

## Tunable unconventional spin orbit torque magnetization dynamics in van der Waals heterostructures

Lalit Pandey 1,2 , Bing Zhao 1, Karma Tenzin 3,4, Roselle Ngaloy1, Veronika Lamparská3, Himanshu Bangar1, Aya Ali5, Mahmoud Abdel-Hafiez 6,7,8, Gaojie Zhang9, Hao Wu9, Haixin Chang 9, Lars Sjöström 1, Prasanna Rout 1, Jagoda Sławińska 3 & Saroj P. Dash 1,2,10

第一单位：瑞典查尔姆斯理工大学微技术与纳米科学系

Nature Communications (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-64109-3>

[拓展背景] 范德华铁磁材料、自旋轨道力矩（SOT）、全范德华异质结、垂直磁各向异性（PMA）、铁磁自旋电子学

[Ques] 1、如何将 TaIrTe<sub>4</sub>单晶制备成霍尔棒（Hall Bar）？

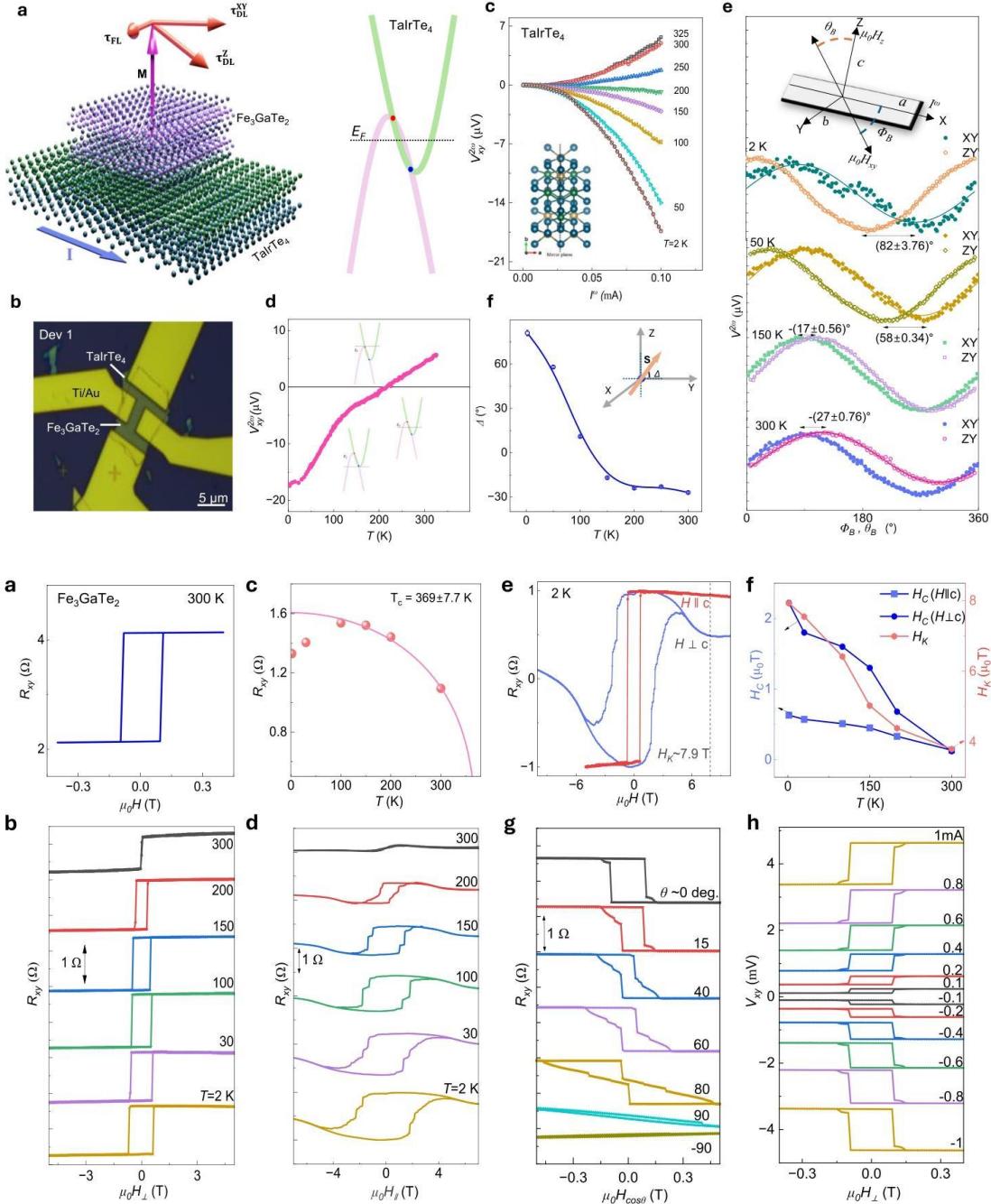
[Ques] 2、对于范德华磁性材料体系的自旋轨道矩（SOT）器件，其性能通常欠佳，那么本文中 TaIrTe<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>异质结构的性能表现如何？

