

# 重金属Pt掺杂Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>薄膜体系自旋轨道耦合效应的铁磁共振研究

雷明月<sup>1,2</sup>, 刘文文<sup>1,2</sup>, 马子骐<sup>1,2</sup>, 吴欢<sup>1,2</sup>, 刘二<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学MIIT先进金属和金属间化合物材料技术工信部重点实验室, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘要

坡莫合金(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)具有高磁导率、高饱和磁化强度, 低矫顽力等优异的软磁性能, 广泛应用于电力电子、精密测量与传感以及自旋电子器件等领域。本文利用磁控溅射技术, 制备了Pt掺杂的Pt<sub>x</sub>-(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>1-x</sub>薄膜样品, 借助X射线衍射仪、振动样品磁强计(VSM)和铁磁共振仪(FMR)系统研究了Pt掺杂对坡莫合金薄膜样品晶体结构、静态及动态磁学性能的影响规律。研究发现Pt元素掺杂降低了坡莫合金薄膜的饱和磁化强度 $M_s$ 的同时有效增强了坡莫合金薄膜的垂直磁各向异性场 $H_k^{\perp}$ 和Gilbert阻尼 $\alpha$ , 尤其是 $\alpha$ 从零掺杂时的0.0079增至13.4%掺杂时的0.015, 增幅达83.97%。研究结果表明, Pt元素的引入显著增强了坡莫合金薄膜的自旋轨道耦合效应, 有望推动其在磁传感器及自旋电子器件领域的应用。

## 关键词

坡莫合金薄膜, 自旋轨道耦合效应, 重金属Pt掺杂, Gilbert阻尼

## Ferromagnetic Resonance Studies on Spin-Orbit Coupling Effects in Heavy Metal Pt-Doped Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> Thin Films

Mingyue Lei<sup>1,2</sup>, Wenwen Liu<sup>1,2</sup>, Ziqi Ma<sup>1,2</sup>, Huan Wu<sup>1,2</sup>, Er liu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>MIIT Key Laboratory of Advanced Metallic and Intermetallic Materials Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 13, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 雷明月, 刘文文, 马子骐, 吴欢, 刘二. 重金属 Pt 掺杂 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 薄膜体系自旋轨道耦合效应的铁磁共振研究[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 118-126. DOI: 10.12677/ms.2026.164079

## Abstract

Permalloy ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) exhibits excellent soft magnetic properties, including high permeability, high saturation magnetization, and low coercivity, making it widely applied in fields such as power electronics, precision measurement and sensing, and spintronic devices. In this work, Pt-doped  $\text{Pt}_x(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  thin films were fabricated using magnetron sputtering technique. The effects of Pt doping concentrations on the crystal structure, static and dynamic magnetic properties of the Permalloy films were systematically investigated using X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), and ferromagnetic resonance (FMR) techniques. It was found that the introduction of Pt reduces the saturation magnetization  $M_s$  of the Permalloy films while effectively enhancing the perpendicular magnetic anisotropy field  $H_k^\perp$  and the Gilbert damping constant  $\alpha$ . Notably,  $\alpha$  increases significantly from 0.0079 in the undoped sample to 0.015 at a doping concentration of 13.4%, corresponding to an increase of 83.97%. The demonstrated results indicate that the incorporation of Pt significantly enhances the spin-orbit coupling effect in Permalloy films, which holds promise for advancing their applications in magnetic sensors and spintronic devices.

## Keywords

Permalloy Thin Films, Spin-Orbit Coupling, Pt Doping, Gilbert Damping

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着强自旋轨道耦合材料中自旋流相关效应的发现,自旋轨道耦合相互作用成为自旋电子学领域的研究重点[1]-[3]。自旋轨道耦合(SOC)描述了电子自旋和轨道自由度之间的相互作用,可被视为电子自旋在静止参考系中经历的有效磁场。由于SOC连接着电子自旋及其轨道,因此在凝聚态物质中,SOC对晶格和能带结构非常敏感,从而在丰富的现象中发挥着基础性作用,从磁各向异性[4]、反常霍尔效应(AHE)[5]、各向异性磁阻(AMR)[6],到在重金属中发现的自旋霍尔效应[7][8],拓扑绝缘体[9]等。上述许多现象对磁传感器和磁存储领域的若干技术革命至关重要。因此,实现磁性材料中SOC的有效操纵则是当前自旋电子学研究亟需解决的关键科学问题。

传统坡莫合金因其卓越的软磁特性和高自旋极化率,成为构建自旋电子器件的关键铁磁材料。然而,其固有的自旋轨道耦合强度较弱,限制了其在新一代基于自旋轨道矩效应的功能器件中的直接应用。近年来,通过金属掺杂工程在坡莫合金体系中引入和调控自旋轨道耦合效应,已发展成为一个极具活力的前沿研究方向。这一策略不仅赋予了经典材料全新的物理内涵,更为实现高性能、低功耗的自旋轨道器件开辟了有效途径。

