

Orbital Current Boosting Magnetization Switching Efficiency in Metallic Superlattices

金立川（电子科技大学）

Advanced Electronic Materials

<https://doi.org/10.1002/aelm.202400314>

[Ques] 该文章通过什么原理提升 SOT 效率？相对于纯 Pt 体系，其提升方式与原理是什么？提升幅度为多少？

[关键问题] 该工作揭示一种以轨道电流主导的新型力矩产生机制，利用 OREE 大幅提升超晶格体系的磁化翻转效率。

[Sum] 该文章提升 SOT 效率的核心原理是轨道拉什巴-埃德尔斯坦效应（OREE）诱导的轨道电流机制，具体为 W/Ti 界面通过 OREE 产生轨道角动量流（轨道电流），该轨道电流注入具有强自旋轨道耦合（SOC）的 β -W 层后转换为自旋携带的力矩，最终作用于铁磁（FM）层磁矩以提升 SOT 效率；相对于纯 Pt 体系依赖自旋霍尔效应（SHE）产生自旋电流（传输距离短、力矩效率有限）的机制，该 [W/Ti]₃ 超晶格采用轨道电流主导的新路径，通过调制 Ti 和 W 层厚度强化 OREE 效应，结合 β -W 的强 SOC 与 Ti 的大轨道霍尔电导率（OHC）协同提升转换效率，最终实现阻尼类 SOT 效率（ ξ_{DL} ）比 Pt 高 100 倍以上，[W(1 nm)/Ti(3 nm)]₃ 超晶格的临界翻转电流密度（ J_{sw} ）低至 $6.4 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，较 Pt 降低两个数量级。

[亮点 1] 该研究首次在金属超晶格中验证由 OREE 诱导的轨道电流可显著增强阻尼型 SOT，有效突破传统 SHE 主导系统在力矩效率上的物理瓶颈。

[亮点 2] 通过精确调控 W/Ti 层厚与界面杂化强度，研究实现对轨道电流的工程化放大，使 ξ_{DL} 提升百倍、 J_{sw} 降至 10^5 A/cm^2 量级，展示面向低功耗自旋器件的可行路径。

[Abstract] Orbitronics is an emerging domain within spintronics, and it is characterized by a rapid development of methods for utilizing orbital current. Metals with strong spin-orbit coupling have been effectively used to convert orbital current into orbital torque. This study introduces a metallic [W/Ti]₃ superlattice that uses orbital current to

significantly enhance the magnetization switching efficiency. The enhancement in torque efficiency is demonstrated via spin-torque ferromagnetic resonance along with the extraction of damping-like (ξ DL) and field-like spin-orbit torque (SOT) efficiencies. ξ DL for superlattices is more than 100 times higher than that for Pt. As a result, the critical switching current density of the superlattice becomes two orders of magnitude lower than that of Pt. This is primarily attributed to the orbital current generated by the orbital Rashba–Edelstein effect at the W/Ti interface. The thickness of Ti and W layers is modulated to develop a novel approach to utilize orbital current for augmenting SOT efficiency and magnetization switching efficiency in superlattices. The findings of this study provide a basis for developing low-power-consumption memory devices and memory with controllable critical current density in SOT-magnetic random-access memory applications.

