

文章编号:1671-4229(2024)03-0065-06

# Co<sub>2</sub>FeAl 合金薄膜在垂直外磁场下的超快自旋动力学

袁启弘, 周洁林, 黄汉山, 梁宇翔, 陈桂才, 陈志峰\*

(广州大学 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 文章通过使用时间分辨磁光克尔光谱技术研究了 Co<sub>2</sub>FeAl 赫斯勒合金薄膜在施加垂直外磁场下的激光诱导超快自旋动力学。实验结果表明,在严格垂直外磁场下同时激发出表面波模和驻波模两种自旋波模式,且均呈现出自旋波频率随磁场增大而减小的特殊现象。此外,通过衰减特性研究发现,驻波模的磁阻尼因子与外磁场并无明显依赖关系,而表面波模的磁阻尼随磁场增大而增大。通过分析表面波模的群速度讨论了该模式磁阻尼外场依赖特性的成因。实验揭示了钴基赫斯勒合金薄膜在严格垂直外磁场下的自旋波动力学性质,对于推进该类材料在新一代自旋电子器件中的应用具有积极意义。

**关键词:** 赫斯勒合金; 超快自旋动力学; 时间分辨; 自旋波模式

中图分类号: O433; O469 文献标志码: A

## Ultrafast spin dynamics in Co<sub>2</sub>FeAl alloy film under perpendicular external magnetic field

YUAN Qi-hong, ZHOU Jie-lin, HUANG Han-shan, LIANG Yu-xiang, CHEN Gui-cai, CHEN Zhi-feng\*

(School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** This study investigated the laser-induced ultrafast spin dynamics of Co<sub>2</sub>FeAl Heusler alloy film under a perpendicular external magnetic field by using the time-resolved magneto-optical Kerr spectroscopy technique. The experimental results indicate that two spin-wave modes, the surface wave mode and the standing wave mode, are excited simultaneously in the strictly perpendicular external magnetic field, and both modes exhibit the special phenomenon of decreasing spin-wave frequencies with increasing magnetic field strength. Furthermore, the analysis of the decay characteristics reveals that the magnetic damping factor of standing wave mode remains constant regardless of the external magnetic field. Conversely, the magnetic damping of surface wave mode increases as the external magnetic field strength increases. The group velocity of the surface wave mode was analyzed to determine the causes of the external field-dependent properties of the magnetic damping of this mode. Our experiment reveals the spin-wave dynamic characteristics of Co-based Heusler alloy film under the strictly perpendicular external magnetic field, which has positive significance for advancing the application of such materials in next-generation spintronic devices.

**Key words:** Heusler alloy films; ultrafast spin dynamics; time resolution; spin-wave modes

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-04-08

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2020A1515010411); 广东省高等教育教学改革资助项目(2019-N466); 广州市科技计划资助项目(2023A03J0125); 国家级大学生创新训练资助项目(202211078116)

作者简介: 袁启弘(1999—),男,硕士研究生. E-mail:2112119021@e.gzhu.edu.cn

\*通信作者. E-mail:chenzf@gzhu.edu.cn

引文格式: 袁启弘, 周洁林, 黄汉山, 等. Co<sub>2</sub>FeAl 合金薄膜在垂直外磁场下的超快自旋动力学[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(3): 65-70.

本文采用自旋波作为信息载体可以克服焦耳热的限制<sup>[1-2]</sup>,使得磁振子学成为活跃且重要的研究领域。同时,磁振子自旋电子器件也成为未来自旋电子技术的重要发展方向<sup>[3]</sup>。钴基赫斯勒合金由于其半金属特性<sup>[4-5]</sup>,具有高自旋极化率、高居里温度、低磁阻尼<sup>[6-8]</sup>的优点,被认为是新一代自旋电子器件的候选材料<sup>[9]</sup>。另外,近年的研究表明,在该类材料中易于激发出多种自旋波模式<sup>[10-12]</sup>,使其在磁振子学的研究中受到了更广泛的关注。为了推进该类材料的磁振子学应用,需要厘清其中自旋波的相干激发条件以及模式特性,因此,研究其超快自旋动力学具有重要意义。