由于SOC受原子核的强烈影响,因此自旋轨道耦合效应的引入与调控,主要依赖于在坡莫合金体系中加入具有大原子序数的重金属元素。通过构造Py/重金属异质结利用界面效应来诱导自旋轨道耦合作用是其中一种手段,例如NiFe/Pt[10]、NiFe/Ta[11]、NiFe/W[12]等体系。在这些结构中,坡莫合金层中的自旋流或磁化感受到的扭矩主要来源于两个界面效应:一是重金属层因强自旋霍尔效应产生的垂直自旋流注入;二是界面处Rashba效应,已成为当前产生自旋轨道力矩、驱动磁化翻转的主流物理机制。增强铁磁体SOC效应的另一种方法是将重金属元素作为掺杂剂均匀融入NiFe晶格,从而从整体上修饰薄膜

块体的电子结构与自旋相关散射过程。Py 的 3 d、4 d 和 5 d 过渡金属掺杂对吉尔伯特阻尼的影响已经被系统地研究了, 这与 Hund 规则有关[7][8]。Rantschler 等人研究了 21 种过渡金属元素掺杂对坡莫合金磁阻尼的影响, 发现以 Ta、W、Au 为代表的 5 d 重元素的掺杂导致了更大的阻尼增长趋势, 表明自旋轨道耦合效应起到了重要作用[13]。传统的掺杂策略(如引入 Mo、Cr、Ta 等元素)虽能有效提升电阻率, 但往往以牺牲饱和磁化强度或引入不利的界面散射为代价, 且对调控自旋动力学的作用有限[14]。近年来, 铂(Pt)作为一种兼具高电阻率与强自旋轨道耦合的重金属元素, 为坡莫合金薄膜的性能突破提供了全新的解决方案。早期部分研究多集中于界面效应, 且对于薄膜磁性性能变化的相关表述较少, 或未能将性能变化与 SOC 机制直接关联。本文利用磁控溅射技术, 生长了不同 Pt 掺杂含量的 Py 薄膜, 基于 X 射线衍射(XRD)测量以及能量色散 X 射线光谱(EDS)扫描定性定量分析了 Pt 的掺杂含量。通过振动样品磁强计(VSM)测量了薄膜的静态磁性能, 发现 Py 薄膜在 Pt 掺杂含量超过 10% 的情况下仍能保持良好的软磁性能。利用基于共面波导的铁磁共振仪(FMR)提取了不同 Pt 掺杂含量下 Py 薄膜的垂直磁各向异性场及吉尔伯特阻尼  $\alpha$ , 在此基础上分析了 Py 薄膜 SOC 随 Pt 掺杂含量的变化规律。

## 2. 实验

本论文采用射频溅射的方法制备 Pt 掺杂的  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜样品, 设备使用沈阳科友生产的 MS500 型超高真空多功能磁控溅射系统。其中, Pt 长颗粒均匀等分后挤压为直径 0.5 cm 的若干规则圆片, Pt 成分通过放置在  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  合金靶上的 Pt 颗粒圆片数量来控制, Pt 圆片对称放置在合金靶的溅射圆环区域, 以保证溅射沉积得到的合金薄膜样品中各处的 Pt 掺杂较为均匀, 如图 1 所示。

溅射过程中在不同功率气压下, 可以通过控制时间长短得到不同厚度的金属薄膜, 溅射镀率使用台阶仪测得。样品衬底使用  $\text{Si}(\text{SiO}_2)$ , 生长的 Py 合金层厚度为 50 nm, 加盖 2 nm Al 覆盖层防氧化, 样品尺寸均在  $1 \text{ cm}^2$  左右。实验前通过预溅射靶材 20 分钟, 消除靶材表面可能存在的氧化层, 保证薄膜样品质量。实验的背景真空为  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ , 采用纯度为 99.99% 的氩气作为工作气体, 氩气流量为 15.8 SCCM。合金层薄膜溅射气压为 0.3 Pa, 溅射功率为 80 W; Al 薄膜的溅射气压为 0.4 Pa, 溅射功率为 50 W。

