

专题: 应用磁学

可编程自旋逻辑器件及柔性化*

吴可怡¹⁾²⁾ 劳斌¹⁾ 韩雅敏¹⁾²⁾ 李润伟^{1)2)3)†} 汪志明^{1)2)‡}

1) (中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 全省磁性材料及应用重点实验室, 宁波 315201)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

3) (东方理工大学, 宁波 315200)

(2025年11月26日收到; 2025年12月30日收到修改稿)

自旋电子器件因其非易失、高速和超低能耗的特性,有望突破冯·诺依曼架构的性能瓶颈,成为引领下一代可编程逻辑技术的新范式.基于自旋-轨道耦合效应的自旋电子器件是实现可编程逻辑功能的重要发展方向.通过磁电协同操控或全电操控的方式,利用自旋-轨道矩可控地改变磁化状态,可实现逻辑功能的动态重构.结合柔性化工艺,可编程自旋逻辑器件兼具柔性可与重构的逻辑功能,为柔性可穿戴低功耗存算应用奠定了基础.本文主要介绍可编程自旋逻辑器件的发展历程,基于自旋-轨道矩的可编程逻辑器件及柔性化等方面的研究动态,以及对可编程自旋逻辑器件及柔性化方面的未来展望.

关键词: 可编程自旋逻辑, 自旋-轨道矩, 全电操控, 柔性**DOI:** 10.7498/aps.75.20251612**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251612

1 前言

在数据爆发式增长的后摩尔时代,基于电荷自由度的传统冯·诺依曼计算架构因其计算与存储分离的固有模式,正面临“存储墙”与“功耗墙”等能效瓶颈的严峻挑战^[1,2].与此同时,可穿戴设备、人机交互、植入式医疗健康等新兴应用对海量数据实时处理与超低功耗的需求,也超越了传统柔性电子器件基于电荷调控^[3-7]的性能极限.为了突破上述局限,探索后摩尔时代的新型信息处理方案成为学界与产业界的焦点.其中,自旋逻辑器件利用电子的自旋属性而非单一电荷进行信息处理,为实现非易失、存算一体的低功耗计算范式提供了极具潜力的解决方案.进一步结合柔性电子器件制备技术,柔性自旋逻辑器件在摆脱传统刚性基底形态约束的同时,为构建下一代高性能可穿戴设备、生物集成

式诊断治疗平台等应用奠定了核心硬件基础.

自旋电子器件实现逻辑功能的物理基础是利用电荷、自旋和轨道之间的耦合,实现对磁化状态的有效调控,并将不同磁化状态所对应的电阻态差异映射为逻辑状态,从而实现高效逻辑运算.早期的可编程自旋逻辑基于巨磁阻效应(giant magnetoresistance, GMR)或隧穿磁阻效应(tunneling magnetoresistance, TMR)实现,尽管获得了非易失的逻辑态,但磁场驱动的方式使得操控能耗和延迟难以降低^[8,9].为了进一步提升能效并突破速度限制,近年来,基于电流诱导自旋-转移矩(spin-transfer torque, STT)和自旋-轨道矩(spin-orbit torque, SOT)的新型写入机制替代了传统的磁场写入.STT写入的特点在于无需增加新的电流输入端口,且能够操控任意磁化状态.但较大的写入电流和延迟仍然制约着性能的持续提升.SOT写入的速度和能效相较STT可提升约一

* 国家重点研发计划(批准号:2024YFA1410200)和国家自然科学基金(批准号:12174406, U24A6001, 52127803)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: runweili@nimte.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhiming.wang@nimte.ac.cn

个数量级,且器件耐久度也提高至 10^{12} [10-12]. 尽管潜力巨大,但受到对称性的制约,一般情况下单凭 SOT 难以确定性地操控垂直磁化状态,还需通过外加磁场辅助打破对称性[13,14]. 上述方案增加了额外的器件结构和能耗,严重制约 SOT 技术在高集成度、低功耗自旋逻辑电路场景中的大规模应用. 因此,摆脱对辅助磁场的依赖,实现 SOT 对垂直磁化状态的有效操控,是发展非易失、存算一体的低功耗逻辑器件的重要途径.

当前,柔性 SOT 器件的研究主要聚焦于两个方向:一是探究柔性形变与热效应对 SOT 写入性能的影响规律,为推进功能应用提供根本支撑[15-18];二是利用 SOT 写入的优势在柔性平台上集成低功耗、高耐久性的数据存储、处理和感知功能[19-23]. 近期,柔性 SOT 器件在无磁场写入和逻辑功能实现等方面取得关键进展,为低功耗可穿戴存算应用开辟了新路径[20].

基于上述概要,本文将介绍基于 SOT 的可编

程自旋逻辑器件及柔性化相关进展(图 1). 本文的第 2 节将介绍可编程自旋逻辑器件的发展历程,并着重描述基于 SOT 写入的可编程自旋逻辑器件,包括磁电协同操控和全电操控两类方式的研究进展. 第 3 节介绍柔性可编程自旋逻辑器件的相关进展. 最后,对可编程自旋逻辑器件的未来发展进行了展望.

2 可编程自旋逻辑器件

2.1 发展历程

为应对电子系统日益增长的复杂性与设计灵活性需求,自 20 世纪 70 年代起,芯片设计开始由固定逻辑向可编程逻辑演进. 固定逻辑功能在制造时即被固化,任何功能变更均需重新设计芯片,周期长、灵活性差. 可编程逻辑器件支持对其逻辑功能进行重复配置,适配多样化应用场景,其动态重构能力尤其适用于高集成度、低成本、低功耗的多

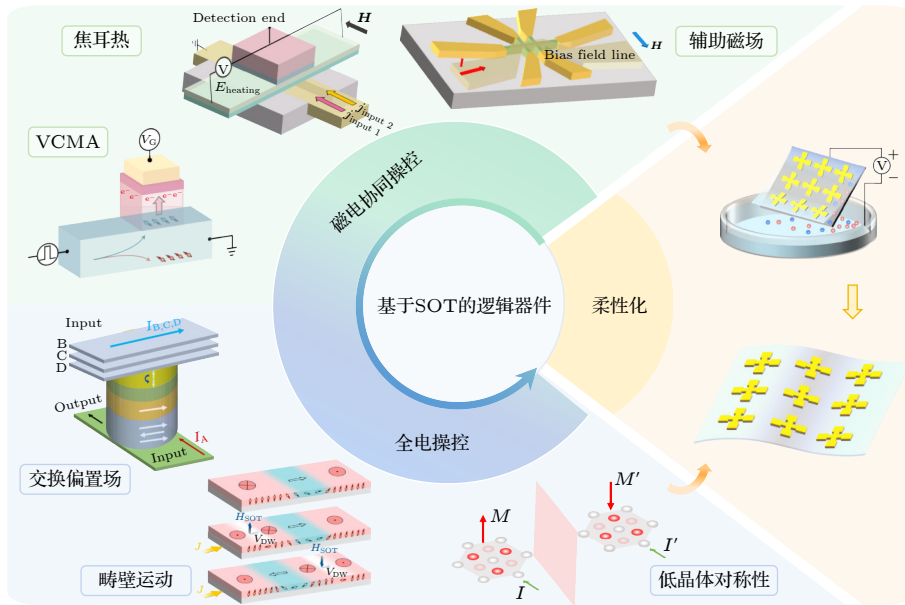


图 1 基于自旋-轨道矩 (SOT) 的可编程自旋逻辑器件,其核心类型包括磁电协同操控与全电操控两类,二者均可通过柔性制备工艺拓展为柔性器件,其中磁电协同操控包括利用辅助磁场、焦耳热、电压调控磁各向异性 (VCMA) 等手段实现垂直磁矩高效、可控的决定性翻转;全电操控包括利用低晶体对称性、交换偏置场、磁畴壁运动等手段实现无需磁场辅助、高效、可控的垂直磁矩翻转;柔性器件旨在利用柔性剥离转移技术拓展自旋逻辑功能的应用场景

Fig. 1. Spin-orbit torque (SOT) based programmable spin logic devices, which mainly divided into two categories of electric current and magnetic field cooperative-driven and all-electric-driven. Both types can be extended into flexible devices through flexible fabrication processes. Specifically, the electric current and magnetic field cooperative-driven includes the utilization of auxiliary magnetic field, Joule heating, voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA) and other means to achieve efficient, controllable and deterministic switching of perpendicular magnetization. The all-electric-driven includes the utilization of low crystal structure, exchange bias, domain wall motion and other means to achieve efficient, controllable and deterministic switching of perpendicular magnetization without using the auxiliary magnetic field. The flexible devices aim to expand the application scenarios of spin logic functionality on flexible platforms by developing exfoliation transfer technology.

