

补充材料

基于稀土金属 Dy/Pt/[Co/Pt]₃ 磁性多层膜的自旋轨道矩*李栋^{1)2)†} 来艳萍¹⁾ 刘喜悦¹⁾

1) (山西师范大学化学与材料科学学院, 磁性分子与磁信息材料教育部重点实验室, 太原 030006)

2) (山西师范大学材料科学研究院, 先进磁性材料与器件山西省重点实验室, 太原 030006)

S1. 不同 Dy 层厚度样品的面外磁滞回线

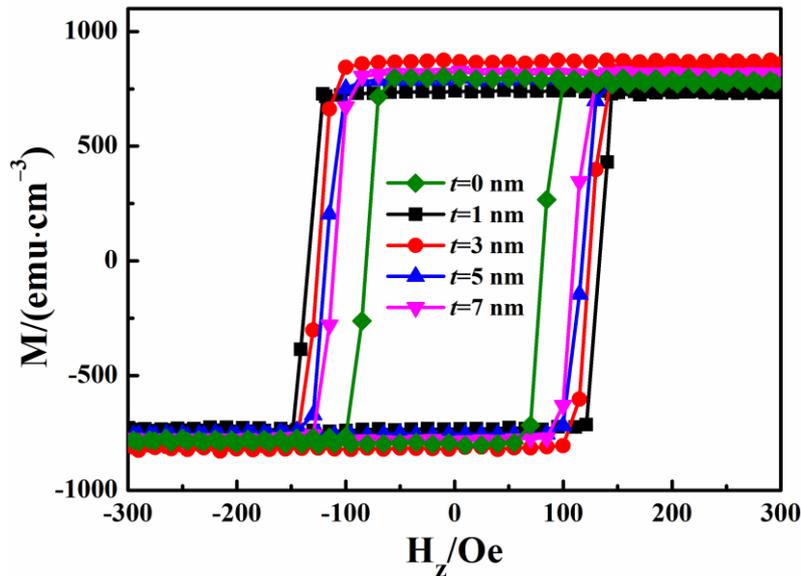


图 S1 不同 Dy 层厚度样品的面外磁滞回线

Fig. S1. Out-of-plane magnetic hysteresis loops for stacks with varying Dy layer thicknesses.

通过振动样品磁强计测量了不同 Dy 层厚度样品的面外磁滞回线, 如图 S1 所示. 可以看出, 在无施加电流情况下样品矫顽场随 Dy 层厚度增加先增大而后逐渐减小, 这与反常霍尔输运测量得到的结果一致, 表明样品矫顽场和磁各向异性的变化主要来自于样品本身的性质. 尽管磁性质主要由 [Co/Pt]₃ 多层膜提供, 但样品制备过程中, 底部 Dy 层的引入以及厚度的变化对上层磁性层的磁性质产生了直接影响.