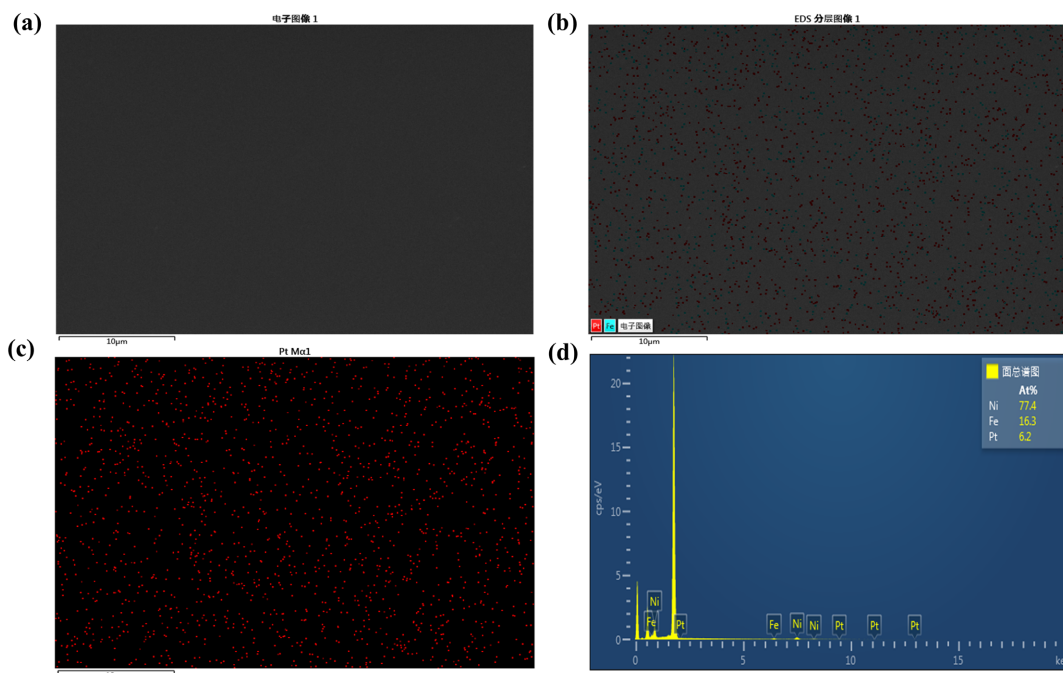


**Figure 1.** Schematic diagram of the symmetrical placement of the sputtering ring area of the Pt disc on the  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  alloy target  
**图 1.** Pt 圆片在  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  合金靶上溅射圆环区域对称摆放的示意图

对溅射得到的  $\text{Si}(\text{SiO}_2)/\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}/\text{Al}$  薄膜样品进行系统的结构及磁性能表征。首先对样品进行结构成分表征, 使用能量色散 X 射线光谱(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)检测元素分布百分比及成分均匀性, 利用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Bruker D8 Discover)确定样品的晶体结构及组成变化。利用振动样品磁强计(Vibrating Sample Magnetometer, VSM, Lake Shore 7404-S) [13]测试样品的静态磁性能。同时, 使用基于共面波导的铁磁共振仪(Ferromagnetic resonance, FMR, NanOsc PhaseFMR) [15]表征薄膜样品频率与共振场的依赖关系, 得到样品中磁化动力学过程的吉尔伯特阻尼等磁性参数, 测量时磁

场平行于薄膜平面且垂直于微波磁场。

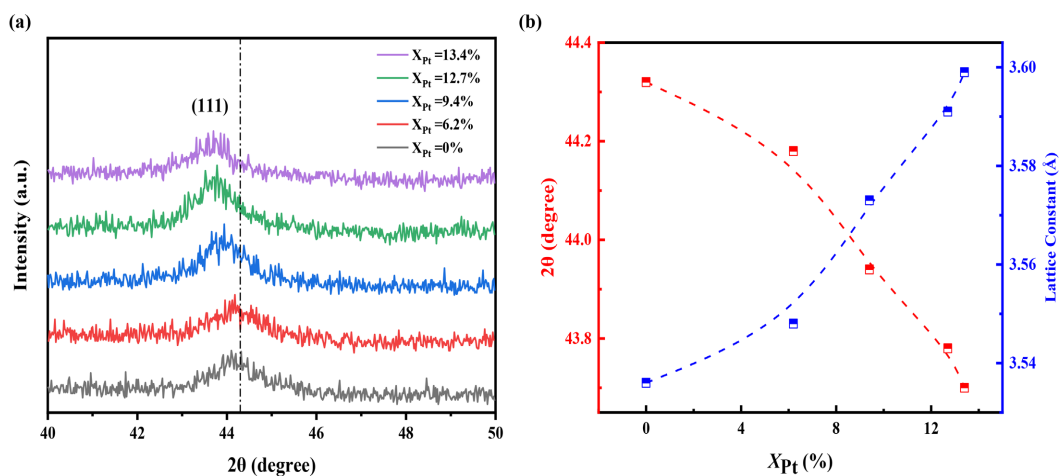
### 3. 结果与讨论



**Figure 2.** (a) Surface morphology, (b) EDS layered image, (c) Pt elemental distribution map, and (d) overall EDS spectrum of the  $\text{Pt}_{6.2}\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{93.8}$  thin film sample