飞秒时间分辨磁光克尔光谱技术是研究超快自旋动力学的有力工具,具有直观、灵敏、局域性以及高时间分辨率等优势<sup>[13-14]</sup>。近年来,采用该技术在钴基赫斯勒合金薄膜中已激发出多种自旋波模式,包括一致性进动模(Kittel)<sup>[15-16]</sup>、垂直驻波模(Perpendicular Standing Spin Wave, PSSW)<sup>[17-19]</sup>、静磁表面自旋波(Magnetostatic Surface Spin Wave, MSSW)也称之为 Damon-Eshbach (DE) 模<sup>[18-19]</sup>和后向静磁体自旋波(Backward Volume Magnetostatic Spin Wave, BVMSW)<sup>[11,17]</sup>。这些模式常常以不同的组合同时被激发,例如在不同厚度的  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  赫斯勒合金薄膜中可以同时激发 BVMSW 和 PSSW 模式,在不同组分的  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$ <sup>[18-19]</sup> 赫斯勒合金薄膜中可以同时激发 DE 和 PSSW 模式。以上工作中各种模式自旋波的色散关系具有共性,即自旋波频率均随磁场增大而增大。然而实验中为了得到较大的面内有效场分量,从而获得相对较高频率的自旋波,即使施加面外磁场的情况下,磁场方向也并非严格垂直于样品,因此,该磁场条件下的自旋波特性研究仍存在空白。

本文利用飞秒时间分辨磁光克尔光谱技术测量  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  合金薄膜在严格垂直外磁场下的激光诱导超快自旋动力学,观察到同时激发出 DE 模和 PSSW 模。发现两种自旋波模式都呈现随磁场增大而减小的特殊自旋波色散现象,并对其磁

阻尼因子进行分析,讨论磁阻尼场依赖特性的物理成因。

## 1 实验

实验所采用的样品为  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  合金薄膜,通过分子束外延技术,在  $160\text{ }^\circ\text{C}$  温度下生长在 GaAs (001) 衬底表面,样品厚度为  $30\text{ nm}$ 。为了防止样品发生氧化,采用厚度为  $2\text{ nm}$  的 Al 层在表面进行覆盖。

时间分辨磁光克尔光谱技术实验如图 1(a) 所示。线偏振飞秒脉冲激光由钛宝石激光放大器产生,中心波长为  $800\text{ nm}$ ,脉冲宽度约  $100\text{ fs}$ ,激光脉冲重复频率为  $1\text{ KHz}$ 。激光束通过偏振分光棱镜分成两束光,探测光的功率密度比泵浦光小 30 倍,目的是获得足够的信噪比。探测光经过由回射镜和步进电机构成的可控光学延迟线后,与泵浦光一同通过透镜聚焦于样品表面,聚焦后的探测光位于泵浦光中心,光斑直径约为泵浦光 ( $130\text{ }\mu\text{m}$ ) 的一半,以避免探测区域内产生热梯度效应。样品面反射的探测光,由于发生了极向克尔效应,偏振方向发生转变,偏转角则为克尔转角 ( $\theta$ ),其反应了样品的磁化信息。反射的探测光经过格兰棱镜(G-L)分成相互垂直的两束线偏振光后进入差分探测器进行光电转换,并通过锁相放大器对输出信号实现去噪与放大。实验中通过计算机可控电磁铁平台产生垂直外磁场,并利用霍尔探头监视磁场大小。所有测试均在室温下进行。