功能系统,因而受到广泛关注^[24].进一步通过将自旋属性引入可编程逻辑架构,利用其非易失性实现信息的存储与处理,为发展高性能、超低功耗、兼具瞬时启动与存算一体能力的新一代计算技术提供了变革性路径.

可编程自旋逻辑器件的发展历程始终与自旋电子学的里程碑紧密交织,从 GMR, TMR 效应^[25-27]奠定基础,到 STT 效应^[28,29]提供电学操控手段,再到 SOT 效应^[30-33]进一步优化性能,持续的科学技术创新实现了自旋器件从存储领域向逻辑计算的迈进,推动了非易失、低功耗计算架构的演变.

2003年, Ney 等^[9]提出一种基于磁隧道结单元的可编程逻辑架构,首次在单一器件中实现 AND, OR, NAND, NOR 四种逻辑功能,并构建出全加法器.然而,该设计通过外加磁场改变逻辑状态,存在功耗高、速度慢且难以微缩的根本性局限.2004年, Huai 等^[34]成功实现了 STT 对磁化状态的操控,展示了全电操控逻辑状态的可能性^[35],为构建更高效的自旋逻辑奠定了基础,推动了从“CMOS-自旋混合架构”向“存算一体”方向的演进^[36-40].然而, STT 写入方式仍存在一些局限,如读写路径共享导致的读取干扰、高写入能耗与器件耐久性降低等^[41,42].

基于自旋-轨道矩效应的新型写入方式可以从根本上解决 STT 写入机制的局限性.在该写入方式中,驱动磁化状态的自旋流通过具有自旋-轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC) 相关效应的电极材料产生^[30-33,43].得益于电流、自旋流和自旋极化 3 个方向的正交对称性,电流无需流经逻辑单元便可利用产生的自旋流实现写入操作,从而使写入与读取的路径分离.这一特点不仅从根本上避免了逻辑单元被写入电流击穿的风险,还有效抑制了读取干扰与写入能耗之间的矛盾,显著提升了器件的整体耐久性和稳定性^[10,11].

2.2 基于自旋-轨道矩效应的可编程逻辑

根据铁磁层磁矩的易磁化轴方向,自旋-轨道矩器件主要分为面内磁化的 X, Y 型结构与垂直磁化的 Z 型结构. X, Y 型器件的逻辑单元需要设计成椭圆、长条等形状提高面内磁各向异性 (in-plane magnetic anisotropy, IMA),从而增强热稳定性.其中, Y 型结构的面内易磁化轴与自旋极化方向共

线,因此无需辅助磁场便可操控磁化状态;但缺点在于磁化翻转的延迟较长,难以实现亚纳秒级的操作. X 型结构的面内易磁化轴与自旋极化方向垂直,因此磁化翻转的延迟更低;但缺点在于需要辅助磁场才能实现磁化状态的可控操作^[44,45].此外,面内磁各向异性在逻辑单元小型化后热稳定性会大幅下降,不利于器件的高密度集成.

Z 型器件具有的垂直磁各向异性 (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) 不会随着尺寸减小出现热稳定性降低的问题,且能够被制成更规矩的圆形或正方形,有利于单元尺寸的持续微缩和器件密度的不断提高,更加适合制备成高集成度、低功耗、写入速度快的自旋逻辑器件^[46].然而,由于 Z 型结构的面外易磁化轴与自旋极化方向垂直,存在与 X 型结构相同的境遇,即同时存在极低操控延迟的优势和需要磁场辅助操控的问题.该问题的根本在于,在写入过程中, SOT 会将磁矩拉至与自旋极化 y 方向平行的状态^[47,48].写入结束后,磁矩在热扰动的作用下重新回到 $\pm z$ 方向的易磁化轴.由于此时 $\pm z$ 方向的能量相对 y 方向简并,即具有高对称性,磁矩会随机回到 $+z$ 或 $-z$ 方向,导致操作结果无法确定.因此,实现 Z 型结构磁化状态的确定性操作,也就是探索打破对称性的有效途径,是需要解决的核心问题.利用磁矩是一种轴矢量的特点,目前已经发展了通过外加磁场,以及设计低对称结构、构建内建等效场、采用低对称晶体材料等多种方式打破对称性,从而在 Z 型器件中实现可控的逻辑操作^[49-51].

2.2.1 磁电协同操控自旋逻辑器件

基于磁场辅助的 SOT 操控方式,韩秀峰课题组^[52,53]于 2017 年率先通过实验证实了可编程、多功能自旋逻辑器件的可行性.如图 2(a) 所示,通过输入电流方向以及辅助磁场的大小、方向作为操作变量,在单个霍尔十字器件中实现了 AND, OR, NOT, NAND, NOR 五种逻辑功能.具体的操作过程可分为两步,首先通过输入电流设置初始磁化状态,然后再次输入既定的电流作为变量,实现逻辑操作.为了降低全局辅助磁场对自旋逻辑器件阵列化的干扰并减少初始化脉冲带来的写入延迟,2020 年 Lim 等^[54]提出一种局部施加辅助磁场与无需初始化的可重构逻辑方案.他们的器件结构如图 2(b) 所示,底部为两个电流输入通道的双霍尔

