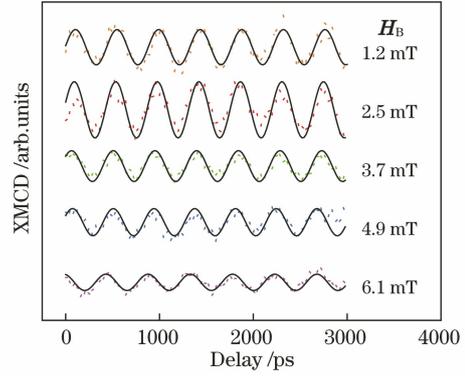


图 7 2.5 GHz 微波激励下, 不同恒磁场时 Ni 元素的自旋进动曲线

Fig. 7 At different constant magnetic fields, Ni magnetization precession by microwave absorption at 2.5 GHz

都是相应相移时间下测得的 Ni 元素 L<sub>3</sub> 吸收边的 X 射线吸收强度。在同一恒磁场下, 数据采集相移时间间隔为 20 ps, 每条进动曲线共采集 150 个数据点。正如磁化强度动力学理论 Landau-Liftshitz-Gilbert(LLG)方程<sup>[25-26]</sup>所描述的那样,

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{\text{eff}} + \alpha_G m \times \frac{dm}{dt}, \quad (2)$$

式中:  $m = M/M_s$  为单位磁化强度矢量;  $\gamma$  为磁旋比;  $\alpha_G$  为阻尼系数;  $H_{\text{eff}}$  为有效场(交换场、磁晶各向异性场、退磁场、恒磁场和微波磁场)。在微波磁场和恒磁场的共同作用下, 电子自旋磁矩围绕有效磁场不断进动, 磁矩沿 X 射线方向的分量大小周期涨落, 采集得到的 X 射线吸收强度点呈正弦曲线排列。恒磁场从零(图中未示出)逐步增大到 6.1 mT, 当磁场大小为 2.5 mT 时, Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 薄膜从微波信号中吸收的能量最大, 振幅明显增加, 达到铁磁共振。恒磁场越偏离共振场, 进动振幅越小。为了便于观察, 用正弦曲线对实验数据做了拟合。进动曲线的时间分辨能力达到 20 ps。

相比于用 VNA 测试铁磁共振时铁磁共振场为 5 mT, 受 VNA 的输出功率限制, 最大只能到 10 mW, 而 XFMR 实验中输出的微波功率为 400 mW, 微波磁场变大。根据 LLG 方程, 磁矩进动频率由有效场决定, 在保持进动频率一定的情况下, 微波功率越大, 微波磁场越大, 需要的恒磁场就越小。

## 4 结 论

利用同步辐射具有周期性时间结构的特点, 在上海光源发展了皮秒级的“pump-probe”时间分辨技术, 并在 BL08U 实验站搭建了时间分辨 X 射线

铁磁共振实验平台。通过自制的共面波导实现了电子自旋泵浦,通过全荧光产额法用圆偏振光测量到电子磁矩的变化,通过一系列电子设备实现了“pump”和“probe”之间的同步和延时。从实验数据可以看出,在恒磁场为 2.5 mT,微波频率为 2.5 GHz 时,自旋进动振幅最大,进动曲线的时间分辨能力达到 20 ps。TR-XFMR 实验平台具有元素分辨能力和时间分辨能力,能为自旋电子学的研究提供有力支持。

