
物理所全电学操控的非易失性多功能可编程自旋逻辑研究获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/1845.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于自旋的数据存储和运算技术是解决大数据时代计算能力不足和存储空间不够的优选方案之一。而磁随机存储器和自旋逻辑器件分别是自旋电子学可以明确针对存储和逻辑运算两方面挑战难题而提出的对应关键技术。它们两者共同的物理和器件基础是：(1)高磁电阻比值的磁性隧道结材料和(2)电流驱动的磁矩翻转机理。后者还是磁随机存储器分代的标准。第一代和第二代磁随机存储器分别利用电流诱导的磁场和自旋极化电流携带的自旋转移力矩(STT)进行数据写入操作。其中自旋转移力矩驱动的磁随机存储器(STT-MRAM)即将逐渐嵌入现有的微电子设备，有望成为继计算机硬盘磁读头后第二个大规模应用的自旋电子学核心器件。

最近自旋轨道力矩(SOT)效应的发现以及随之而来新型电流操控磁矩技术的发明，为设计自旋存储和逻辑运算器件提供了新的发展思路，也为基于该效应的自旋器件提供了更加丰富的功能、更加优异的性能。不仅具备经典自旋转移力矩型器件所具有的数据非易失性、低能耗、CMOS兼容性和抗辐射等特点，自旋轨道力矩型(SOT)器件还具有超高速、长寿命、高热稳定性、多功能、调控手段丰富等特征，非常适于开发高速存储器件和可编程的逻辑运算器件。特别值得强调的是，自旋轨道力矩型器件的多功能特征得益于自旋轨道力矩驱动磁矩翻转过程的丰富可调性，如电流驱动的磁矩翻转方向可受偏置磁场极性的调控、临界翻转电流密度可通过偏置磁场的强度或者电压操控磁各向异性来调节。遗憾的是，现在自旋轨道力矩型器件多功能性的发挥还离不开外加磁场的协助，这无疑增加了器件设计的复杂度、器件功耗以及器件小型化的难度。为了将自旋轨道力矩型器件真正推向大规模实际应用，科研人员还需要发现既可保持器件多功能特性、同时还能实现器件全电学操作的新原理、新方法。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心磁学国家重点实验室M02研究组研究员韩秀峰课题组很早就研究并注意到自旋轨道力矩(SOT)效应的重要性和潜在应用价值，并于2009年最早申请了一个利用自旋轨道力矩翻转磁矩并应用于磁随机存储器和自旋逻辑的中国发明专利(200910076048.X)。此后，该研究组一直坚持研究自旋轨道力矩效应及其相关自旋电子学原型器件探索，先后从实验和理论角度清楚表明了两类自旋轨道力矩——类阻尼力矩和类场力矩对磁矩翻转过程的影响[Phys. Rev. B, 94 (2016) 174434]，实验演示了利用自旋霍尔效应设计多功能可编程自旋逻辑阵列器件的可行性和可实现途径[Adv. Electron. Mater.3 (2017) 1600282;J. Magn. Mater.428 (2017) 401 (Letter to Editor)]，并实现了零外加磁场条件下的自旋轨道力矩翻转[Appl. Phys. Lett. 109 (2016) 132402]。

最近，M02研究组在原有研究基础上创新性地利用磁性材料层间耦合效应替代原有自旋轨道力矩器件工作所需的外加磁场，在完全不依赖外加磁场的条件下，实现了纯电学手段操控的多模态自

旋轨道力矩翻转。并且基于这一原理，在单一自旋霍尔逻辑单元中实现了多种逻辑功能的可编程操作。如图1.(a)和(b)所示，磁性多层膜异质结构为Pt/Co/Ru/Co/Pt，通过优化磁性层Co的厚度，在两层Co中分别实现了垂直磁各向异性和面内磁各向异性，两层磁性层通过中间的非金属层Ru实现反铁磁耦合。其中垂直磁各向异性层的磁化翻转可以通过y方向电流驱动完成。在此过程中，面内磁性层通过层间耦合效应，为垂直层提供一个面内的等效磁场，因此可以在不施加任何外磁场的条件下，实现垂直层磁矩的纯电流翻转。且面内层磁矩的方向，决定垂直层磁矩的翻转极性。例如当面内层磁矩被磁化到+y或-y方向时，垂直层磁矩的翻转极性分别为逆时针和顺时针[图1.(c)和(d)]。

更重要的是，面内层磁矩也可以被沿x方向的脉冲电流所翻转。该过程类似于经典STT效应导致的磁化翻转。因此可以利用x方向电流预先驱动面内层磁矩指向+y或-y方向，然后可以实现不同的垂直层磁矩翻转极性[图1.(e)和(f)]。进一步，利用这一翻转特性，可实现全电学操作的可编程自旋霍尔逻辑器件，其逻辑操作如图2所示。利用一个预先施加的沿x方向的脉冲电流预置面内层磁矩的方向。该操作相当于对整个器件增加了一个“反相器”的功能，使得器件的逻辑功能可以在“与”和“与非”之间实现纯电学的切换。

这种自旋逻辑方案，实现了不需要外磁场辅助的、纯电学操控的自旋霍尔逻辑器件，并且保持了原有方案的数据非易失性、逻辑单元的多功能性和可编程性，且便于与CMOS工艺相兼容。这一进展使得自旋霍尔逻辑器件朝实用化方向和自旋逻辑运算存储一体化又迈进了一大步，具有非常重要的科学和应用价值。相关研究工作已经在《先进材料》杂志上发表 [Xiao Wang, Caihua Wan and Xiufeng Han et al. Field-Free Programmable Spin Logics via Chirality Reversible Spin – Orbit Torque Switching. *Adv. Mater.* 30 (2018) 1801318]。相关SOT自旋逻辑和SOT自旋存储器的系列设计方案已获得美国专利授权[自旋逻辑器件和包括其的电子设备, US15/256,262]。该项课题研究得到国家自然科学基金委员会、科技部和中科院有关项目基金的支持。

相关文章链接：12345

图1.(a)和(b)分别为通过沿y方向和x方向的脉冲电流实现两层磁矩翻转的机理示意图。蓝色、黄色、红色箭头分别代表电流、磁矩、层间耦合等效磁场的方向。紫色箭头代表自旋轨道力矩的方向。在第一种模式下，电流可翻转垂直层磁矩;在第二种模式下，电流可翻转面内层磁矩。并且通过控制面内层的磁矩方向，垂直层在第一种模态下的翻转方向(顺时针或逆时针)也可灵活改变。(c)在不同外磁场下的垂直层磁矩的翻转特性曲线。(d)零场下的垂直层磁矩翻转特性曲线，翻转方向受面内层磁化状态的影响。(e)通过电流调控的垂直层磁矩翻转的不同翻转极性。垂直层磁矩翻转方向可被x方向的预置电流灵活调控。(f)面内层磁矩的翻转特性曲线。它由图(e)的翻转方向反推得到。

图2. 全电学操作的逻辑单元可编程逻辑运算演示。(a)与门;(b)与非门;(c)非门。

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发