**图 2.**  $\text{Pt}_{6.2}\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{93.8}$  薄膜样品的(a) 表面形貌, (b) EDS 分层图像, (c) Pt 元素分布图, (d) 面总谱图

通过扫描电子显微镜的能谱仪(EDS)测量了系列薄膜样品中 Pt 元素的含量, 掺杂量分别为 0, 6.2%, 9.4%, 12.7%, 13.4%。如图 2 为 6.2% Pt 掺杂样品的 EDS 图像, 可以看出样品表面光滑且元素掺杂较为均匀。



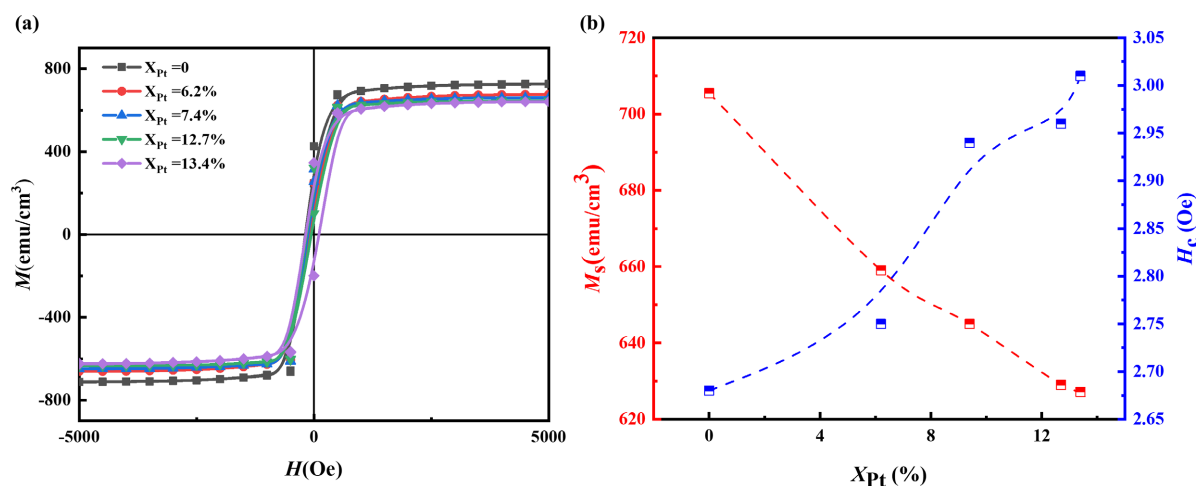
**Figure 3.** (a) X-ray diffraction patterns of the Py thin films with different doping contents, (b) the dependences of lattice constant and doping content of the Py thin films on the diffraction angles

**图 3.** (a) 不同掺杂含量下  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜样品的 X 射线衍射图像, (b) 衍射角和晶格常数与掺杂含量的依赖关系

利用 X 射线衍射仪(XRD)对溅射得到的薄膜系列样品进行结构表征。如图 3(a)所示, 系列薄膜均呈现  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  面心立方的典型(111)择优取向, 表明薄膜保持了良好的结晶性。且随 Pt 含量的掺入, (111)衍射主峰系统性地向低衍射角偏移, 这种偏移表明, 大半径的 Pt 原子成功占据了 Py 薄膜晶格位置, 引起了晶格畸变和晶格常数的增大。如图 3(b), 根据布拉格方程[16]计算得到的晶格常数值的变化也证实了这一点:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

其中,  $d$  为晶面间距,  $n$  为衍射级数(通常取 1),  $\lambda$  为 X 射线波长, 本实验采用的 Cu 靶 X 射线波长为  $1.5406 \text{ \AA}$ 。



**Figure 4.**  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  film samples with different doping contents: (a) hysteresis circuit, (b) dependence of saturated magnetization on the doping contents

**图 4.** 不同掺杂含量下  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜样品: (a) 磁滞回线, (b) 饱和磁化强度与掺杂含量的依赖关系

通过振动样品磁强计(VSM)在薄膜样品面内施加磁场测得不同掺杂含量下  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜的磁滞回线, 如图 4 所示。随着掺杂含量增加, 矫顽力从未掺杂时的  $2.68 \text{ Oe}$  增大到  $\text{Pt} = 13.4\%$  的  $3.6 \text{ Oe}$ , 结合图 3 XRD 衍射峰左移, 表明 Pt 的掺杂可能诱导了磁各向异性的增强。同时, 磁滞回线方形度基本不变, 但  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  膜的饱和磁化强度随掺杂含量的增加线性减小, 如图 4(b)所示, 从纯  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  的  $705 \text{ emu/cm}^3$  减小到最大掺杂含量  $\text{Pt} = 13.4\%$  的  $627 \text{ emu/cm}^3$ 。矫顽力和饱和磁化强度的变化表明掺杂后的 Py 样品依然保持良好的软磁特性。