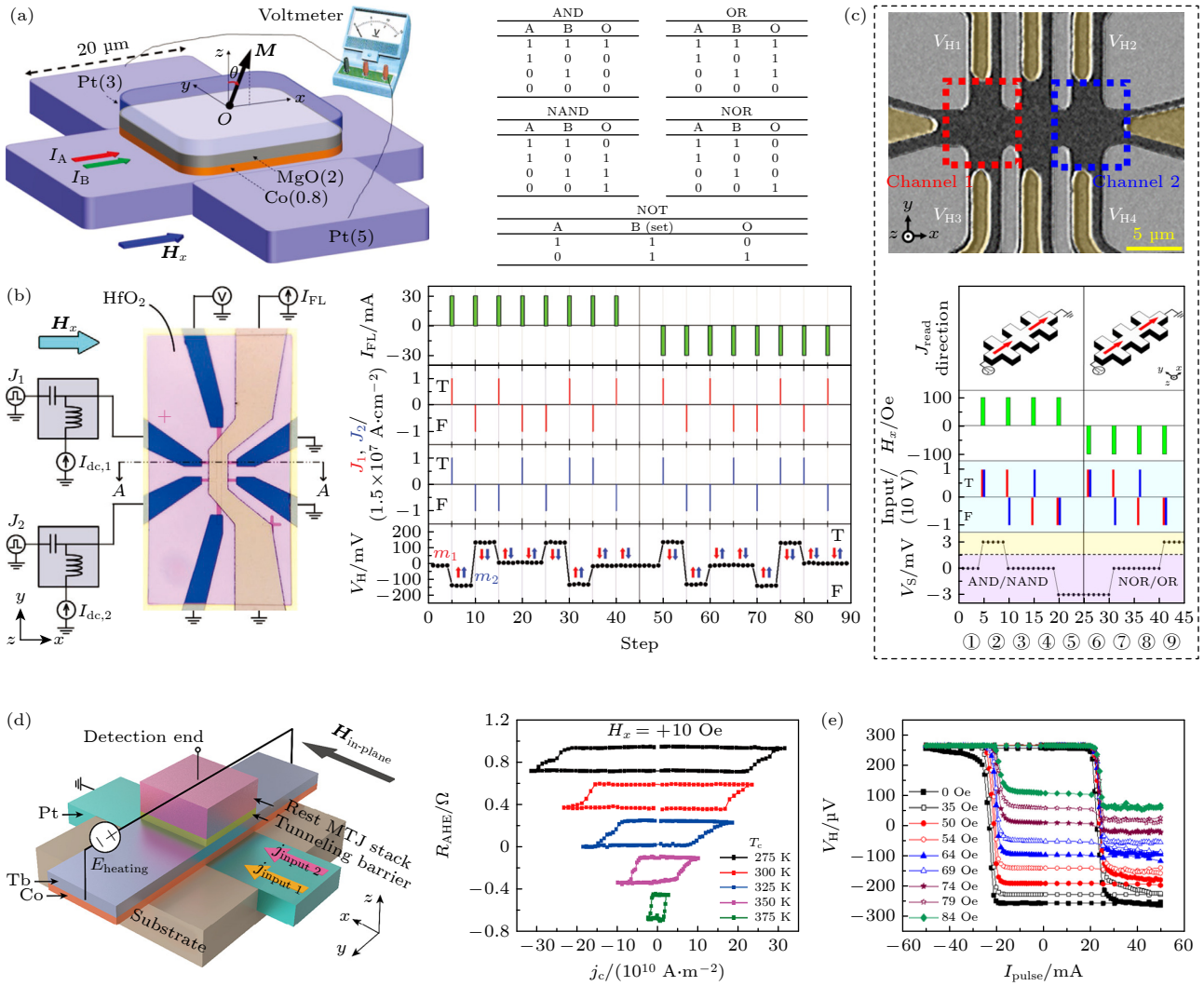


图 2 磁电协同操控的自旋逻辑器件 (a) Pt/Co/MgO 器件结构示意图 (左侧), 5 种逻辑门真值表 (右侧) (出自文献 [53], 已获得授权); (b) 可产生局域磁场的双通道自旋逻辑器件 (左侧); 反常霍尔电压与输入电流 I_{FL} , J_1 , J_2 的关系示意图 (右侧) (出自文献 [54], 已获得授权); (c) 由 3 个霍尔十字构成的双通道自旋逻辑器件 (上方); 多种逻辑门的真值表 (下方) (出自文献 [55], 已获得授权); (d) 热辅助写入的自旋逻辑器件 (左侧); 临界电流密度与加热温度的依赖性 (右侧) (出自文献 [58], 已获得授权); (e) 不同面外磁场辅助下的 R_{HE} - I 曲线图 (出自文献 [60], 已获得授权)

Fig. 2. Spin logic devices controlled via synergy of electric current and magnetic field: (a) Schematic diagram of Pt/Co/MgO device structure (left) and the truth tables of 5 types of Boolean logic gates (right) (reproduced with permission from Ref. [53]); (b) a dual-channel spin logic device with integrated magnetic field generator (left); the relationship between anomalous Hall voltage and input current I_{FL} , J_1 , and J_2 (right) (reproduced with permission from Ref. [54]); (c) the dual-channel spin logic device consisted of three Hall cross (upper) and the truth tables of multiple logic gates (bottom) (reproduced with permission from Ref. [55]); (d) Joule heating assisted spin logic device (left); heating temperature dependent writing threshold current density (right) (reproduced with permission from Ref. [58]); (e) the R_{HE} - I curves under different out-of-plane magnetic fields (reproduced with permission from Ref. [60]).

十字, 顶部是用于产生局域辅助磁场的电流通路, 中间用绝缘层隔离. 通过“改变输入电流调整磁化状态、固定电压读取方式”和“预设输入电流固定磁化状态、改变电压读取方式”两种操作模式, 并将输出的电压信号二值化, 实现了 6 种逻辑门输出. 如图 2(c) 所示, Shin 等 [55] 基于上述方式, 增加霍尔十字的数量实现了三态差分输出, 将逻辑门输出

提高至 8 种. 最近, Lin 等 [56] 进一步通过 3 个端口输入电流产生局域辅助磁场, 有效地增加了操控磁化状态的输入变量, 实现了单个器件单元的 16 种完备布尔逻辑功能, 为内存计算架构下自旋逻辑的规模化、多功能化应用提供了全新路径.

基于对降低操作功耗和增加可输入变量的考虑, 2018 年 Baek 等 [57] 首次提出电压控制 SOT 磁

化翻转的互补逻辑器件方案, 其核心单元为 Ta/CoFeB/MgO/AlO_x 异质结构. 他们通过电压控制磁各向异性 (voltage-controlled magnetic anisotropy, VCMA) 的方式来降低能量势垒, 从而降低操控所需的临界电流 (或辅助磁场); 并通过调控 AlO_x 的氧化状态来控制器件的 n/p 特性 (即使器件对正负栅压产生相反的输出响应), 协同实现了互补逻辑功能. 文中还演示了由一个 n 型器件与两个 p 型器件构成的自旋逻辑半加器, 相比传统 CMOS 方案具有面积小、能耗低、可重构等优势, 为非易失性自旋逻辑电路设计提供新思路.

此外, 增加磁性层数量, 以及在写入操作中引入定量的焦耳热和面外磁场, 也能够丰富器件的输出状态. Zheng 等^[58] 利用 Co/Tb 界面亚铁磁性对温度敏感的特性, 在如图 2(d) 所示的器件中, 通过输入电压产生焦耳热的方式改变磁能量势垒, 从而调控临界电流的大小. 因此, 他们将产生焦耳热的电压和写入电流的大小以及辅助场方向作为输入变量, 在单个器件中实现了 6 种可重构逻辑门. Zhu 等^[59] 通过改变三周期 Pt/Co 多层膜结构中的磁各向异性实现霍尔电压的 4 态输出, Posti 等^[60] 通过引入面外磁场实现写入操作后的多磁畴态 (图 2(e)), 均在单个器件中获得了存算一体和多态逻辑的功能性. 器件的多态特性不仅提高了存储密度和信息容量, 还能实现更复杂、更高效的逻辑功能.

上述方法通过材料、结构与机制等方面持续优化了器件的逻辑功能与操作功耗, 但仍未完全摆脱对辅助磁场的依赖. 因此为了获得更低功耗、更高集成度的自旋逻辑器件, 探索无需磁场辅助的全电操控磁化状态的方案势在必行.

2.2.2 全电操控自旋逻辑器件

“全电操控”的理念在于仅通过施加电流/电压的方式实现逻辑运算过程中写入、运算和读出的全过程, 核心思路是通过在器件中引入等效的电/磁场, 替代辅助磁场打破对称性. 目前已证实可通过层间交换耦合、横向界面电场、低对称材料产生的非常规自旋流、自旋流梯度以及利用电压控制磁各向异性效应等手段实现全电操控的逻辑功能^[54,57,61-66]. 全电操控的研究除了着眼于将磁化状态作为一个整体以追求极致的单元小型化与开关确定性之外, 还巧妙利用磁化翻转过程中的多畴状

态承载与传递信息, 展现出独特的计算潜力.