[关键问题] 如何在范德华异质结构中实现室温下高能效、可调谐的无外场自旋轨道矩磁化切换？

[Sum] 1、TaIrTe<sub>4</sub>单晶制备成霍尔棒（Hall Bar）的方法：

[Sum] 首先在手套箱内，采用 Scotch 胶带法将 TaIrTe<sub>4</sub>单晶机械剥离成纳米层，并将其转移至 SiO<sub>2</sub>/Si 晶圆上（若为异质结构霍尔棒，需将剥离的 TaIrTe<sub>4</sub>纳米层与 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>纳米层相互叠加）；随后立即在样品上表面覆盖 2 nm 厚的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层，防止材料随时间降解；对于近乎矩形的 TaIrTe<sub>4</sub>薄片（如 Dev1-Dev3），通过电子束光刻（EBL）将其图案化为霍尔棒几何形状，再利用 EBL 与电子束蒸发技术制备 15 nm Ti/250 nm Au 接触电极；对于形状不规则的薄片（如 Dev4-Dev5），则采用氩

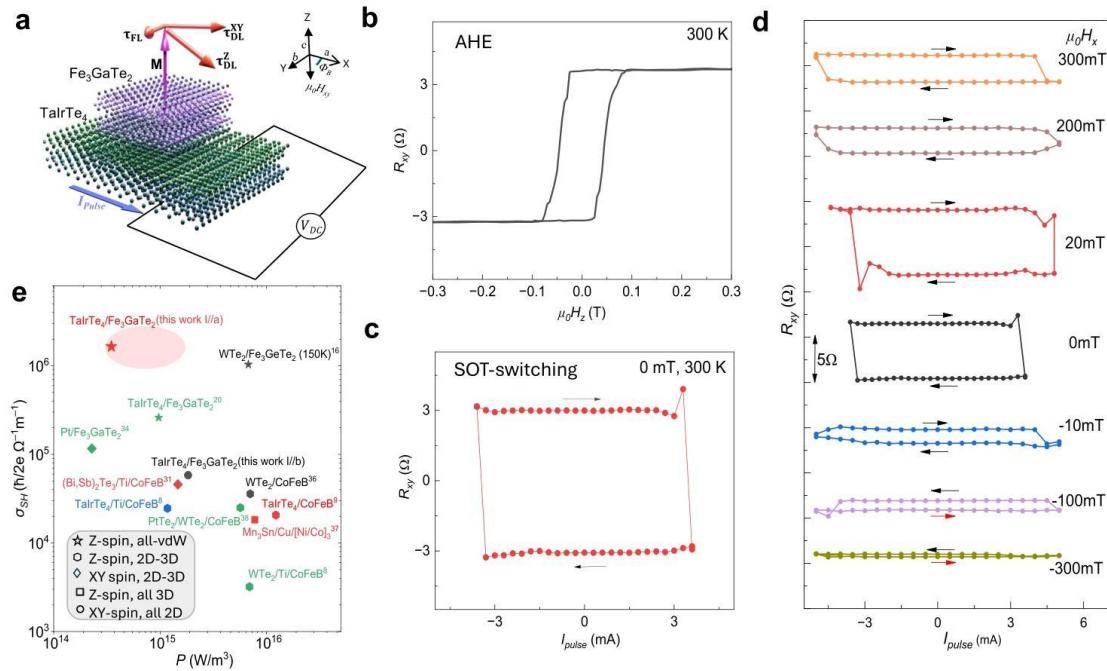
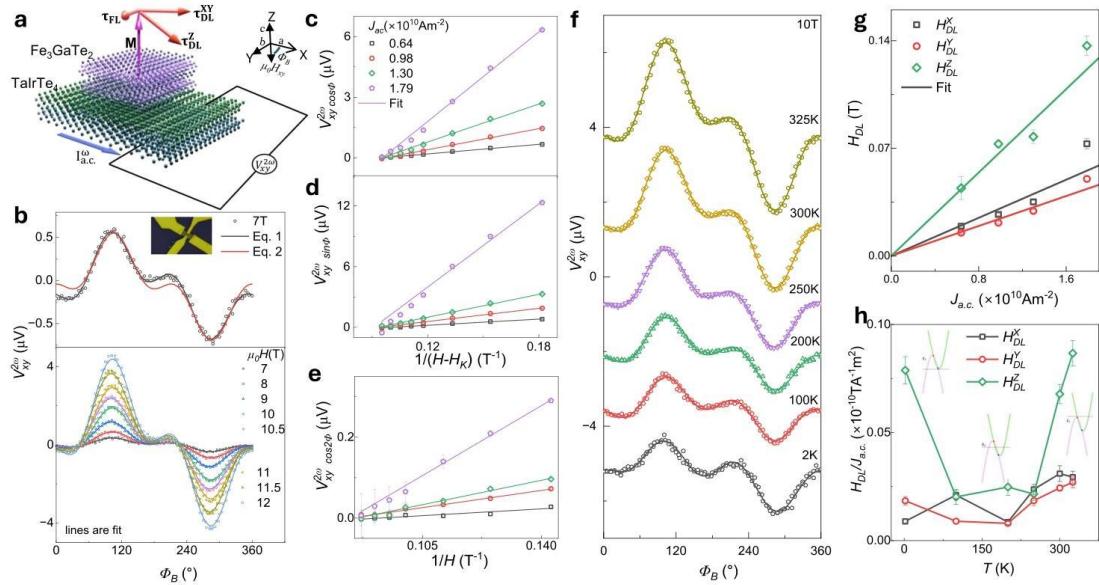
离子铣削干法物理蚀刻，以制造轮廓清晰的霍尔棒器件。