S2. 反常能斯特效应的贡献

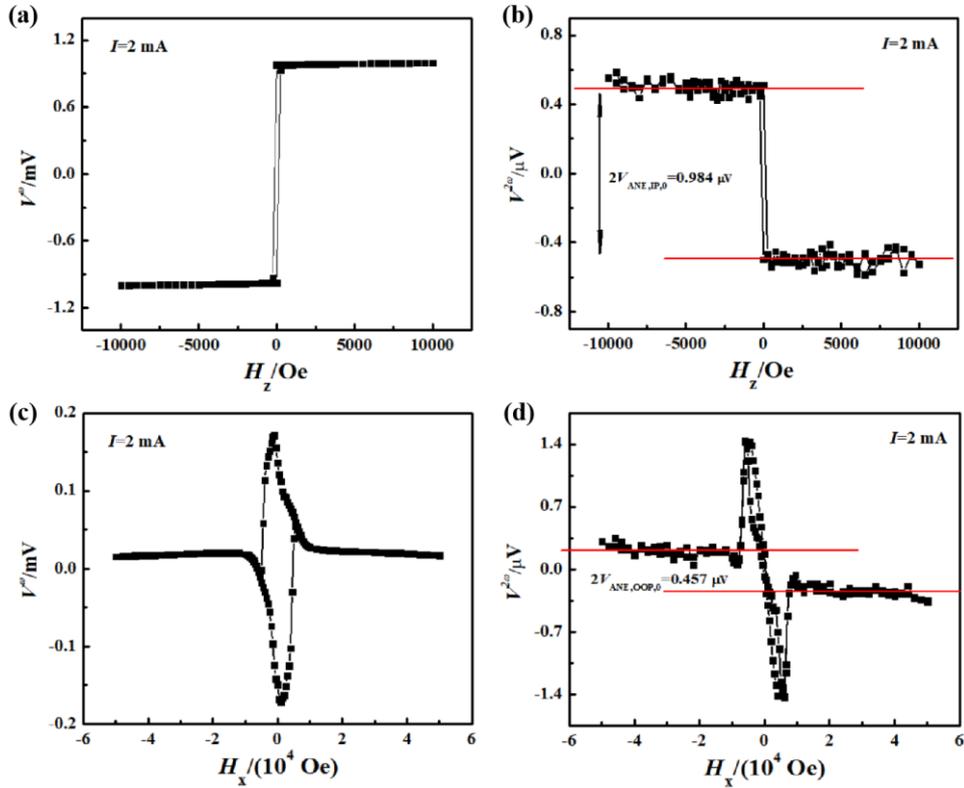


图 S2 $t = 7$ nm 厚度样品中, (a) 一阶谐波电压 (V^ω) 和 (b) 二阶谐波电压 ($V^{2\omega}$) 随面外扫描磁场 H_z 的依赖关系; (c) V^ω 和 (d) $V^{2\omega}$ 随面内沿电流方向扫描磁场 H_x 的依赖关系

Fig. S2. (a) The first (V^ω) and (b) second ($V^{2\omega}$) harmonic voltages as a function of out-of-plane magnetic field H_z ; (c) V^ω and (d) $V^{2\omega}$ as a function of in-plane magnetic field H_x along the direction of the current for the stack with $t = 7$ nm.

在谐波测试中, 由于样品面外 (out-of-plane, OOP) 和面内 (in-plane, IP) 温度梯度造成的反常能斯特效应可能会贡献热电二阶信号的影响. 因此, 为了进一步排除热阻效应的影响, 通过大场扫描的方式测试了一阶谐波电压 (V^ω) 和二阶谐波电压 ($V^{2\omega}$) 随面外磁场 (H_z) 和面内沿电流方向磁场 (H_x) 的变化关系, 如图 S2 所示, 测试施加的交流电幅值为 $2 \text{ mA}^{[1-3]}$. 图 S2 (a) 为 V^ω 随 H_z 的依赖关系, 即反常霍尔曲线, 其反常霍尔电压在正负饱和场下达到最大值. 而图 S2 (b) 显示在正负饱和面外场下 $V^{2\omega}$ 电压信号的差异主要来自于面内反常能斯特效应 ($V_{\text{ANE,IP}}$) 的贡献, 从图中我们获取面内反常能斯特电压的最大值 ($V_{\text{ANE,IP},0}$) 约为 $0.492 \mu\text{V}$. 图 S2 (c) 为 V^ω 随 H_x 的依赖关系, 反映了面内磁场对垂直磁矩的作用, 可以看到可能由于面内大场作用导致的分畴影响, 磁矩在零场时处于部分

翻转状态，对应的反常霍尔电压 ($V_{Hx=0}$) 并没有达到反常霍尔曲线的最大值 (V_{AHE})。而图 S2 (d) 显示在正负饱和面内场下 $V^{2\omega}$ 电压信号的差异主要来自于面外反常能斯特效应 ($V_{\text{ANE, OOP}}$) 的贡献，从图中我们获取面外反常能斯特电压的最大值 ($V_{\text{ANE, OOP}, 0}$) 约为 $0.229 \mu\text{V}$ 。考虑到样品在面内磁场扫描过程中，磁矩并未完全沿面外方向，实际面内和面外反常能斯特电压可通过以下关系修正：

$$\begin{aligned} V_{\text{ANE, IP}} &= V_{\text{ANE, IP}, 0} \cos \theta, \\ V_{\text{ANE, OOP}} &= V_{\text{ANE, OOP}, 0} \sin \theta, \\ \theta &= \arccos(V_{Hx=0} / V_{\text{AHE}}), \\ \cos \theta &\approx 0.175, \sin \theta \approx 0.985. \end{aligned}$$

因此，面内反常能斯特电压 $V_{\text{ANE, IP}}$ 约为 $0.0836 \mu\text{V}$ ，面外反常能斯特电压 $V_{\text{ANE, OOP}}$ 约为 $0.226 \mu\text{V}$ 。相比于面内二阶最大谐波电压 $V^{2\omega} \sim 1.439 \mu\text{V}$ ，其反常能斯特电压信号的贡献较小，近似可以忽略该二阶信号的贡献。

参考文献

- [1] Wang R, Xiao Z Y, Liu H H, Quan Z Y, Zhang X, Wang M M, Wu M Z, Xu X H 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 042404
- [2] Qiu X P, Deorani P, Narayanapillai K, Lee K S, Lee K J, Lee H W, Yang H 2014 *Sci. Rep.* **4** 4491
- [3] Krishnia S, Sassi Y, Ajejas F, Sebe N, Reyren N, Collin S, Denneulin T, Kovács A, Dunin-Borkowski R E, Fert A, George J M, Cros V, Jaffrès H 2023 *Nano Lett.* **23** 6785