2018 年, Wang 等^[62] 在如图 3(a) 所示的 SiO₂/Pt/Co/Ru/Co/Pt 结构中, 通过底部垂直磁各向异性的 Co 和顶部面内磁各向异性的 Co 之间的层间交换耦合作用打破对称性, 分别操控两层 Co 的磁化状态, 实现了 AND, NAND, NOT 三种布尔逻辑门. 除了铁磁层之间的层间交换耦合, 铁磁/反铁磁结构的交换偏置也能打破对称性, 达到全电操控磁化状态的目的. 2021 年, Dong 等^[67] 在 IrMn/Co/Ru/CoPt 结构中, 利用 Co 与 CoPt 的层间交换耦合、Co 与 IrMn 的面内交换偏置, 在单个器件中实现了全电操控的 4 个非易失输入状态. 并在此基础上通过“初始化-写入-读取”的步骤, 实现了完备的 16 种布尔逻辑门. Zhao 等^[63] 在上述结构中, 在 IrMn 一侧引入重金属层 Pt, 通过 SOT 操控 IrMn 的磁化状态实现了交换偏置方向的可控预设 (图 3(b)). 如图 3(c) 所示, Fan 等^[61] 进一步在上述结构上增加一层 CoO 与 CoPt 形成反铁磁耦合, 产生额外的面外交换偏置场. 该器件通过控制输入的电流大小能够阶梯式改变 CoO 层的磁化翻转比例, 产生 10 种磁阻状态, 并通过改变双通道电流的大小作为输入变量, 实现了 10 种布尔逻辑门 (图 3(d)). 这种具备双交换偏置的器件结构, 集多态存储与逻辑运算功能于一体, 仅需 3 个单元便可构建一个半加法器, 突破了传统方案需 18 个晶体管的限制^[68]. Zhao 等^[69] 和 Yang 等^[70] 在兼具垂直和面内磁各向异性的结构中, 利用 T 型器件的操控手段预设面内磁性层的磁化状态, 结合异界面的奈尔橘皮效应 (Néel orange-peel effect) 提供对称性破缺场, 并通过 3 个输入电流的加权控制面外磁性层的磁化状态, 在单一器件上成功实现了 5 种可编程布尔逻辑功能^[69]. 此外, Koh 等^[71] 通过在霍尔十字区域构建不同尺寸的磁性单元阵列, 利用各单元不同的磁化翻转临界电流实现离散的多级阻态 (例如 9 个单元可产生 11 个稳定的电阻态). 因此, 通过调节输入电流幅值, 并利用结构中产生的漏磁场, 能够在零磁场下获得预期的电阻态, 既能实现 AND, OR 等逻辑运算, 又能模拟神经突触的增强与抑制特性.

除了利用层间内建场, 对器件结构进行对称性设计也是一种行之有效的全电操控手段. 2020 年, Cao 等^[72] 利用激光局部退火的方式使 Pt/Co/Pt 结构中的原子发生迁移, 形成打破横向对称性的异

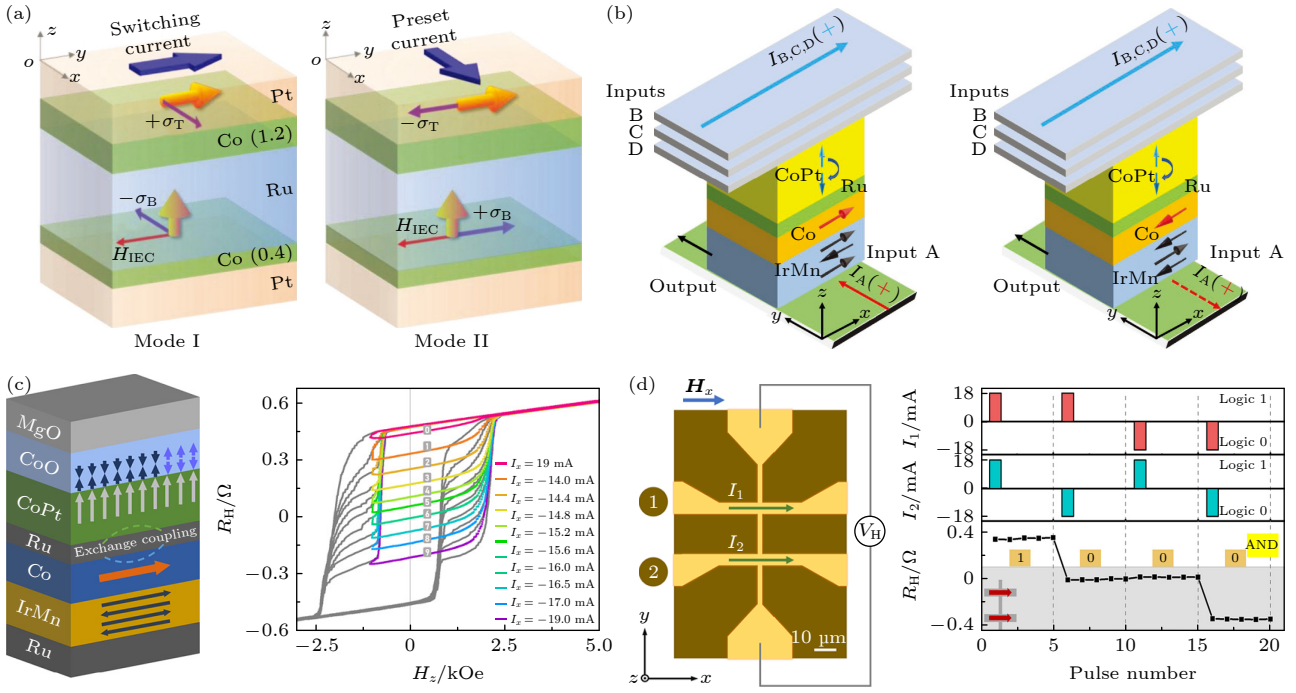


图 3 基于内建场的全电操控自旋逻辑器件 (a) 基于层间交换耦合的器件结构示意图 (模式一为单独驱动垂直磁 Co 层的磁化翻转, 模式二为单独驱动面内磁 Co 层的磁化翻转)(出自文献 [62], 已获得授权); (b) 具有 IrMn/Co 交换偏置、Co/CoPt 层间交换耦合的器件结构示意图 (出自文献 [63], 已获得授权); (c) 具备双交换偏置的 IrMn/Co/Ru/CoPt/CoO 器件结构示意图 (左侧); 非易失性的 10 种磁阻态 (右侧)(出自文献 [61], 已获得授权); (d) 具备双通道电流输入的器件结构示意图 (左侧) 以及“AND”门操作演示图 (出自文献 [61], 已获得授权)

Fig. 3. Built-in fields based all-electric-driven spin logic devices: (a) Schematic of device structures included the interlayer exchange coupling effect (Mode I: only the bottom perpendicular Co layer is switchable; Mode II: only the in-plane Co layer is switchable) (reproduced with permission from Ref. [62]); (b) schematic of the device structure included the exchange bias and interlayer exchange coupling effects (reproduced with permission from Ref. [63]); (c) the IrMn/Co/Ru/CoPt/CoO device structure with dual-exchange bias effect (left) and 10 non-volatile magnetic resistance states in this heterostructure (right) (reproduced with permission from Ref. [61]); (d) schematic diagram of the device with dual-channel current paths (left) and experimental realization of AND logic function (right) (reproduced with permission from Ref. [61]).

质界面. 通过控制激光退火的区域改变界面的位置, 实现了翻转极性可控的全电操控磁化翻转. 基于此, Zhang 等 [73] 通过组合 3 个退火单元实现了半加法器功能 (图 4(a)). 进一步将磁化状态视为逻辑输入, 通过调整电流大小实现了无需初始化状态的逻辑门操作, 并展示了其作为可编辑自旋逻辑和存算一体单元的可能性. 此外, 通过低对称的电流端口设计使电场形成非均匀分布 [74] 以及自旋源层的低对称结构设计 [75], 都能够产生自旋电流梯度打破对称性. 如图 4(b) 所示, 通过选择相应的电流端口改变电场的空间分布, 可以产生梯度相反的自旋电流, 实现翻转极性可控的全电操控磁化状态. 如图 4(c), (d) 所示, Huang 等 [76] 和 Wang 等 [64] 通过倾斜沉积的方式制备具有横向成分梯度的 TaTi 和 $L1_0$ -FePt 合金打破对称性, 演示了可编程的布尔逻辑操作; 进一步通过级联两个 $L1_0$ -FePt 器件,

设置写入电流的时序、大小和方向, 在单层材料中实现全加法器功能. 2019 年, Chen 等 [77] 发现界面 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI) 也能够打破对称性, 实现全电操控磁化翻转. 在此基础上, 引入器件结构在空间分布上的非对称可以进一步通过改变驱动电流的方向/幅值影响翻转的极性/程度, 达到增加输入变量、赋予器件可编程逻辑能力的目的 [78-80]. 例如, Shi 等 [78] 模拟了不同电流方向对非对称圆柱形磁隧道结中磁化翻转的行为差异, 并以此编码出 16 种布尔逻辑功能.