### 参 考 文 献

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(21): 2472-2475.
- [2] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange [J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1989, 39(7): 4828-4830.
- [3] Sun Q, Zu S, Ueno K, et al. Applications of ultrafast photoemission electron microscopy in nanophotonics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508001.  
孙泉, 祖帅, 上野贡生, 等. 超快光电子显微技术在纳米光子学中的应用[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508001.
- [4] Yang Y H, Liu L N, Chen D Y, et al. Detection method of fiber atomic spin precession based on circularly polarized probe light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0112001.  
杨远洪, 刘琳妮, 陈东营, 等. 基于圆偏振探测光的光纤原子自旋进动检测技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0112001.
- [5] Jin Z M, Song B J, Li J G, et al. Research progress of terahertz radiation based on ultrafast electron spin dynamics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508005.  
金钻明, 宋邦菊, 李炬赓, 等. 基于超快电子自旋动力学的太赫兹辐射研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508005.
- [6] Chen Z F, Zhang B Z, Chen D X, et al. Ultrafast magnetization precession in FePt film induced and probed by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(z1): s107001.  
陈志峰, 张冰志, 陈达鑫, 等. 飞秒激光诱导与探测 FePt 薄膜超快磁化进动的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(z1): s107001.
- [7] Bigot J Y, Vomir M. Ultrafast magnetization dynamics of nanostructures [J]. *Annalen Der Physik*, 2013, 525(1/2): 2-30.
- [8] Marcham M K, Shelford L R, Cavill S A, et al. Phase-resolved X-ray ferromagnetic resonance measurements of spin pumping in spin valve structures[J]. *Physical Review B*, 2013, 87(18): 180403.
- [9] Bailey W E, Cheng L, Keavney D J, et al. Precessional dynamics of elemental moments in a ferromagnetic alloy[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(17): 172403.
- [10] Li J, Shelford L R, Shafer P, et al. Direct detection of pure ac spin current by X-ray pump-probe measurements[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(7): 076602.
- [11] Xue C, Wang Y, Guo Z, et al. High-performance soft X-ray spectromicroscopy beamline at SSRF[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 103502.
- [12] Zhang L J, Xu Z J, Zhang X Z, et al. Latest advances in soft X-ray spectromicroscopy at SSRF [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, 26(4): 040101.
- [13] van der Laan G. Time-resolved X-ray detected ferromagnetic resonance of spin currents[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2017, 220: 137-146.
- [14] Marcham M K, Yu W, Keatley P S, et al. Influence of a Dy overlayer on the precessional dynamics of a ferromagnetic thin film[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(6): 103506.
- [15] Davis M E, Williams E W, Celestini A C. Finite-boundary corrections to the coplanar waveguide analysis (short papers) [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, 21(9): 594-596.
- [16] Baker A A, Figueroa A I, Collins-McIntyre L J, et al. Spin pumping in ferromagnet-topological insulator-ferromagnet heterostructures[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7907.
- [17] Warnicke P, Stavitski E, Lee J S, et al. Direct observation of symmetry-specific precession in a ferrimagnet[J]. *Physical Review B*, 2015, 92(10): 104402.
- [18] Sun R, Li Y, Xie Z K, et al. Determination of spin pumping effect in CoFeB/Ir bilayer[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 497: 165971.
- [19] Guan Y, Bailey W E, Vescovo E, et al. Phase and amplitude of element-specific moment precession in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic*

- Materials, 2007, 312(2): 374-378.
- [20] Kos A B, Silva T J, Kabos P. Pulsed inductive microwave magnetometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(10): 3563-3569.
- [21] Ge J Q, Xia T, Wang G A. Design and optimization methodology of coplanar waveguide test structures for dielectric characterization of thin films[J]. Journal of Electronic Testing, 2020, 36(2): 183-188.
- [22] Arena D A, Vescovo E, Kao C C, et al. Weakly coupled motion of individual layers in ferromagnetic resonance [J]. Physical Review B, 2006, 74 (6): 064409.
- [23] Pati S P. Study on the Gilbert damping of polycrystalline YIG films with different capping layers [J]. Current Applied Physics, 2020, 20(1): 167-171.
- [24] Liu H G, Cao J F, Wang Y, et al. Soft X-ray spectroscopic endstation at beamline 08U1A of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(4): 043103.
- [25] Gilbert T L. A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(6): 3443-3449.
- [26] Lakshmanan M, Nakamura K. Landau-Lifshitz equation of ferromagnetism: exact treatment of the Gilbert damping [J]. Physical Review Letters, 1984, 53(26): 2497-2499.