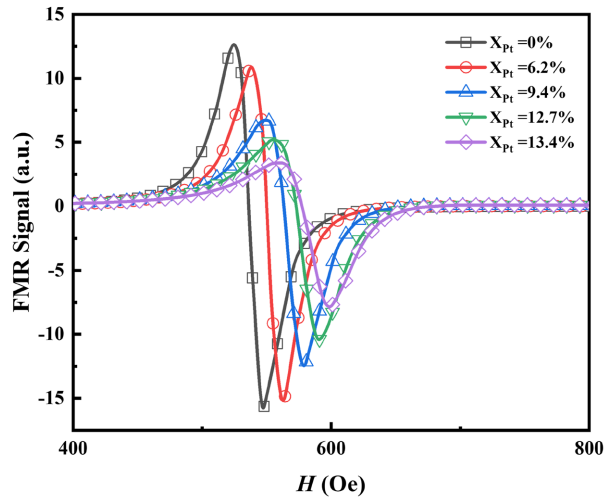
图 5 显示了不同 Pt 掺杂含量的薄膜样品在  $8 \text{ GHz}$  频率下的 FMR 图谱, 可以明显看出, 随着掺杂含量的不断增加, 薄膜的共振场持续向高场方向移动, 同时薄膜的共振线宽  $\Delta H$  显著增加, 图 6(c)、图 6(d) 也清晰展现了这一点。一般在 FMR 对材料的研究当中, 共振场的移动通常表明磁性薄膜的各向异性发生了变化。为研究这一偏移行为, 本实验对样品从  $5\sim 17 \text{ GHz}$  进行了变频铁磁共振测量, 如图 5 所示。

图 6(a)是 FMR 所测得的不同掺杂含量下  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜铁磁共振峰半高宽  $\Delta H$  与频率  $f$  之间的依赖关系, 图中数据点为实际测量得到的线宽值, 实线为拟合线。通过拟合, 可进一步得到薄膜样品的 Gilbert 阻尼  $\alpha$ , 拟合公式为: [17]

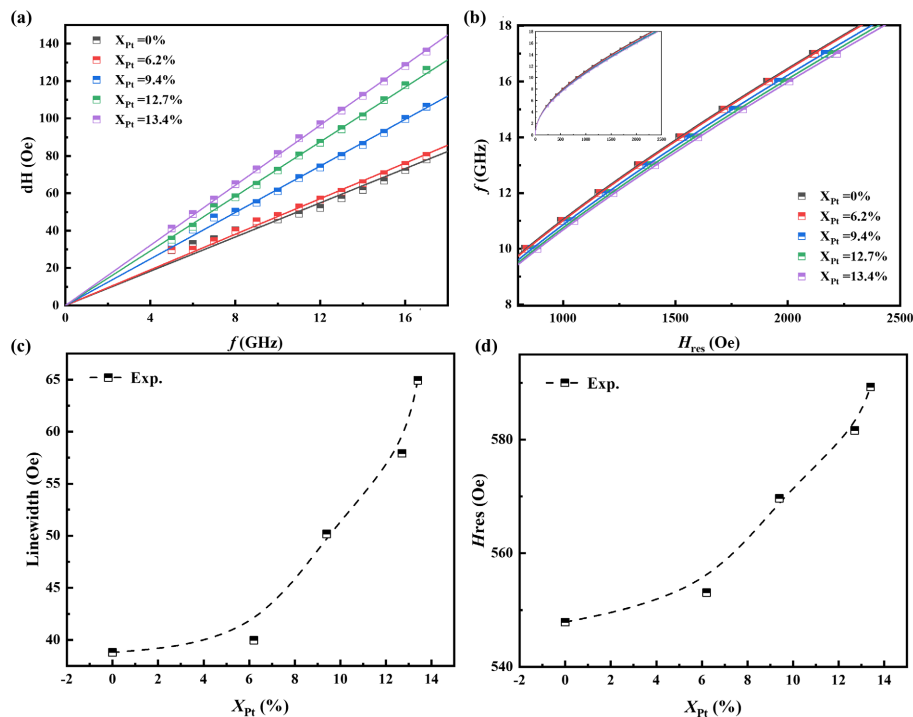
$$\Delta H = \Delta H_0 + \frac{4\pi\alpha}{\gamma} f \quad (2)$$