[思考] (1) 能否进一步探索不同过渡金属组合（如 Mo/Ti、W/Al）在 OREE 下的轨道电流生成效率，以建立材料数据库？

[思考] (2) 若在超晶格中引入应变场或电场调控，其是否能够对界面轨道杂化与轨道纹理进行动态调制，从而实现可编程 SOT 输出？

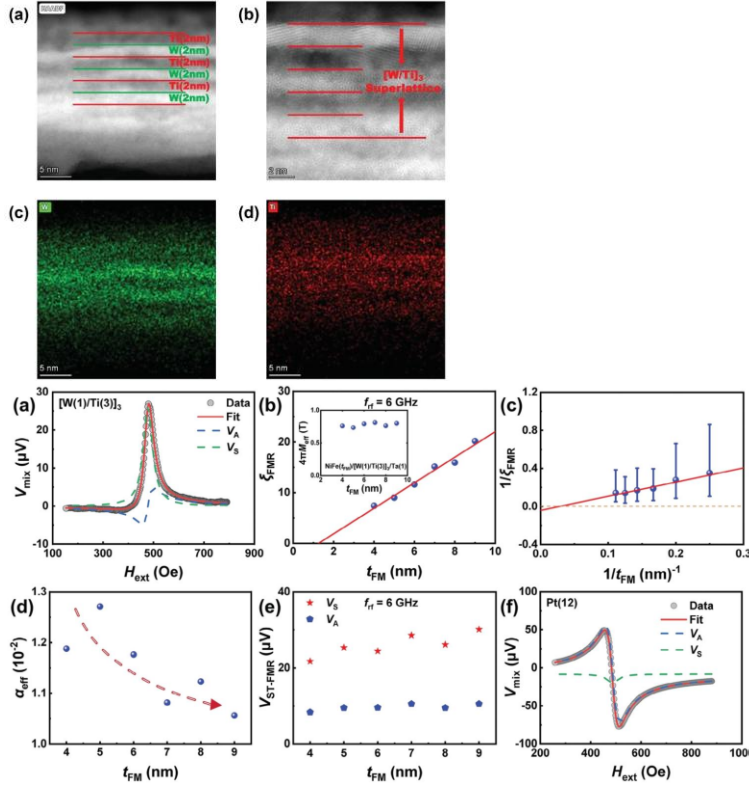
[拓展阅读 1]（主编问题 1）

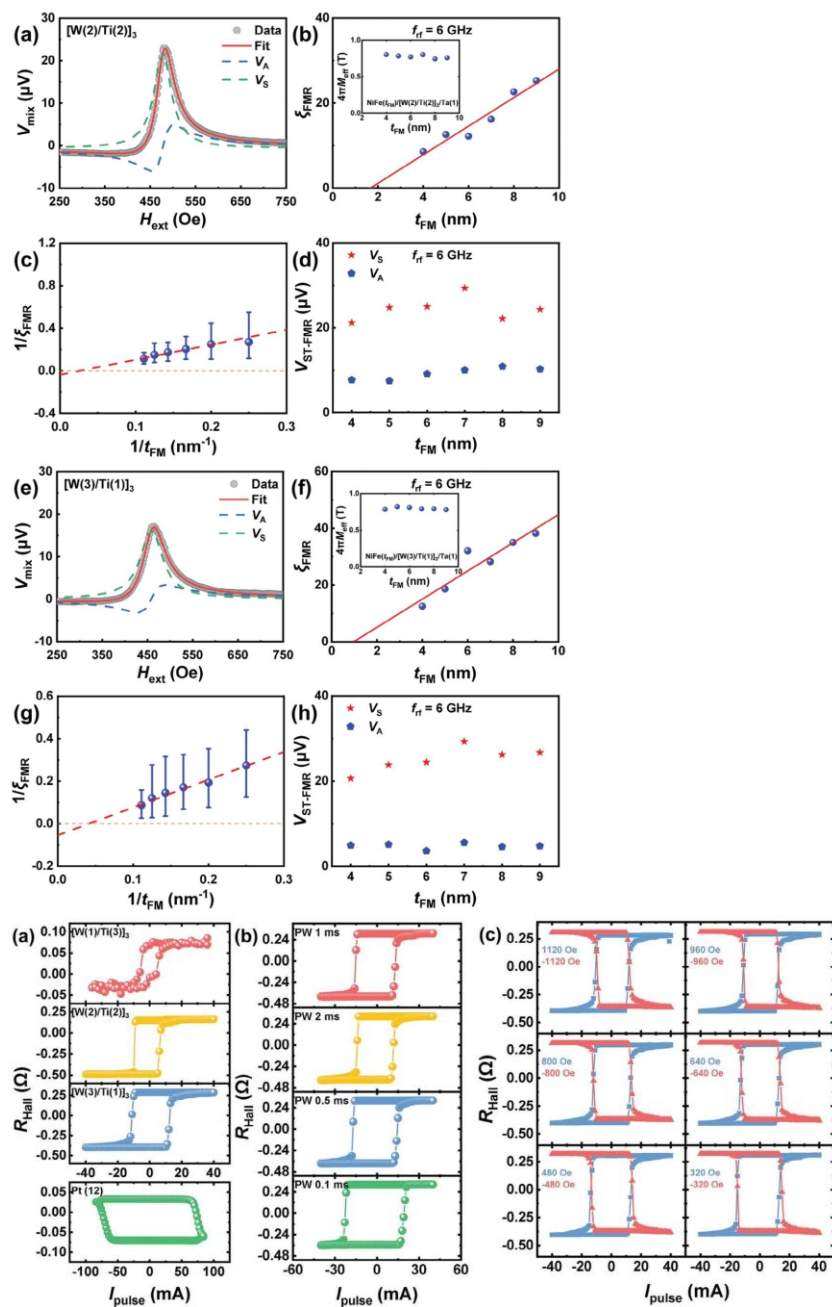
[拓展阅读 1] 超晶格在长期循环中的稳定性主要由三类因素决定：界面轨道杂化的稳固性、W/Ti 多层结构的应力累积，以及轨道电流在传输中的耗散机制。由于 OREE 产生的轨道电流不依赖电子自旋的弛豫时间，其在理论上具有较好的非易失性与抗衰减性。实际应用中需注意循环过程中的热漂移、界面扩散与 β -W 相结构稳定性，这些都可能影响力矩输出一致性。例如，长时间电流注入易导致 Ti 层表面迁移，使得界面 OREE 效率下降。未来可通过退火调控、增加扩散阻挡层或使用界面插层提升循环稳定性。总体而言，轨道电流相较自旋电流更不易衰减，但超晶格界面的结构稳定性仍需进一步系统验证。