飞秒脉冲激光激发原理如图 1(b) 所示。样品在外磁场作用下处于磁化平衡态,磁化方向  $M$  和有效场  $H_{\text{eff}}$  平行。当飞秒脉冲激光激发后,产生超快退磁<sup>[20-21]</sup>,瞬态饱和磁化迅速减小以及瞬态磁各向异性受到调制,此时磁化平衡发生改变,从而有效场  $H_{\text{eff}}$  变化为  $H'_{\text{eff}}$ ,  $M$  将开始绕  $H'_{\text{eff}}$  进动。随后,由于热扩散作用<sup>[22]</sup>,饱和磁化与磁各向异性逐渐恢复,同时  $H'_{\text{eff}}$  也向  $H_{\text{eff}}$  恢复,在这过程中  $M$  仍会绕  $H'_{\text{eff}}$  进动,直至  $M$  与  $H_{\text{eff}}$  ( $H'_{\text{eff}}$ ) 平行<sup>[13]</sup>。

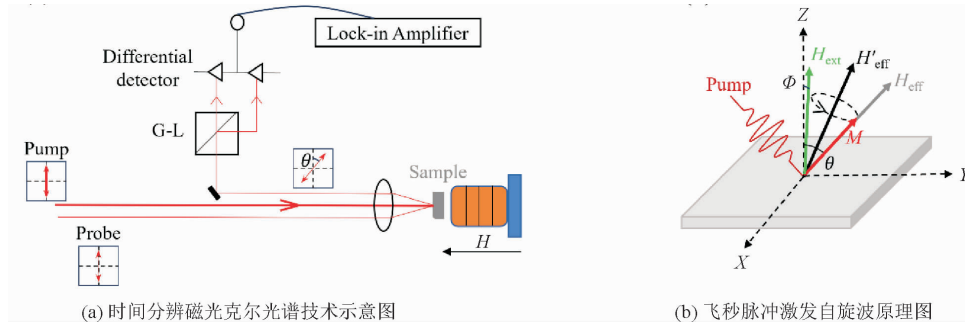


图1 实验技术与激发原理

Fig. 1 Experimental techniques and the excitation principle

## 2 结果分析及讨论

在给定功率密度为 12.4 mJ/cm<sup>2</sup> 下,测量了严格垂直磁场中不同磁场大小的超快自旋动力学。实验所得的时间分辨信号如图 2(a) 中散点所示,在泵浦光激发下导致超快退磁,使得磁化平衡被打破;随着热扩散作用,磁化恢复至平衡态,这一过程表现为明显的振荡恢复信号,对应于自旋进动。随着垂直磁场增大,产生的面外磁化分量也越大,在激光作用下退磁场受到更强的调制,使得磁化平衡偏转角增大,因此导致超快退磁与自旋进动幅度均增大。同时,自旋进动的周期与衰减速率也随磁场增大而增大,反映了激发的自旋波频率和寿命在减小。另外,图 2(b) 是对图 2(a) 中振荡分量进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的结果,发现具有两个频率峰,意味着两种自旋波模式被激发;且随着磁场的增大,频率峰均出现红移现象,这一点与时域信号上观察到自旋进动周期增大相呼应。为了实现对所激发的自旋波频率与寿命进行定量分析,采用双谐波衰减函数对振荡恢复部分进行拟合:

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 A_i \exp(-t/\tau_i) \sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

其中,  $A_i$ ,  $\tau_i$ ,  $f_i$ , 和  $\varphi_i$  分别是第  $i$  个自旋波的振幅、寿命、频率以及初始相位。

拟合结果如图 2(a) 中实线所示,与实验数据十分匹配,表明采用双谐波衰减函数拟合的合理性;同时,提取出的两种自旋波分别为图 3 中的低频模(黑色散点)和高频模(红色散点),且频率均随磁场增大而减小。然而这种外磁场依赖的频率趋势与之前包括 Co<sub>2</sub>FeAl<sup>[12]</sup>、Co<sub>2</sub>Fe<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Al<sup>[18]</sup> 在