其中,  $\Delta H_0$  为非均匀展宽。从拟合曲线可以看出, 薄膜样品的线宽  $\Delta H$  与频率  $f$  之间满足良好的线性关

系, 表明此处计算得到的阻尼主要来源为本征的 Gilbert 阻尼。同时, 由于双磁子散射引起的非线性关系一般处于高频范围, 而本实验中薄膜样品在 8~17 GHz 的高场下, 数据点与拟合曲线之间仍保证了良好的线性关系, 如图 6(a)所示, 因此上式中的阻尼项可忽略双磁子散射的贡献[18]。



**Figure 5.** FMR maps of  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  films with different doping contents at 8 GHz  
**图 5.** 在 8 GHz 下不同掺杂含量的  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜的 FMR 图谱



**Figure 6.**  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  film samples with different doping contents: (a) Correlation between frequency  $f$  of line width  $\Delta H$ , (b) The dependences of resonance fields  $H_{\text{res}}$  on the microwave frequencies for the  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  thin films, (c) Dependence of line width on the Pt doping contents at 8 GHz, and (d) Dependence of Pt doping content on the resonance fields at 8 GHz  
**图 6.** 不同掺杂含量的  $\text{Pt}_x\text{-(Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{1-x}$  薄膜样品: (a) 线宽  $\Delta H$  的频率  $f$  的相关性, (b) FMR 信号中频率  $f$  与  $H_{\text{res}}$  的函数关系, (c) 在 8 GHz 下线宽与 Pt 掺杂含量的依赖关系, (d) 在 8 GHz 下 Pt 掺杂含量与共振场位置的依赖关系

图 6(b)通过变频扫场得到了薄膜系列样品共振频率  $f$  与共振场  $H_{\text{res}}$  之间的依赖关系,并用 Kittle 公式进行了很好的拟合:

$$f = (\gamma/2\pi) \left[ H_{\text{res}} (H_{\text{res}} + 4\pi M_{\text{eff}}) \right]^{1/2} \quad (3)$$

其中  $\gamma$  旋磁比,  $M_{\text{eff}} = M_s - H_k^\perp$  是有效磁化强度,  $M_s$  和  $H_k^\perp$  分别是薄膜的饱和磁化强度和垂直磁阻尼各向异性场。

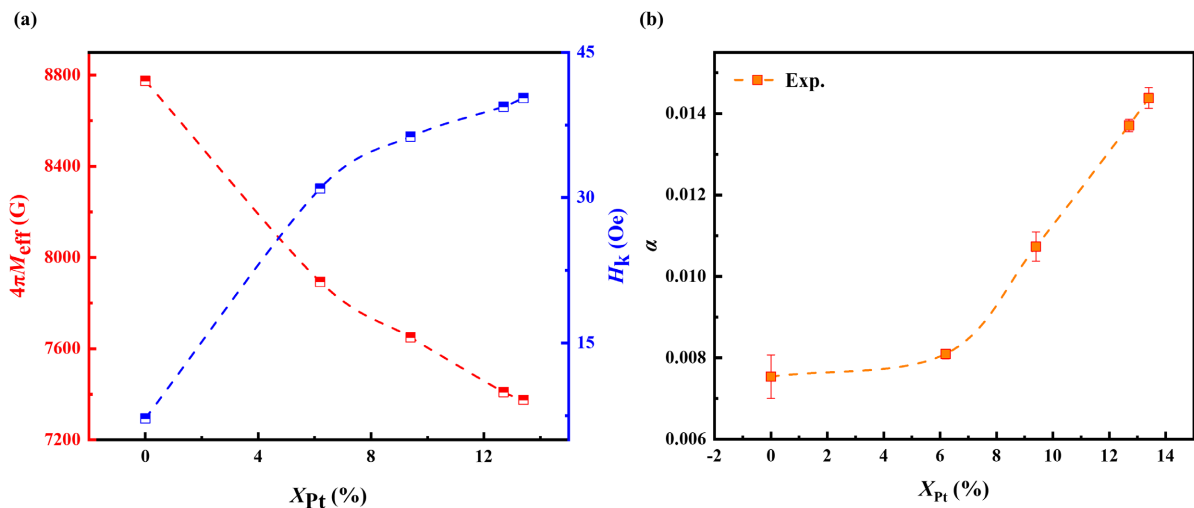
进一步地通过 VSM 数据中计算出的饱和磁化强度  $M_s$  从上两式拟合中提取薄膜样品的有效磁化强度和垂直磁各向异性场,列表 1。

**Table 1.** Magnetic parameters of Pt<sub>x</sub>-(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>1-x</sub> thin film samples under different doping contents