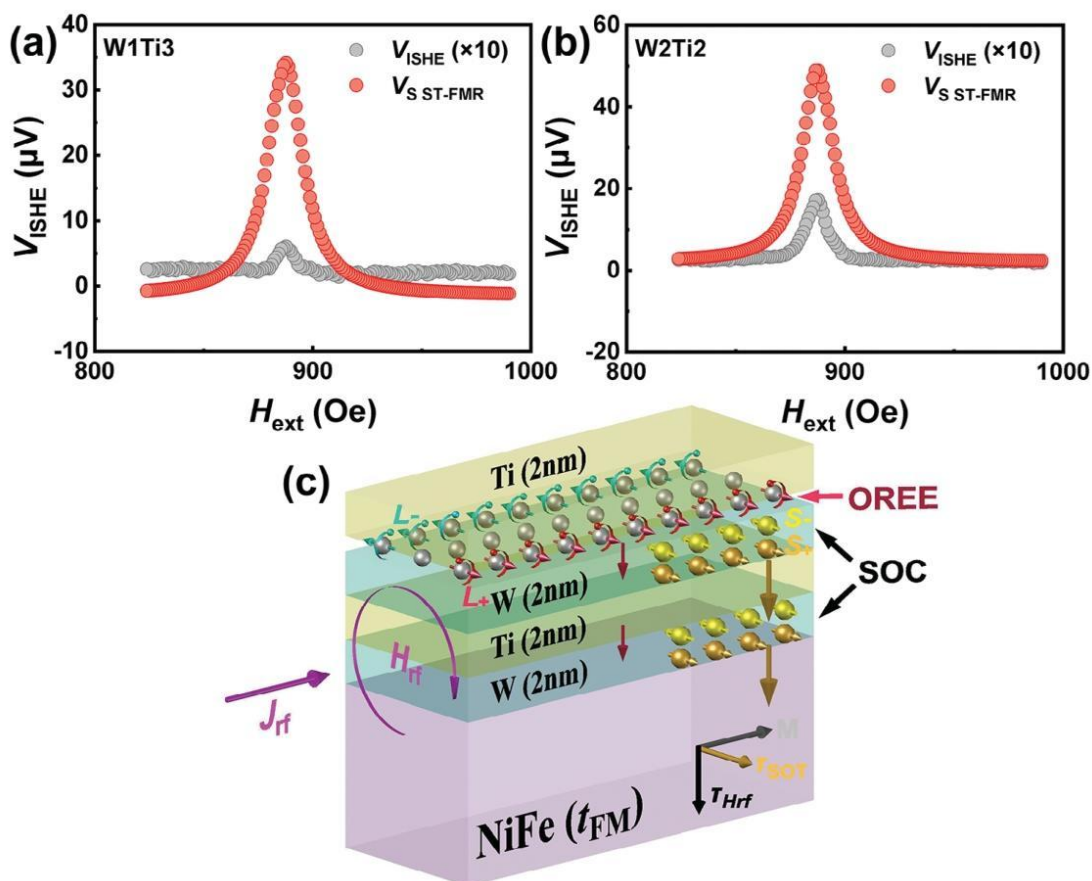
[拓展阅读 2]（主编问题 2）

[拓展阅读 2] OREE 的普适性取决于界面是否同时具备强 Rashba 场与显著轨道纹理，因此不仅限于 W/Ti 材料体系。理论上，只要材料组合满足“轻元素提供轨道可极化性 + 重元素提供 SOC 放大”两条件，轨道电流即可显著提升。例如 Hf/Ti、Mo/Ti

等体系也可能表现增强效应。进一步减薄 Ti/W 层厚度可增强界面轨道杂化，从而提升 OREE 信号强度，并减少轨道流弛豫损耗。然而，层厚过薄会带来粗糙度上升与界面无序，需要在“增强 OREE—维持结晶性”之间取得平衡。总体来看，OREE 的轨道电流增强机制具备材料拓展的可行性，但须通过系统实验与第一性原理计算验证其跨材料普适性。







SPELLs BeyondStory 编辑部

编辑: 闫婷

投稿人: 梁宏铭

日期: 2025-12-03