除了器件对称性, 利用一些特殊材料也能实现全电操控. 例如利用 PtW 合金中 Pt 和 W 符号相反的自旋霍尔角性质产生竞争自旋流 [81,82], 可通过预设初始磁化状态在单一器件中实现全电操控 NAND、NOR 逻辑门, 两个器件组合后可实现 XNOR

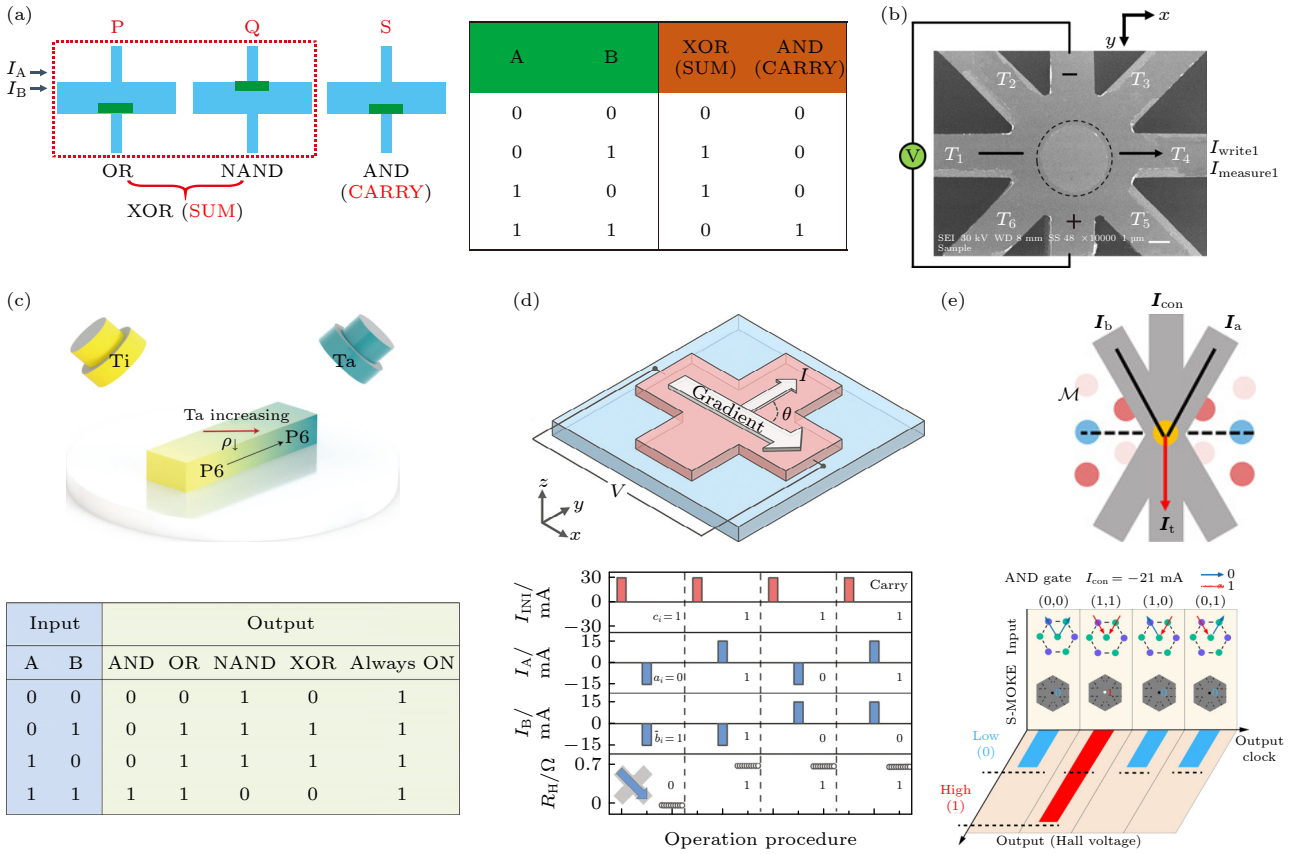


图 4 基于对称性设计的全电操控自旋逻辑器件 (a) 由 3 个激光局部退火的 SOT 单元组成的半加器示意图与真值表 (出自文献 [73], 已获得授权); (b) 具备多端电极的器件结构实物图 (出自文献 [74], 已获得授权); (c) 沉积具备横向成分梯度 TaTi 合金示意图 (上方) 和 “AND”, “OR”, “NAND”, “XOR” 和 “Always ON” 逻辑门真值表 (下方) (出自文献 [76], 已获得授权); (d) 成分梯度 $L1_0$ -FePt 器件示意图 (上方) 以及进位函数的实验结果 (出自文献 [64], 已获得授权); (e) 基于电流矢量加法机制的自旋逻辑器件示意图 (I_{con} 为确定磁矩初始状态的初始化操作电流; I_a , I_b 为进行逻辑的输入电流, I_t 为由输入电流矢量和得到的总电流) (上方); “AND” 逻辑门真值表 (出自文献 [65], 已获得授权)

Fig. 4. All-electric-driven spin logic devices based on the symmetric design: (a) Schematic diagram and the truth table of a half adder consisting of three laser annealed SOT units (reproduced with permission from Ref. [73]); (b) physical image of a spin logic device with multiple terminals (reproduced with permission from Ref. [74]); (c) schematic of the deposition process of compositional gradient TaTi alloy (upper) and the truth tables of “AND”, “OR”, “NAND”, “XOR”, and “Always ON” Boolean logic gates (bottom) (reproduced with permission from Ref. [76]); (d) schematic diagram of $L1_0$ -FePt spin logic device with compositional gradient (upper) and the experimental result of carry operations (bottom) (reproduced with permission from Ref. [64]); (e) the spin logic device based on current vector adder mechanism (where I_{con} is used to initial the magnetization state before every operation; I_a and I_b are the input currents for the logic operation; I_t represents the total current of the current vector sum) (upper); the truth table of the “AND” gate (bottom) (reproduced with permission from Ref. [65]).

逻辑门并构建二进制神经网络, 用于识别手写数字图像 [83]. 利用 $L1_1$ -CuPt 合金中的晶体结构低对称性也能够进行全电操控, 并且得益于该材料的六方晶格结构, 可以通过输入电流的方向控制磁化翻转极性 [84]. 利用上述特点, Zhao 等 [65] 提出一种电流矢量加法机制, 将电流方向作为输入和输出变量, 在单一器件中实现了多种逻辑门, 并通过级联两个器件构建出全加器功能 (图 4(e)).

相较于对磁矩的整体操控, 构建多磁畴状态并通过磁畴壁移动 (domain-wall motion, DWM) 操

控磁化状态, 可以丰富自旋逻辑器件的功能性. 基于 DWM 的自旋逻辑主要分为三步实现逻辑操作: 1) 输入端磁畴壁的形成 (写入操作); 2) 磁畴壁的移动 (逻辑操作); 3) 输出端磁畴壁状态的读取 (数据输出) [85].