**表 1.** 不同掺杂含量下 Pt<sub>x</sub>-(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>1-x</sub> 薄膜样品的相关磁学参数

Pt 掺杂量(%)	0	6.2%	9.4%	12.7%	13.4%
$H_k^\perp$ (Oe)	7.2	31.0	36.3	39.4	40.3
$4\pi M_{\text{eff}}$ (G)	8775	7893	7649	7409	7375
$\Delta H_0$ (Oe)	8.244	5.198	3.332	2.307	1.825

如图 7 所示,根据公式拟合得到的有效磁化强度  $4\pi M_{\text{eff}}$  随着 Pt 掺杂含量的增加逐渐减小,从纯 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 薄膜对应的 8775 G 减小到 13.4% Pt 掺杂薄膜对应的 7375 G,减小幅度约为 15.95%。同时,  $4\pi M_{\text{eff}}$  的减小导致了薄膜共振场的偏移以及垂直各向异性场  $H_k^\perp$  随掺杂含量的增加而增大,从纯 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 薄膜对应的 7.2 Oe 增大到最大掺杂含量 13.4%对应的 40.3 Oe。



**Figure 7.** Pt<sub>x</sub>-(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>1-x</sub> film samples with different doping contents: (a) the dependence of the fitted  $4\pi M_{\text{eff}}$  and  $H_k^\perp$  values on the doping concentrations (b) the functional relationship between Gilbert damping extracted from FMR measurements and the doping contents

**图 7.** 不同掺杂含量的 Pt<sub>x</sub>-(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>1-x</sub> 薄膜: (a) 拟合公式提取的  $4\pi M_{\text{eff}}$ 、 $H_k^\perp$  值和掺杂含量的函数关系, (b) FMR 提取的 Gilbert 阻尼与掺杂含量的函数关系

通过 FMR 进一步对薄膜样品的磁阻尼因子进行表征,如图 7(b)显示了 Gilbert 阻尼与掺杂含量之间的函数关系。未掺杂 Pt 的纯 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 薄膜所对应的 Gilbert 阻尼约为 0.0079,随着掺杂含量的增加,最大

掺杂含量达到 13.4% 时薄膜阻尼显著增加到约 0.015, 相比未掺杂时增加了约 83.97%。由于垂直各向异性场  $H_k^\perp$  和 Gilbert 阻尼  $\alpha$  都与自旋轨道耦合强度密切相关, 因此观察到的  $H_k^\perp$  随掺杂含量的增加而增加表明  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  薄膜中自旋轨道耦合相互作用的增强。

进一步参考 Yin [18] 在 Au 和 Ag 掺杂  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  合金薄膜文章中的阻尼变化: 未掺杂时 Py 薄膜阻尼为 0.0078, 掺杂 15% Au 时阻尼增大到 0.0124, 增加了约 59.0%; 掺杂 15% Ag 时阻尼增大到 0.0091, 增加了约 16.67%。对比本文中掺杂 13.4% Pt 时阻尼增加率就达到了 83.97%, 远大于 Au、Ag 元素掺杂, 表明了 Pt 元素掺杂对坡莫合金薄膜体系的自旋轨道耦合效应调控的显著效果。

#### 4. 结论

本文利用磁控溅射技术, 系统地研究了 Pt 掺杂对 Py 薄膜体系的 SOC 影响, 合金体系在 Pt 浓度超过 10% 的情况下仍保持良好的铁磁性能。利用铁磁共振和振动样品磁强计等技术分析研究了 Pt 掺杂对薄膜样品静态磁学性能以及磁化动力学变化, 从而具体分析了 Pt 掺杂对 Py 薄膜的自旋轨道耦合效应的影响。

利用 XRD 技术分析得到, 随 Pt 含量的掺入(111)衍射主峰系统性地向低衍射角偏移, 这种偏移表明, 大半径的 Pt 原子成功占据了晶格位置, 引起了晶格畸变和晶格常数的增大。利用 VSM 和 FMR 得到了薄膜样品的一系列饱和磁化强度、磁各向异性以及 Gilbert 阻尼的变化: 垂直各向异性场  $H_k^\perp$  随掺杂含量的增加而增大, 从纯  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  薄膜对应的 7.2 Oe 增加到最大掺杂含量 13.4% 对应的 40.3 Oe。同时, Gilbert 阻尼  $\alpha$  从未掺杂时的 0.0079, 显著增加到最大掺杂含量为 13.4% 时的 0.015, 相比未掺杂时增加了约 83.97%。由于  $H_k^\perp$  与  $\alpha$  均正比于自旋轨道耦合效应, 因此, 本文研究结果表明 Pt 掺杂可以有效提升 Py 薄膜的自旋轨道耦合效应。

