芯片不用反复“归零”：单器件如何直接完成16种逻辑运算？

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/40356.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！

芯片不用反复“归零”：单器件如何直接完成16种逻辑运算？。
华中科技大学游龙教授团队在中国工程院院刊Engineering发表题为Initialization-Free Programmable Spin-Logic Gate in a Single Spin-Orbit Torque Device的研究性文章。该研究聚焦自旋逻辑器件中的一个实际问题：传统器件在执行完整布尔逻辑运算前，通常需要先进行初始化，相当于每次计算前都要先回到起点。这一步虽然常见，却会拉长运算流程，并带来额外能耗。针对这一问题，研究团队提出并实验验证了一种可编程、免初始化的自旋逻辑门，通过将自旋轨道矩效应与面内奥斯特场结合，在单个器件中实现了16种布尔逻辑的即时操作。

为什么初始化会成为逻辑计算里的麻烦步骤？

在传统计算架构中，存储和计算彼此分离，数据在两者之间不断来回搬运，这就是人们熟悉的冯·诺依曼瓶颈。这也是为什么，存算一体技术一直受到关注。而在新一代器件中，自旋轨道矩磁性随机存取存储器（SOT-
MRAM）因为读写寿命长、功耗低、速度快，被认为很有潜力用于存算一体场景。

可问题在于，很多已有的自旋逻辑方案仍然绕不开初始化步骤。如果把一个逻辑器件想象成一台计算器，那么初始化就有点像每算完一题，都要先按一次清零键，才能接着往下算。单看一次，好像问题不大；但一旦进入连续计算场景，这种重复动作就会变成稳定存在的时间和能耗开销。因此，初始化限制了这类自旋逻辑器件在高速连续运算中的效率表现。

给器件加一个方向盘，能不能不再反复归零？

研究团队的思路，不是把初始化做得更快，而是尽量让器件本身不再依赖初始化。为此，他们在传统的重金属/铁磁体异质结SOT器件上方，集成了一条绝缘金导线。这条导线并不只是普通连接线，它更像一个帮助器件判断翻转方向的方向盘。

当电流通过这条金导线时，会在器件局部产生面内奥斯特场；在这个局域磁场的辅助下，底层重金属中的电流再通过SOT效应，驱动铁磁层发生确定性的磁化翻转。也就是说，器件输出不再需要先依赖一个预设好的初始状态，而是可以直接通过输入信号来决定翻转方向和最终结果。在这一过程中，器件上方金导线产生的局部奥斯特场与底层电流诱导的自旋轨道矩共同作用，稳定控制磁化翻转方向（如图1所示）。这样一来，原本必须先做的初始化步骤，就被从逻辑流程中拿掉了。