基于异质界面 DMI 可形成奈尔型磁畴壁, 并可仅通过电流驱动 DWM 的发现 [86], Luo 等 [87] 提出了一种全电驱动 DWM 实现可重构自旋逻辑功能的架构. 在具有面内 (面外) 磁化区域的 Pt/Co/Al(AlO_x) 纳米线中, 利用磁畴壁在两个磁化区域

中的 DMI 手性耦合构建出 NOT 门; 并可通过控制偏置端口的磁畴壁手性实现可重构的 NAND/NOR 门, 以及进一步通过级联 NAND 门构建出 XOR 门和全加器. 相较传统 DWM 需要额外引入钉扎位点实现磁畴壁的往复运动, 该方案利用界面 DMI 形成的固定手性耦合来约束, 更加的稳定且高效. 如图 5(a) 所示, Wang 等 [88] 利用 Pt/Co/Ru 结构中的强 DMI, 结合多端口电流输入控制电场分布, 也能够在不额外引入钉扎位点的前提下实现可控的 DWM, 成功构筑了新型双导电沟道自旋存内计算器件, 实现了 4 种布尔逻辑功能. 此外, Lin 等 [89] 通过预设 4 个钉扎位点, 结合 SOT+DMI 的

操控方式, 研发出具有 4 个离散阻态的器件, 可实现全部 16 种布尔逻辑功能, 且器件具备低功耗、读写延迟低、与 CMOS 兼容的特性 (图 5(b)). 最近, Chen 等 [90] 以层间交换耦合作为对称性破缺手段, 通过在霍尔端口输入电流作为新变量改变电场分布, 定向驱动特定区域的多磁畴态演化, 在单器件中获得了 6 种布尔逻辑门. Li 等 [91] 通过离子注入方式在霍尔十字区域构建横向异质界面, 一方面打破对称性, 另一方面诱导出界面磁场. 进一步利用 SOT 有效场 (平行电流方向) 与界面磁场 (垂直电流方向) 之间的竞争效应, 在不改变电流方向、仅改变电流大小的情况下驱动磁畴壁移动往复运

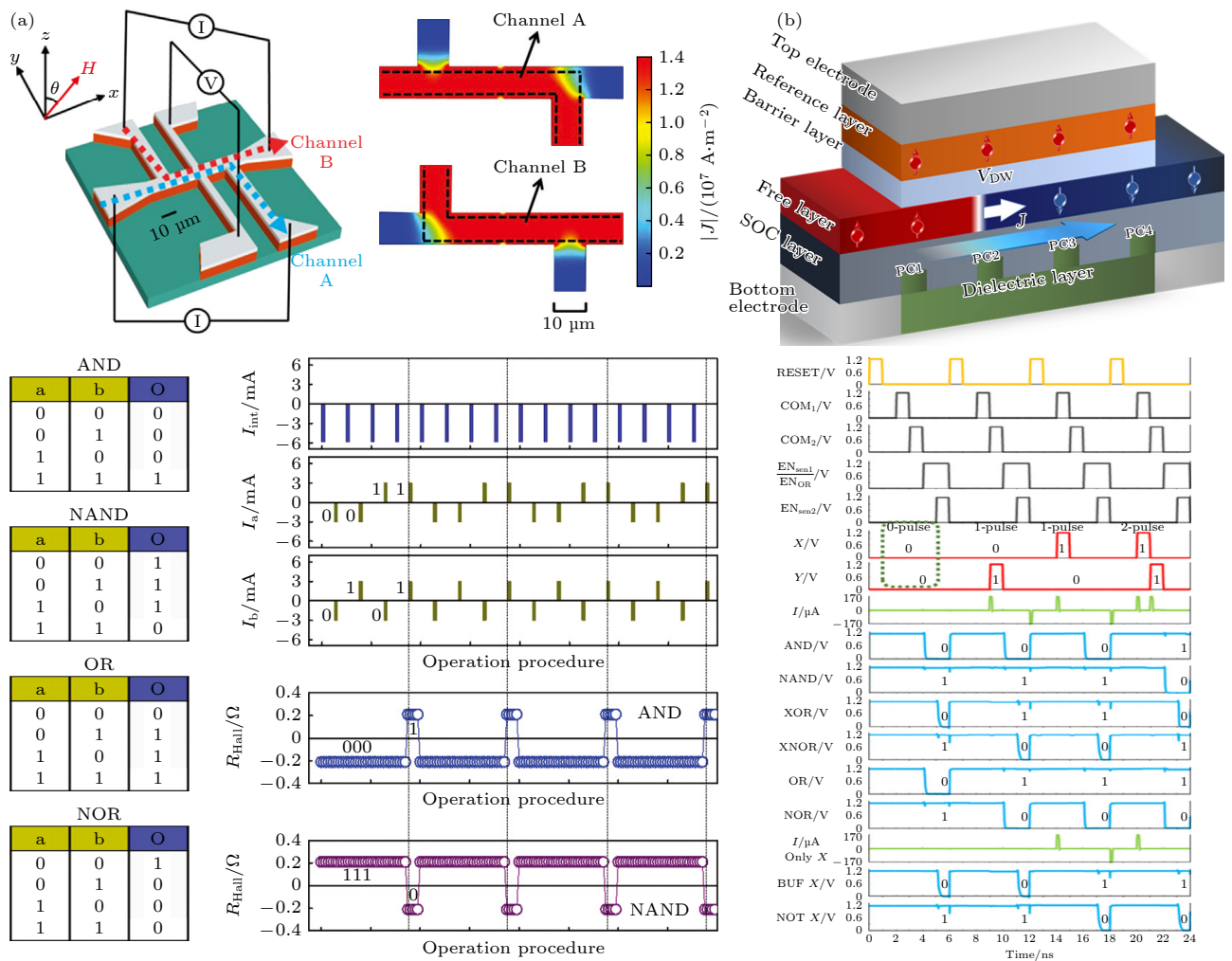


图 5 基于磁畴壁移动的自旋逻辑 (a) 具备双 L 形导电通道的器件示意图与有限元模拟获得的双通道电流密度分布图 (上方), “AND”, “NAND”, “OR” 和 “NOR” 的真值表以及实现 “AND”, “NAND” 逻辑操作的实验过程 (下方) (出自文献 [88], 已获得授权); (b) SOT 驱动的多态磁畴壁移动器件示意图 (上方) 和 16 种布尔逻辑操作 (下方) (出自文献 [89], 已获得授权)

Fig. 5. Spin logic devices based on domain-wall motion (DWM): (a) The device with dual L-shaped conductive channels and the current density distribution in the dual channels obtained by finite element simulation (upper); truth tables of “AND”, “NAND”, “OR”, and “NOR” Boolean logic gates and the experimental process of “AND” and “NAND” logic operations (bottom) (reproduced with permission from Ref. [88]); (b) schematic of SOT driven DWM logic device (upper) and 16 types of Boolean logic operations (bottom) (reproduced with permission from Ref. [89]).

动, 实现了无辅助磁场的高低电阻态切换, 并基于该特性在单个器件中获得了 XOR 逻辑功能.

3 柔性自旋逻辑器件

可穿戴设备、医疗监护及物联网等应用场景的兴起, 催生了海量数据在人机交互场景下的处理与存储需求 [92,93], 柔性自旋逻辑器件制备技术是实现这一需求的重要技术路径. 该技术旨在将自旋电子器件的非易失性和低功耗特性, 与柔性电子器件的可弯曲拉伸特性相结合, 为实现下一代存算一体柔性智能系统奠定硬件基础.