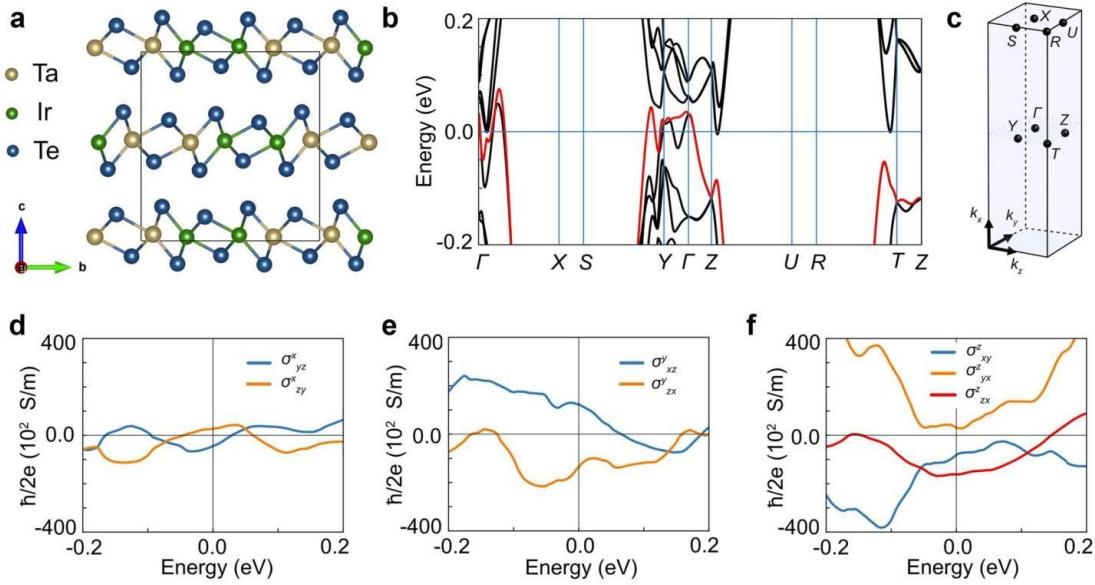


[Sum] 2、 $\text{TaIrTe}_4/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 异质结构 SOT 器件的性能表现：

[Sum] 其一，实现室温下确定性无外场 SOT 磁化切换，无需依赖外部磁场辅助，解决传统范德华 SOT 器件“外场依赖”问题；其二，临界切换电流密度极低，仅为

$1.81 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ , 远优于传统范德华 SOT 器件（通常低 2-3 个数量级），且功率密度低至  $0.348 \times 10^{15} \text{ W/m}^3$ ; 其三，具有大且可调谐的面外类阻尼矩，可通过调控 TaIrTe<sub>4</sub>的化学势实现 SOT 效率可调；其四，SOT 效率 ( $\varepsilon_{\text{SOT}}$ ) 达 1.76，自旋霍尔电导率 ( $\sigma_{\text{SH}}$ ) 表现优异，在电流密度与功率密度等指标上具备竞争力。





[亮点 1] 实现了室温下无外场驱动的高能效 SOT 磁化切换，突破范德华磁性体系长期存在的“外场依赖”瓶颈。

[亮点 2] 揭示 TaIrTe<sub>4</sub> 的非常规面外阻尼矩可调机制，并通过化学势调控实现自旋轨道矩效率可控，为低功耗自旋器件设计提供新路径。

[思考] (1) 1. 实验中观察到不同器件 (Dev1-Dev5) 的  $H_{DL^Z}/H_{DL^{XY}}$  幅度比存在差异，作者推测与 TaIrTe<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>异质结构的相对扭转角相关，未来能否通过可控扭转角制备、界面表征（如高分辨率电镜）进一步量化扭转角对 SOT 效率的影响？2. 文章证实 TaIrTe<sub>4</sub>体相存在非常规自旋霍尔效应，但界面效应可能增强 SHC，能否通过构建“体相 - 界面分离”的对照实验（如不同厚度 TaIrTe<sub>4</sub>异质结构），明确界面贡献的占比与物理机制？

[思考] (2) 1. 器件的长期稳定性是自旋电子存储应用的关键，作者未提及 TaIrTe<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>异质结构在循环切换（如  $10^4$  次以上）后的性能衰减情况，未来需补充稳定性测试及界面防护（如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>封装层）的长效保护效果验证；2. 与现有最先进 SOT 器件（如 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>）相比，TaIrTe<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>的功率密度已具备优势，但在“切换速度”（如纳秒级脉冲响应）上未做评估，能否补充高频切换实验以完善器件性能基准？

[拓展阅读 1] 范德华 (vdW) 异质结构是由二维层状材料以原子级界面堆叠形成的体系，其层间相互作用弱但电子耦合强，使得电荷、自旋、轨道等自由度可被独立或协同调控。TaIrTe<sub>4</sub> 属于低对称性拓扑外尔半金属，具有强自旋轨道耦合与显著贝里曲率偶极子，可在电流作用下产生面外自旋流，从而实现垂直磁各向异性磁体（如 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>）的无外场切换。这种“拓扑 + 范德华磁体”组合被视为实现高能效自旋逻辑器件的理想路径。其核心物理在于非平庸能带结构带来的非对称自旋分布，使得传统仅具面内分量的自旋轨道矩获得额外自由度，为信息存储与量子调控奠定基础。