#### 基金项目

国家自然科学基金青年项目(批准号: 51601093)中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 30923010923, 30925010323)资助的课题。

#### 参考文献

- [1] Ralph, D.C. and Stiles, M.D. (2008) Spin Transfer Torques. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320**, 1190-1216. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.12.019>
- [2] Brataas, A., Kent, A.D. and Ohno, H. (2012) Current-Induced Torques in Magnetic Materials. *Nature Materials*, **11**, 372-381. <https://doi.org/10.1038/nmat3311>
- [3] Manchon, A., Železný, J., Miron, I.M., Jungwirth, T., Sinova, J., Thiaville, A., *et al.* (2019) Current-Induced Spin-Orbit Torques in Ferromagnetic and Antiferromagnetic Systems. *Reviews of Modern Physics*, **91**, Article ID: 035004. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.91.035004>
- [4] Chumak, A.V., Vasyuchka, V.I., Serga, A.A. and Hillebrands, B. (2015) Magnon Spintronics. *Nature Physics*, **11**, 453-461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
- [5] Demidov, V.E., Urazhdin, S., de Loubens, G., Klein, O., Cros, V., Anane, A., *et al.* (2017) Magnetization Oscillations and Waves Driven by Pure Spin Currents. *Physics Reports*, **673**, 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.01.001>
- [6] Awschalom, D.D. and Flatté, M.E. (2007) Challenges for Semiconductor Spintronics. *Nature Physics*, **3**, 153-159. <https://doi.org/10.1038/nphys551>
- [7] Yuan, H.Y., Cao, Y., Kamra, A., Duine, R.A. and Yan, P. (2022) Quantum Magnonics: When Magnon Spintronics Meets Quantum Information Science. *Physics Reports*, **965**, 1-74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.03.002>
- [8] Lee, S. and Lee, K. (2016) Emerging Three-Terminal Magnetic Memory Devices. *Proceedings of the IEEE*, **104**, 1831-1843. <https://doi.org/10.1109/jproc.2016.2543782>
- [9] Li, Y., Edmonds, K.W., Liu, X., Zheng, H. and Wang, K. (2019) Manipulation of Magnetization by Spin-Orbit Torque.

- 
- Advanced Quantum Technologies*, **2**, Article ID: 1800052. <https://doi.org/10.1002/qute.201800052>
- [10] Liu, L., Pai, C., Li, Y., Tseng, H.W., Ralph, D.C. and Buhrman, R.A. (2012) Spin-Torque Switching with the Giant Spin Hall Effect of Tantalum. *Science*, **336**, 555-558. <https://doi.org/10.1126/science.1218197>
- [11] Haazen, P.P.J., Murè, E., Franken, J.H., Lavrijsen, R., Swagten, H.J.M. and Koopmans, B. (2013) Domain Wall Depinning Governed by the Spin Hall Effect. *Nature Materials*, **12**, 299-303. <https://doi.org/10.1038/nmat3553>
- [12] Liu, L., Moriyama, T., Ralph, D.C. and Buhrman, R.A. (2011) Spin-Torque Ferromagnetic Resonance Induced by the Spin Hall Effect. *Physical Review Letters*, **106**, Article ID: 036601. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.106.036601>
- [13] Foner, S. (1956) Vibrating Sample Magnetometer. *Review of Scientific Instruments*, **27**, 548-548. <https://doi.org/10.1063/1.1715636>
- [14] Willard, J., Mishra, S.S., Klaes, R.M., Emtage, N.J., Loloee, R. and Birge, N.O. (2025) Comparison of NiFeCr and NiFe in Ferromagnetic Josephson Junctions. *Journal of Applied Physics*, **137**, Article ID: 123909. <https://doi.org/10.1063/5.0257749>
- [15] Yaln, O. (2013) Ferromagnetic Resonance. In: Yalcin, O., Ed., *Ferromagnetic Resonance—Theory and Applications*, InTech, 1-46. <https://doi.org/10.5772/56134>
- [16] Harrington, G.F. and Santiso, J. (2021) Back-To-Basics Tutorial: X-Ray Diffraction of Thin Films. *Journal of Electroceramics*, **47**, 141-163. <https://doi.org/10.1007/s10832-021-00263-6>
- [17] Yin, Y., Pan, F., Ahlberg, M., Ranjbar, M., Dürrenfeld, P., Houshang, A., *et al.* (2015) Tunable Permalloy-Based Films for Magnonic Devices. *Physical Review B*, **92**, Article ID: 024427. <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.024427>
- [18] Arias, R. and Mills, D.L. (1999) Extrinsic Contributions to the Ferromagnetic Resonance Response of Ultrathin Films. *Physical Review B*, **60**, 7395-7409. <https://doi.org/10.1103/physrevb.60.7395>