为了将自旋逻辑功能应用到柔性场景, 器件的柔性化制备是关键之一. 实现柔性化的工艺可分为直接生长法和剥离转移法两条路径. 直接生长法工艺简便, 即先在柔性衬底上直接沉积功能薄膜来实

现柔性化, 再加工成器件. 常见的柔性衬底有 PI, PET, PENC, PDMS 等有机物衬底 [22,94,95], 以及云母等层状结构无机物衬底 [17,96-99]. 有机衬底泛用性强, 可以通过选择不同的杨氏模量匹配不同的应用场景, 但不耐高温且无晶向是其不足之处, 导致材料选择受限 (例如 Pt/Co/Ta [94], Pt/Co [22], CoTb [21] 等非晶金属薄膜). 云母衬底可弥补上述不足, 用来制备性能优异、但制备条件相对苛刻的单晶材料, 例如 Gong 等 [98,99] 和 Chen 等 [96] 在大于 436 °C 的高温条件下获得了柔性单晶氧化物薄膜和氮化物薄膜. 剥离转移法通过将刚性衬底上的高质量单晶薄膜或器件转移至柔性衬底, 亦或是将在刚性衬底上制备完成的柔性衬底/器件整体剥离, 从而实现柔性化. 该法可达到兼顾材料性能和应用场景的目的, 其关键技术在于如何实现刚性衬底与转移部

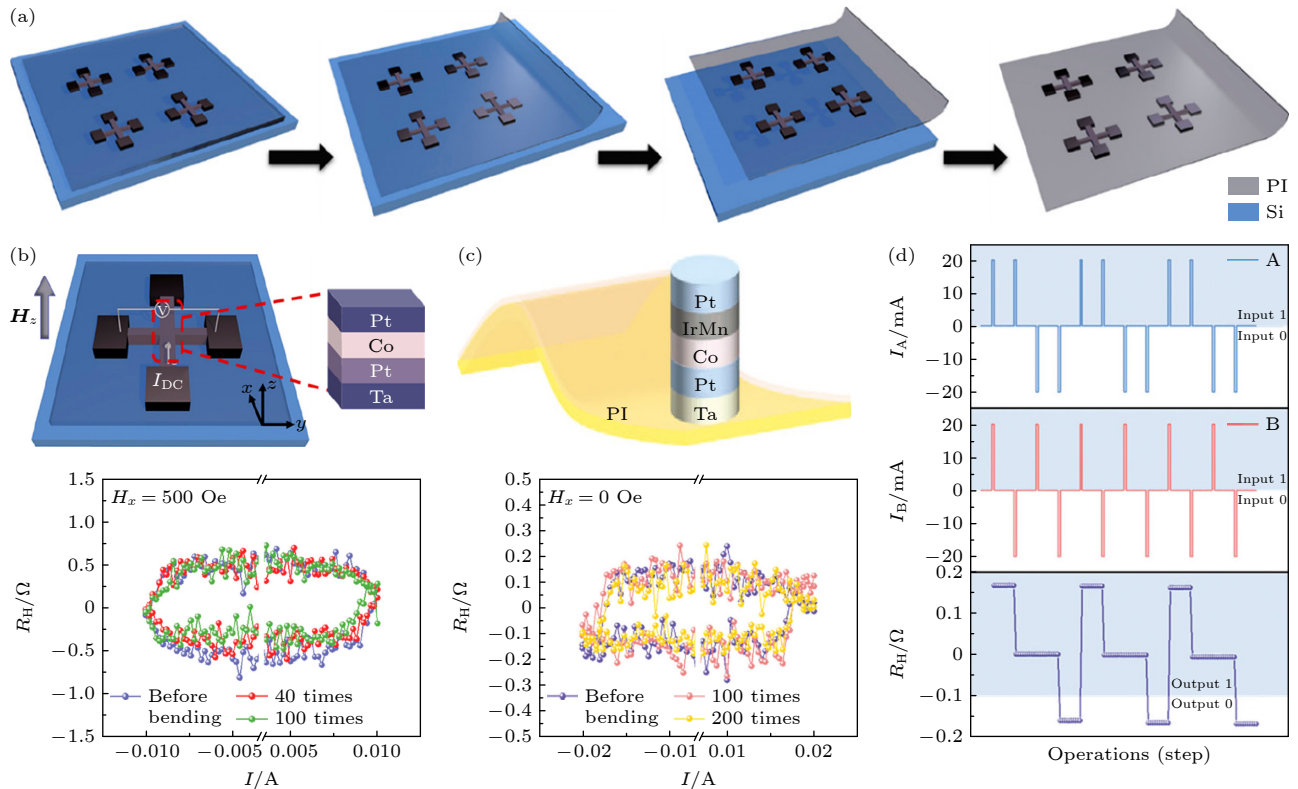


图 6 柔性自旋逻辑器件 (a) 毛细管辅助电化学分层工艺制备 PI 衬底上柔性自旋电子器件示意图 (出自文献 [19], 已获得授权); (b) PI/Ta/Pt/Co/Pt 器件结构示意图及在 500 Oe 条件下多次弯曲形变前后的磁化翻转 (出自文献 [19], 已获得授权); (c) PI/Ta/Pt/Co/IrMn/Pt 器件结构示意图及多次弯曲形变前后的无场决定性磁化翻转 (出自文献 [20], 已获得授权); (d) 无场条件下实现的“OR”逻辑门 (出自文献 [20], 已获得授权)

Fig. 6. Flexible spin logic devices: (a) Schematic diagram of the capillary-assisted electrochemical delamination process to obtain flexible spintronic devices on the PI film (reproduced with permission from Ref. [19]); (b) schematic diagram of the PI/Ta/Pt/Co/Pt device structure and the magnetization switching after multiple bending cycles at 500 Oe (reproduced with permission from Ref. [19]); (c) schematic diagram of the PI/Ta/Pt/Co/IrMn/Pt device structure and the field-free magnetization switching after multiple bending cycles (reproduced with permission from Ref. [20]); (d) an OR logic gate without external field (reproduced with permission from Ref. [20]).

分的分离^[100,101]. 目前发展的分离手段有基于激光、离子束、等离子体等的物理刻蚀法, 也有通过在衬底与功能层间引入水溶性 (如 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ^[102]、 $\text{Ca}_x\text{Sr}_{3-x}\text{Al}_2\text{O}_6$ ^[103])、酸溶性 (如 $\text{SrCoO}_{2.5}$ ^[104]) 以及其他 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ^[105]、 SrRuO_3 ^[106]、 BaO ^[107] 等牺牲层的化学刻蚀法, 以及利用电化学反应和毛细力现象实现旋涂的柔性衬底与刚性衬底分离的毛细管辅助电化学分层法^[108].

在柔性自旋电子器件的研究进程中, 热效应被证明是降低写入功耗的重要机制. 相对于常规刚性衬底较高的热导率 (例如 Si/SiO_2 约为 139 W/mK , SrTiO_3 约为 12 W/mK), 低热导率的柔性衬底 (例如 PI 约为 1 W/mK , 云母约为 0.5 W/mK) 能够有效累积电流伴随产生的焦耳热, 以此降低翻转过程中的磁能量势垒, 从而降低写入功耗^[18,98]. 此外, 应变调控是柔性自旋电子器件的核心研究方向之一. 利用拉伸、弯曲等手段施加应变可对器件的磁性和自旋输运性质进行调控, 如 Chen 等^[94]、Chouhan 等^[109] 和 Liu 等^[17] 分别在 PI ^[94,109] 和云母^[17] 衬底上观测到自旋霍尔角随应变增加, 有利于降低磁化翻转的临界电流密度. Li 等^[23] 发现弯曲应变会影响矫顽力、临界翻转电流和翻转阻态, 并利用应变-阻态之间的关系实现了应变传感功能, 用于检测人体关节的弯曲情况. 柔性自旋逻辑器件的实用化离不开对动态弯曲场景性能稳定性的探索. 2015 年, Lee 等^[15] 对 PENC 衬底上的 $\text{Pt}/\text{Co}/\text{MgO}$ 结构施加应变, 在弯曲半径为 $20\text{--}30 \text{ mm}$ 的拉伸/压缩应变下, 磁化翻转特性无显著变化. 近期, Wang 等^[21] 报道了在曲率半径 $\geq 10 \text{ mm}$ 及 100 次弯曲循环的应变下, PI 衬底上 Pt/CoTb 器件仍保持垂直磁各向异性与翻转特性的稳定. 这些研究进展为柔性自旋逻辑器件的制备提供了可行性. 2023 年, Li 等^[19] 首次展示了一种非易失性、低功耗、可编程的柔性自旋逻辑器件. 如图 6(a) 所示, 他们采用毛细管辅助电化学分层法, 成功研究了从硅衬底上剥离的 $\text{PI}/\text{Ta}/\text{Pt}/\text{Co}/\text{Pt}$ 结构的 SOT 性能. 结果表明, 经过剥离转移工艺和多次弯曲后, 器件仍能保持良好的性能 (图 6(b)). 在此基础上, 他们通过辅助磁场和输入电流的协同输入, 构建了可编程的二元逻辑器件, 实现了 AND, NAND, NOT, NOR 和 OR 五种布尔逻辑门. 此外, 他们进一步在结构中引入如图 6(c) 所示的反铁磁 IrMn , 利用界面交换偏置打破对称性, 并通过级联两个单元和控制输入电流

的路径和方向, 首次在柔性架构中实现了 5 种布尔逻辑功能的全电操控^[20] (图 6(d)).