[拓展阅读 2] 自旋轨道矩（Spin-Orbit Torque, SOT）是电流诱导磁化切换的关键机制，源于自旋霍尔效应或拉什巴效应。SOT 包括阻尼型与场型两类分量，分别对应自旋流对磁矩的平行与垂直作用。高效 SOT 器件的目标是降低临界电流密度，同时实现确定性、可调控的磁化翻转。传统金属（如 Pt、Ta、W）基 SOT 器件虽成熟，但能耗偏高；范德华异质结构因其原子平整界面与低缺陷密度，在保持高 SOT 效率的同时兼具低损耗与集成潜力。该研究展示了利用拓扑半金属与 vdW 磁体的协同效应，为构建新一代低功耗自旋计算单元提供了可行方案。

## Giant spin-orbit torque induced by spin Hall effect in amorphous Pt(P) alloys

Utkarsh Shashank (Department of Physics, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden; Department of Physics and Information Technology, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Japan)、Yasuhiro Fukuma (Department of Physics and Information Technology, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Japan)

NPG Asia Materials

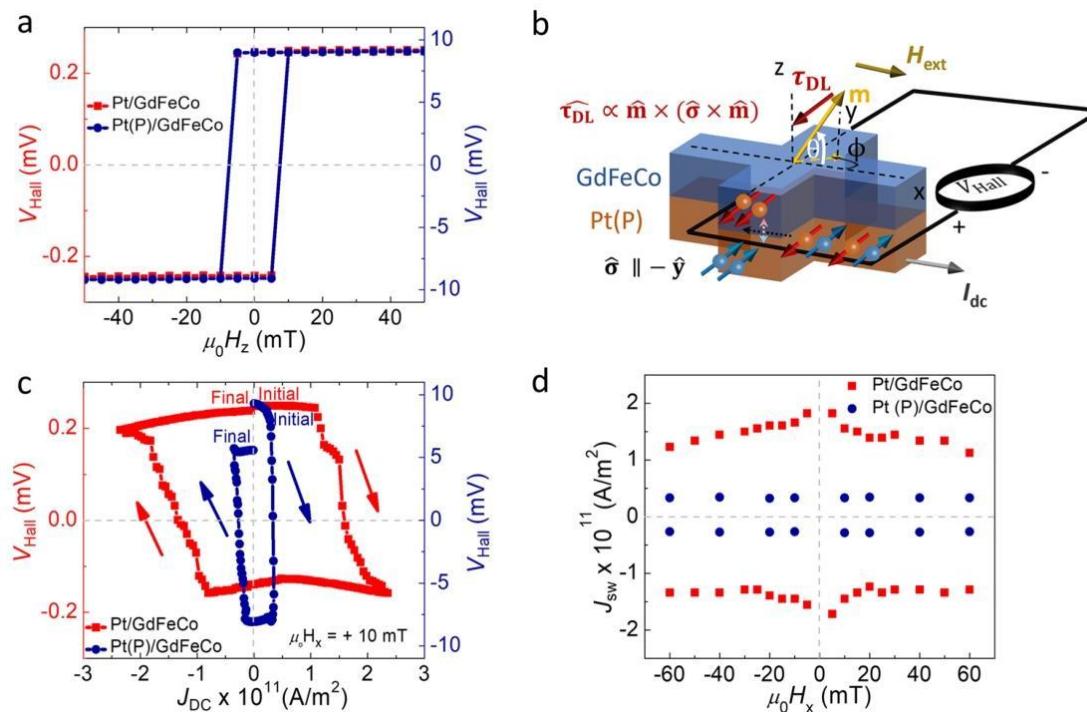
<https://doi.org/10.1038/s41427-025-00596-6>