内的多种赫斯勒合金薄膜材料在垂直磁场中所观察到的自旋波模式频率均随磁场增大而增大的结果相反。为了解释这一现象,需要对自旋波频率进行色散分析,以进行定量分析。

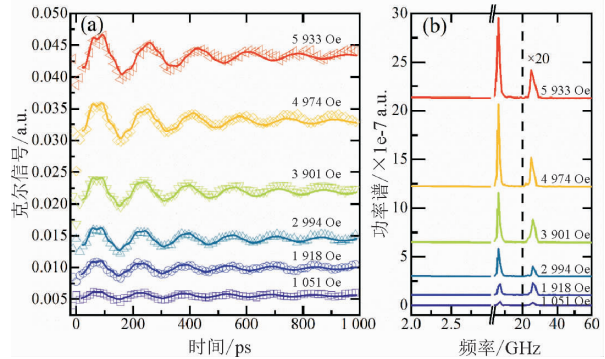


图2 超快自旋动力学及其频谱

Fig. 2 Ultrafast spin dynamics and its spectra

注:图(a)为不同外磁场强度下的时间分辨克尔信号,其中散点为实验所得信号,实线为拟合曲线;图(b)为时间分辨信号中振荡分量的FFT频谱。

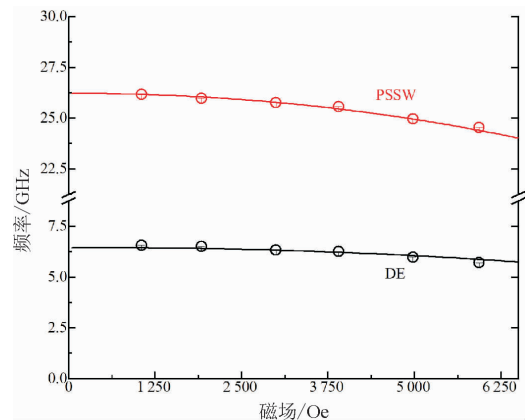


图3 外磁场依赖的自旋波频率与色散分析拟合

Fig. 3 Field-dependent spin wave frequency and the fittings of dispersion analysis

根据连续薄膜中的自旋波模式理论,一致性

进动模 Kittel 模色散方程为<sup>[23]</sup>

$$\omega_{\text{Kittel}}^2 = \omega_H(\omega_H + \omega_M \sin^2 \theta), \quad (2)$$

其中,  $\omega_H = \gamma H \sin \phi / \sin \theta$ ,  $\omega_M = 4\pi\gamma M_s$ ,  $\theta$  和  $\phi$  分别为磁化平衡和外磁场与样品法线夹角,  $\gamma$  是磁旋比,  $M_s$  是饱和磁化强度。

偶极子相互作用主导的传播模 DE 模色散方程为<sup>[23]</sup>

$$\omega_{\text{DE}}^2 = \omega_H^2 + \omega_H \omega_M \left[ 1 - \frac{\cos^2 \theta}{kd} (1 - e^{-kd}) \right] + \omega_M^2 \frac{\sin^2 \theta}{kd} (1 - e^{-kd}) \times \left[ 1 - \frac{1}{kd} (1 - e^{-kd}) \right], \quad (3)$$

其中,  $d$  为样品厚度,  $k$  为自旋波波矢, 且当  $k \rightarrow 0$  时, DE 模将会变为 Kittel 模。

交换相互作用主导的垂直驻波模 PSSW 模色散方程为<sup>[23]</sup>

$$\omega_{\text{PSSW}}^2 = (\omega_H + \omega_A n^2)(\omega_H + \omega_M \sin^2 \theta + \omega_A n^2), \quad (4)$$

其中,  $\omega_A = 2\gamma A_{\text{ex}} (\pi/d)^2 / M_s$ ,  $A_{\text{ex}}$  是交换常数,  $n$  为 PSSW 模式阶数, 且当  $n = 0$  时, PSSW 模将会变为 Kittel 模。