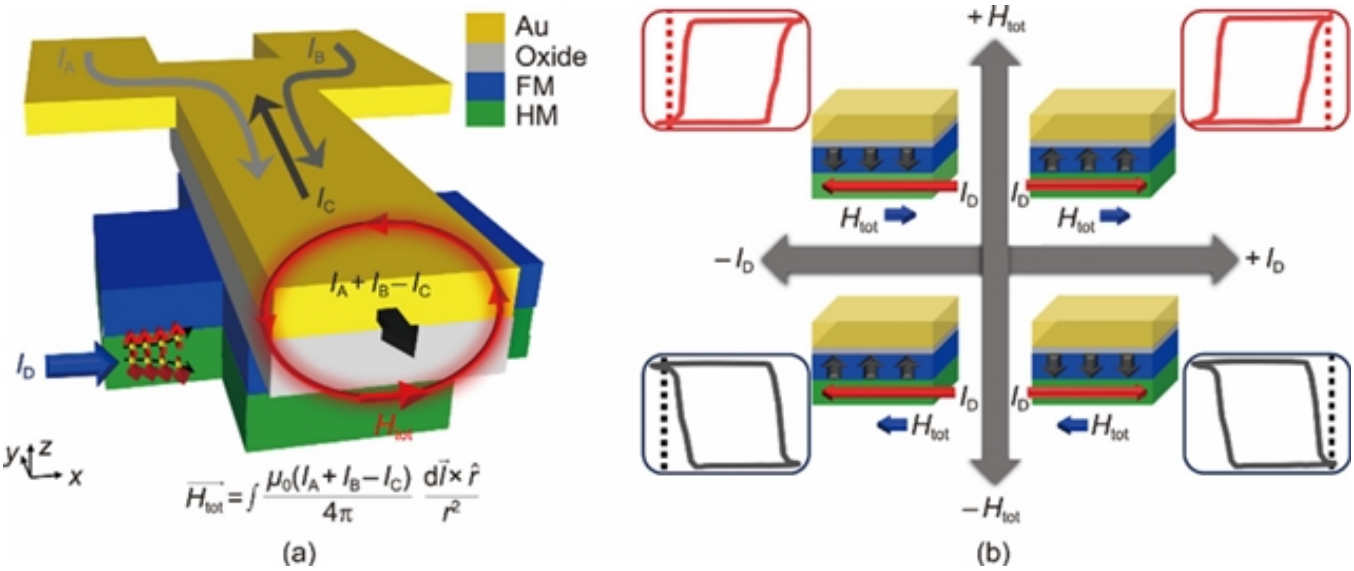


图1.器件结构及工作原理示意图

一个器件，为什么能做完16种布尔逻辑？

有了这种可控翻转机制，接下来的关键就是如何把不同输入映射成不同输出。研究中，这个器件被设计了A、B、C、D四个电流输入端口。不同输入组合会在金导线上形成不同的电流分布，并进一步产生不同的面内偏置磁场。最终，逻辑运算结果体现在器件的反常霍尔效应（AHE）电阻上：高电阻态对应逻辑1，低电阻态对应逻辑0。

这套设计的关键之处在于，它能够即时完成16种完整的布尔逻辑操作，包括AND、OR、NAND、NOR等，而不需要在正式运算前额外插入初始化过程。换句话说，它不再是先复位、再计算的工作方式，而更像是输入一到，结果就跟着出来。对于逻辑器件而言，这种变化并不只是少了一个步骤，而是让整个计算流程变得更紧凑。

连续做一千次，它还能稳定工作吗？

一个逻辑器件能不能真正走向应用，不能只看它能不能做出来，还要看它能不能经得住反复运行。为验证这一点，研究团队对16种逻辑输入组合进行了疲劳测试。在每一种输入条件下，器件都连续完成了1000次写—读循环操作。结果显示，输出电阻值始终稳定保持在预期的高阻态或低阻态区间内，16种组合、总计16000次操作中均未出现失效。

这说明，这种免初始化的自旋逻辑门不仅能够实现逻辑功能，也具备较好的重复性和运行稳定性。对于未来需要高频调用、持续运行的计算器件来说，这一点同样重要。

结果与讨论

这项研究的重点，并不只是在单个器件上做出16种逻辑，而在于它提供了一种新的逻辑实现方式：让自旋逻辑计算尽量摆脱对初始化步骤的依赖。通过把SOT效应与局部奥斯特场结合，研究团队在单器件中实现了可编程、免初始化的完备逻辑功能，并在循环测试中验证了其稳定输出。

从器件设计角度看，这种方案减少了逻辑运算中的冗余环节，也让非易失性逻辑计算更接近紧凑、高效的实现路径。若未来继续推进器件尺寸微缩，并与现代MRAM相关工艺结合，还有望进一步降低驱动电流和整体功耗，同时提升集成密度。对存算一体来说，真正有价值的并不只是能算，而是能以更少步骤完成计算。从这个角度看，这类免初始化逻辑器件提供的是一种更适合连续运算场景的设计思路。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809925001754

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：游龙等 来源：《工程》

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转发