[拓展背景] 自旋电子学、离子注入、内禀、外禀、自旋散射、侧跳机制

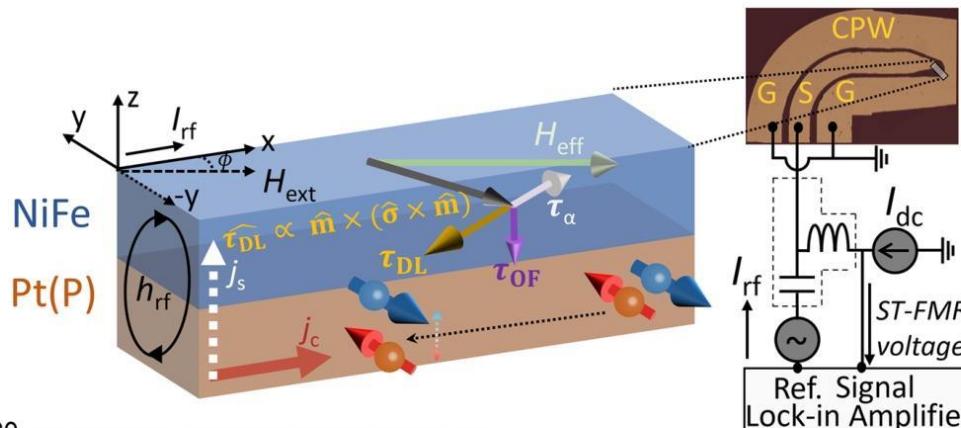
[Ques] 如何通过材料结构改性提升自旋霍尔效率，同时降低自旋轨道矩驱动磁矩翻转的临界电流密度及器件功耗？这与内禀、外禀特性是否相关？

[关键问题] 如何通过结构非晶化调控外禀散射机制以显著提升自旋霍尔效率并降低能耗

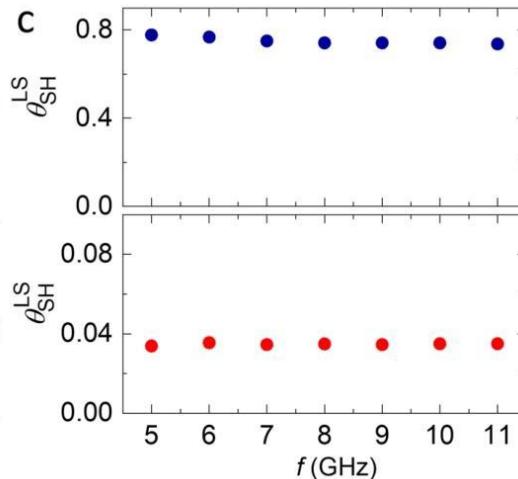
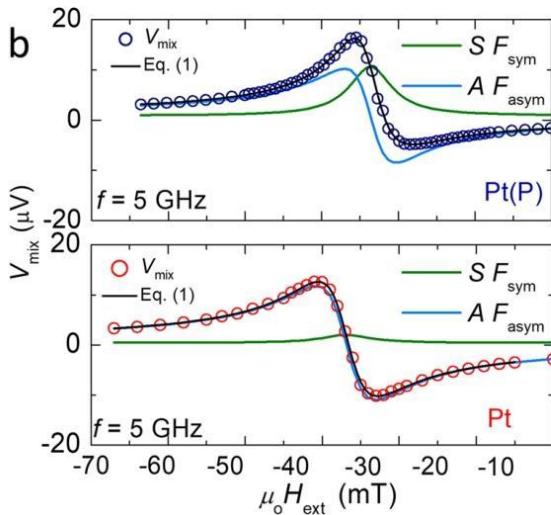
?