另外, 磁场角  $\phi$  是恒定的, 而磁化平衡取向角  $\theta$  则由最小自由能决定, 和外磁场关系为,

$$2H \sin(\theta - \phi) - 4\pi M_s \sin 2\theta = 0. \quad (5)$$

由于实验中同时激发了两种自旋波, 为此在色散分析时低频模和低频模的磁场角  $\phi$  以及饱和磁化强度  $M_s$  需保持相同。另外, 在施加垂直磁场情况下, 从公式(2)中可以看出, 当磁场  $H = 0$  时, Kittel 模的频率为 0, 而实验数据的变化趋势明显不具备该特征, 因此首先可以排除 Kittel 模。类似地, BVMSW 模也具有该特征因而可以排除。因此, 初步判断所激发的两种自旋波模分别是 DE 模和 PSSW 模。利用(3)~(5)式对频率数据进行联合拟合, 以保证两自旋波模式的  $\phi$  和  $M_s$  相同, 所获得的拟合结果如图 3 中的黑色和红色实线, 与实验结果不仅相重合, 而且趋势一致, 表明了拟合的合理性。拟合分析给出了明确的模式结果: 低频模为 DE 模, 高频模为 PSSW 模, 并获得  $\phi = 0.06^\circ$ ,  $M_s = 1.100 \text{ emu/cm}^3$ ,  $k = 2.0e^4/\text{cm}$ ,  $A_{\text{ex}} = 2.37 \text{ uerg/cm}$  ( $n = 1$ )。与之前  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ <sup>[12]</sup> 和  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$ <sup>[18]</sup> 赫斯勒合金薄膜中激发出的 DE 和 PSSW

组合对比,  $M_s$ ,  $k$  和  $A_{\text{ex}}$  数值大小都十分相近, 那么可以确定导致自旋波频率随磁场增大而减小的原因正是实验中极小的磁场角  $\phi$ , 即严格垂直磁场条件导致了这一特殊频率色散现象。

接下来对自旋波的寿命和阻尼因子进行研究, 从而揭示其衰减特性。如图 4(a) 所示, 通过公式(1)提取出自旋波模式的寿命, 可以发现 PSSW 模寿命基本不变, 而 DE 模寿命却随磁场的增大而减小。磁阻尼因子则需要通过寿命计算得出, DE 模和 PSSW 模的寿命和磁阻尼的关系分别为<sup>[24]</sup>

$$\frac{1}{\alpha_{\text{DE}}} = \tau_{\text{DE}} \cdot \gamma \left\{ \frac{H \sin \phi}{\sin \theta} + 2\pi M_s \left[ 1 - \frac{\cos^2 \theta}{kd} (1 - e^{-kd}) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\alpha_{\text{PSSW}}} = \tau_{\text{PSSW}} \cdot \gamma \left\{ \frac{H \sin \phi}{\sin \theta} + 2\pi M_s \sin^2 \theta + 2 \frac{A_{\text{ex}} (n\pi/d)^2}{M_s} \right\}. \quad (7)$$

计算所得外磁场依赖的磁阻尼因子如图 4(b) 所示。

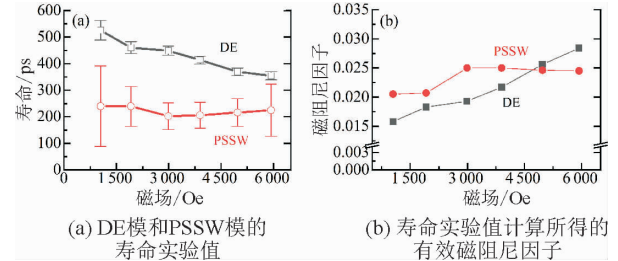


图 4 不同外磁场下的自旋波寿命与磁阻尼因子

Fig. 4 Spin-wave lifetimes and magnetic damping factors measured under different external magnetic fields