a

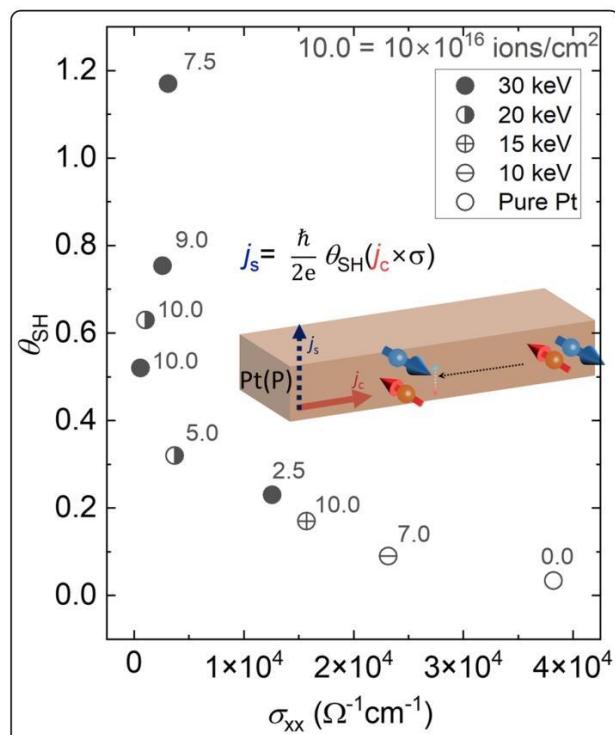
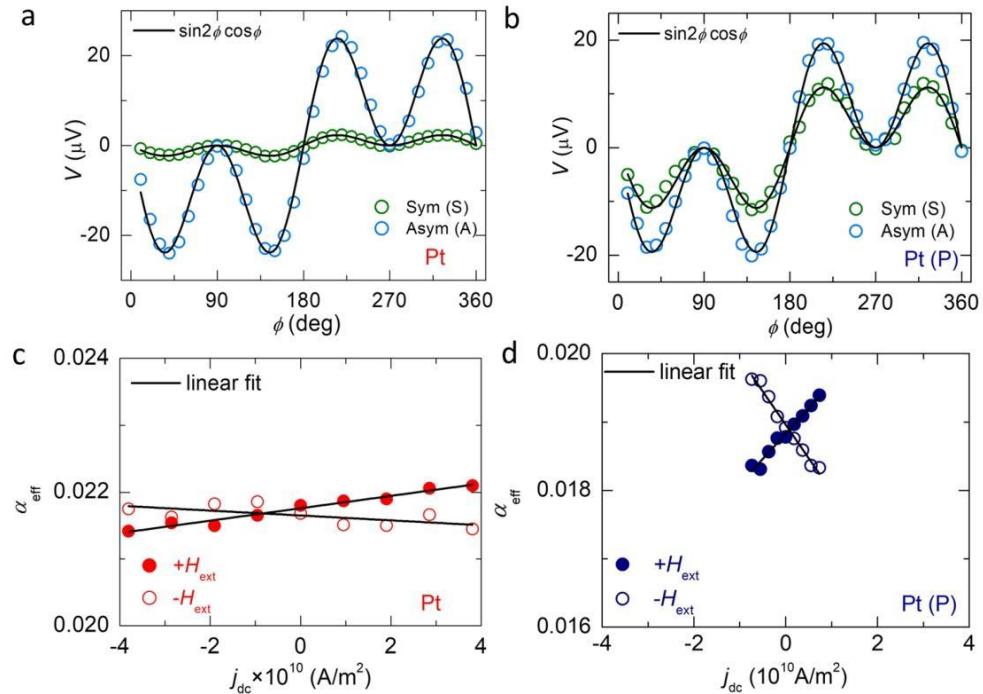


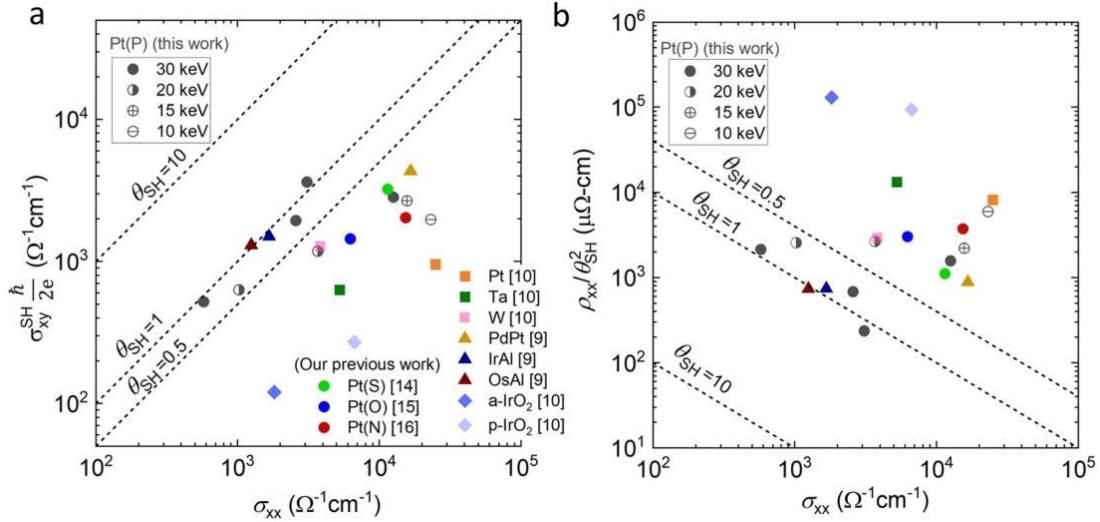
b



[Sum] 以 10–30 keV 能量、 $2.5 \times 10^{16}$ – $10 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> 剂量的 P 离子注入 Pt 层，可使 Pt 的 fcc 结构转变为非晶态；非晶态 Pt(P) 的自旋霍尔效率 ( $\theta_{\text{SH}}$ ) 最高达 1.17 (纯 Pt 的 34 倍)，自旋霍尔电导率 ( $\sigma_{xy}^{\text{SH}}$ ) 达  $3.62 \times 10^3 \frac{\hbar}{(2e)} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ，临界开关电流密度 ( $J_{\text{sw}}$ ) 从纯 Pt 的  $1.5 \times 10^{11} \text{A/m}^2$  降至  $3.0 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ ，开关能量密度降低 4 倍，功耗显著低于传统 5d 过渡金属、合金及其他离子注入 Pt 基材料。离子

注入与 Pt 合金掺杂、Pt 多层膜类似，同样通过强化外禀特性提升自旋轨道耦合。





[亮点 1] 首次在非晶态 Pt(P) 中实现超过 1 的自旋霍尔效率，证明结构无序可显著增强外禀散射贡献。

[亮点 2] 通过离子注入诱导非晶化显著降低临界切换电流密度与功耗，为高效低损耗自旋器件提供新思路。

[思考] (1) 非晶态 Pt(P) 中巨自旋霍尔效应的杂质自旋相关 extrinsic 散射机制，能否通过第一性原理计算明确原子尺度的作用路径？

[思考] (2) 该非晶态 Pt(P) 材料在 SOT-MRAM 器件中的长期热稳定性及规模化制备过程中的均匀性控制，面临哪些核心挑战？

[拓展阅读 1] 自旋霍尔效应 (Spin Hall Effect, SHE) 是指带电电流通过具有强自旋轨道耦合的材料时，自旋上、下电子在横向方向分离，从而产生横向自旋流。该效应可分为内禀与外禀两类：内禀效应源于能带拓扑结构中的贝里曲率，而外禀效应来自杂质散射与侧跳机制。非晶态金属因缺乏长程有序结构，使外禀散射通道更为复杂且高效，可增强自旋流产生。Pt(P) 体系正是利用此特性实现  $\theta_{\text{SH}}$  的超常提升。通过调控非晶化程度与杂质分布，可在保持低电阻的同时获得强自旋响应，为高效自旋电子学材料提供全新思路。

[拓展阅读 2] 离子注入是一种可精确控制掺杂元素与能量分布的材料改性技术。对于自旋电子学而言，离子注入不仅能改变载流子浓度，还可诱导晶体缺陷、界面应变甚至非晶化结构，从而改变自旋轨道耦合强度与散射机制。相比合金化或层状况



# BeyondStory

积，离子注入具有可重复性高、工艺兼容性强等优势，适合集成于传统 CMOS 制程。本文中通过 P 注入使 Pt 由晶态转为非晶态，揭示了结构无序与自旋输运的深层关系，为低能耗、自适应自旋逻辑器件的材料设计提供了实验范例。

SPELLs BeyondStory 编辑部

编辑：闫婷

投稿人：梁宏铭

日期：2025-11-11