PSSW 模的磁阻尼因子在 0.02 ~ 0.025 区间取值, 并没有显示出明显的外磁场依赖特性, 而 DE 模的磁阻尼因子在 0.015 ~ 0.03 区间取值, 且随磁场的增大而单调递增, 呈现出明显的外磁场依赖特性。与此前  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ <sup>[12]</sup>、 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ <sup>[17]</sup> 以及  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$ <sup>[18]</sup> 赫斯勒合金薄膜光激发自旋波的报道结果相比较, 所观察到 PSSW 模磁阻尼的非场依赖特性是相同的。而 DE 模磁阻尼呈现的场依赖趋势则与之前  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ <sup>[12]</sup> 和  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$ <sup>[19]</sup> 赫斯勒合金薄膜所报道的非场依赖特性不同。对于 DE 模外磁场依赖的磁阻尼特性, 在  $\text{Ni}_{54.3}\text{Mn}_{31.9}\text{Sn}_{13.8}$  赫斯勒合金薄膜<sup>[25]</sup> 中也有所报

道,该研究发现在不同磁场角  $\phi$  下激发出的 DE 模磁阻尼因子均随磁场增大先减小再趋于稳定,且磁场角  $\phi$  越小,磁阻尼减小的速率越快,但仅仅将这种现象简单归因于实验上外磁场与样品面磁化轴趋于垂直,并没有对潜在的物理机制进行讨论,而且其最小磁场角为  $\phi = 5^\circ$ ,并未达到严格垂直外磁场的条件。此外,同为传播模的后向静磁体波模(BVMSW)在 Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub><sup>[11]</sup> 赫斯勒合金薄膜中被激发,磁阻尼同样表现出随磁场增大而增大的场依赖特性,并归因于其群速度的场依赖特性。为此考虑 DE 模的群速度<sup>[24]</sup>

$$v_{g-DE} = \frac{\omega_M^2 d}{4\omega_{DE} \cdot \exp(2kd)}, \quad (8)$$

可见,群速度  $v_{g-DE}$  与频率  $\omega_{DE}$  呈反比关系,而本实验中 DE 模式的频率随磁场的增大而减小(如图 3 黑色线及散点),则  $v_{g-DE}$  也随磁场增大而增大。因此,实验中观察到的 DE 模磁阻尼的场依赖特性,应同样归因于其群速度的外磁场依赖性质,即自旋波随外磁场增大的能流速度,使激发源区域的

能量损耗速度加快,从而表现出更大的阻尼特性。

### 3 总 结

在 Co<sub>2</sub>FeAl 赫斯勒合金薄膜上施加严格垂直外磁场,通过时间分辨磁光克尔光谱技术研究了激光诱导的超快自旋动力学。实验中所激发的多种自旋波模式均呈现出随外磁场增大而减小的异常频率色散现象。结合双谐波衰减函数拟合以及色散分析确定低频模为传播模 DE 模,高频模为驻波模 PSSW 模,并确定异常频率色散现象的成因是实验中所施加的严格垂直外磁场。此外,衰减特性研究表明,PSSW 模的磁阻尼因子与外磁场无明显依赖关系,而 DE 模磁阻尼因子的外磁场依赖特性起源于模式自身群速度的外磁场依赖性质。本研究结果不仅填补了钴基赫斯勒合金薄膜在严格垂直外磁场下的研究空白,而且有利于推进该系列材料在新一代自旋电子器件中的应用。

#### 参考文献:

- [1] Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S, et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator[J]. *Nature*, 2010, 464(7286): 262-266.
- [2] Markov I L. Limits on fundamental limits to computation[J]. *Nature*, 2014, 512(7513): 147-154.
- [3] Chumak A V, Vasyuchka V I, Serga A A, et al. Magnon spintronics[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(6): 453-451.
- [4] Felser C, Wollmann L, Chadov S, et al. Basics and prospective of magnetic Heusler compounds[J]. *APL Materials*, 2015, 3(4): 041518.
- [5] Longchar L A, Rahaman M, Hazra B K, et al. Effect of film thickness on the electrical transport in Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub> thin films[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(2): 025106.
- [6] Liu Y, Shelford L R, Kruglyak V V, et al. Optically induced magnetization dynamics and variation of damping parameter in epitaxial Co<sub>2</sub>MnSi Heusler alloy films[J]. *Physical Review B*, 2010, 81(9): 094402.
- [7] Loong L M, Kwon J H, Deorani P, et al. Investigation of the temperature-dependence of ferromagnetic resonance and spin waves in Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 232409.
- [8] Iihama S, Mizukami S, Naganuma H, et al. Gilbert damping constants of Ta/CoFeB/MgO(Ta) thin films measured by optical detection of precessional magnetization dynamics[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(17): 177416.
- [9] Bernevig B A, Felser C, Beidenkopf H. Progress and prospects in magnetic topological materials[J]. *Nature*, 2022, 603(7899): 41-51.
- [10] Gaier O, Hamrle J, Trudel J, et al. Brillouin light scattering study of Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>Al and Co<sub>2</sub>FeAl Heusler compounds[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(8): 084004.
- [11] Chen Z, Yan Y, Li S F, et al. Simultaneous laser excitation of backward volume and perpendicular standing spin waves in full-Heusler Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub> films[J]. *Scientific Report*, 2017, 7: 42513.
- [12] Li S F, Cheng C Y, Meng K K, et al. Excitation fluence dependence of spin-wave dynamics and intrinsic Gilbert damping in epitaxial Co<sub>2</sub>FeAl film[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(4): 040903.

- [13] Van Kampen M, Jozsa C, Kohlhepp J T, et al. All-optical probe of coherent spin waves[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(22): 227201.
- [14] Liu H, Ciuciulkaite A, Kapaklis V, et al. Enhanced optical mode coherence in exchange coupled soft magnetic multilayers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(21): 213902.
- [15] Li S F, Cheng, C Y, Meng K K, et al. The unique magnetic damping enhancement in epitaxial  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$  films[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(9): 097502.
- [16] Sasaki Y, Kasai S, Takahashi Y K. Large enhancement of magnetic damping in half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Heusler alloy thin films with heavy metal Pt layer observed by the all-optical method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, 62(SB): 1003.
- [17] Chen Z F, Xie Z K, Li S F, et al. Field and fluence dependences of laser-induced multiple spin-wave dynamics in  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  films[J]. *Journal Applied Physics*, 2020, 127(23): 233903.
- [18] Cheng C Y, Meng K K, Li S F, et al. Femtosecond laser excitation of multiple spin waves and composition dependence of Gilbert damping in full-Heusler  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$  films[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(23): 232406.
- [19] Li S F, Meng K K, Cheng C Y, et al. Magnetic anisotropy manipulation of the femtosecond laser-excited spin wave modes in full-Heusler  $\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Al}$  films[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, 30(48): 485802.
- [20] Beaurepaire E, Merle J C, Daunois A, et al. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic Nickel[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(22): 4250-4253.
- [21] Koopmans B, Malinowski G, Dalla L F, et al. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 259-265.
- [22] Xie Z, Cai Y, Tang M, et al. Fluence and temperature dependences of laser-induced ultrafast demagnetization and recovery dynamics in  $\text{Li}_0\text{-FePt}$  thin film[J]. *Materials*, 2023, 16(14): 5086.
- [23] Kalinikos B A, Slavin A N. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions[J]. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1986, 19(35): 7013.
- [24] Stancil D D, Prabhakar A. Spin waves: Theory and applications[M]. New York: Springer, 2009.
- [25] Bonda A, Uba S, Uba L, et al. Influence of magnetic field orientation on laser-induced magnetization precession in Ni-Mn-Sn Heusler alloy film[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 504: 166686.

【责任编辑：陈 钢】