4 展 望

本文系统介绍了基于自旋自由度的可编程逻辑器件发展历程. 重点阐述了利用 SOT 作为写入方式, 实现可编程自旋逻辑功能的研究进展. 其中全电操控方式克服了传统 SOT 器件对辅助磁场的依赖, 为实现高效、高集成度的自旋逻辑芯片奠定了坚实的基础. 然而, 为了充分挖掘自旋自由度在性能和功能上的潜力、实现真正的应用落地和应用场景的不断延伸, 未来的研究仍需在以下 3 个层面持续深化.

首先在材料层面上, 采用传统重金属材料产生自旋流的方式一直面临着功耗难以降低的困扰. 近期的研究发现具有更大自旋霍尔角的拓扑材料^[110-115]、二维材料^[116-122] 等先进体系, 能够降低磁化翻转临界电流密度 1—2 个数量级. 同时, 一些材料在满足高自旋霍尔角的基础上, 还具有晶体结构的低对称性, 能够替代结构界面设计等手段提供内禀的对称性破缺. 最近, 人们发现电子携带的轨道角动量也可以产生显著的 SOT, 驱动磁矩翻转. 产生轨道流的轨道霍尔效应不依赖于材料的自旋-轨道耦合, 广泛存在于包括轻金属的多种材料中, 且相比自旋霍尔效应更强^[123,124]. 因此发展轨道霍尔材料和相关器件有望进一步降低器件写入功耗和电流. 将上述体系用来构筑自旋逻辑单元, 可以从源头上解决操控电流和施加辅助磁场两方面的能耗问题, 并降低单元阵列的设计和制备难度, 为构建低功耗、高集成度的逻辑器件提供新途径.

其次在核心机制上, 可引入多物理效应协同构建自旋逻辑的全范式. 目前大部分自旋逻辑器件通常只使用自旋作为内部运算的载体, 在逻辑门的状态仍然由电荷表示, 因此需要额外的硬件结构来不断转换自旋-电荷信息, 这部分抵消了自旋作为状态变量进行逻辑运算的优势. 为了解决上述问题, 一种由自旋写入和自旋传输进行逻辑状态级联的全自旋逻辑器件 (all-spin logic device, ASLD) 被提出^[125], 为构建完全不依赖电荷载流子的可级联逻辑系统提供了理论蓝图. 然而这种器件存在着自旋流传输耗散快、能耗潜力受限等问题, 在提出之后一段时间内没有得到充分的实验支撑. 近期的研究表明磁电耦合效应与自旋霍尔效应的协

同作用可解决全自旋逻辑器件存在自旋流快速耗散的问题, 可实现超低电压、超低能耗、长通道兼容的自旋逻辑功能^[126]. 此外, 引入磁电-自旋轨道 (magnetoelectric spin-orbit, MESO) 效应构建基于磁电耦合效应的信息写入单元和基于逆自旋霍尔效应或逆 Rashba-Edelstein 效应的信息读取单元的新型自旋逻辑器件亦能实现电荷和自旋之间的高效转换, 具备器件之间可直接级联的能力. 并且由多个 MESO 逻辑器件组成的多数门能够实现多种布尔逻辑功能, 通过多级级联可构建 32 位加法器甚至是更复杂的逻辑电路^[127,128]. 上述多种物理效应的协同作用, 为构建低功耗、可级联的自旋逻辑电路, 以及实现全自旋逻辑运算范式提供了切实可行的技术路径.

最后, 为顺应智能化时代在健康医疗、人机交互、具身智能等应用中的发展需求, 将自旋逻辑器件柔性化, 以满足可穿戴、共形贴附、可拉伸形变等功能性, 是发挥其性能优势、拓宽应用场景的重要一环. 尽管目前已取得一些初步进展, 但仍面临材料选择受限、柔性衬底与刚性薄膜之间物理/化学系数失配、热不稳定性以及应力应变对逻辑性能影响规律不明晰等挑战^[15-18,109,129]. 在此背景下, 引入剥离转移技术, 将具有低晶体对称性等优越性能的单晶材料从刚性衬底上剥离并转移至任意目标衬底, 是拓宽材料选择面, 并提高制备灵活性的一条重要技术路径. 特别是将其转移至硅基衬底上, 在保留优异性能的同时^[130], 还能与 CMOS 制备工艺兼容, 从而为自旋-CMOS 混合电路、低功耗逻辑器件的开发提供新途径. 对于刚柔之间的例如弹性模量、热膨胀系数失配问题, 可以通过设计具有系数梯度的复合衬底, 或在衬底与薄膜之间插入系数隔离单元, 缓解甚至屏蔽系数差异过大引起的性能和稳定性下降问题^[131-133], 同时克服转移工艺中衬底与薄膜结合力弱的技术难点. 在利用柔性衬底低热导率降低磁化翻转势垒的同时, 相对较长时间的热积累容易诱导材料中的原子迁移. 特别是利用薄膜界面自旋输运和 (或) 磁性的体系, 界面间的原子扩散容易对写入功耗、电阻态、磁各向异性等参数带来不可忽视的负面影响, 从而降低器件的性能稳定性. 因此, 通过发展具有高热稳定性的材料体系, 以及深入研究写入操作中的热动力学过程来权衡热效应的利弊, 是实现兼具低功耗和高稳定柔性 SOT 器件的重要一环. 此外, 尽管一般认为应力应变会对器件性能带来不利的影响, 但阐明如

应变大小、方向、梯度等影响 SOT 的物理机理并进行针对性的设计, 有望提高自旋逻辑在柔性场景中的性能, 并衍生出新的功能性.

参考文献

- [1] Zidan M A, Strachan J P, Lu W D 2018 *Nat. Electron.* **1** 22
- [2] Kim N S, Austin T, Blaauw D, Mudge T, Flautner K, Hu J S, Irwin M J, Kandemir M, Narayanan V 2003 *Computer* **36** 68
- [3] Uno M, Isahaya N, Cha B S, Omori M, Yamamura A, Matsui H, Kudo M, Tanaka Y, Kanaoka Y, Ito M, Takeya J 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600410
- [4] Ko R, Kim M, Bestelink E, Golec P, Hur J, Sporea R A, Yoo H 2024 *ACS Appl. Electron. Mater.* **6** 9134
- [5] Honda W, Arie T, Akita S, Takei K 2015 *Sci. Rep.* **5** 15099
- [6] Kulkarni M R, John R A, Tiwari N, Nirmal A, Ng S E, Nguyen A C, Mathews N 2019 *Small* **15** 1901457
- [7] Dou W, Zhu L Q, Jiang J, Wan Q 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 093509
- [8] William C, Black J, Das B 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6674
- [9] Ney A, Pampuch C, Koch R, Ploog K H 2003 *Nature* **425** 485
- [10] Krizakova V, Garello K, Grimaldi E, Kar G S, Gambardella P 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 232406
- [11] Cai W L, Shi K W, Zhuo Y D, Zhu D Q, Huang Y, Yin J L, Cao K H, Wang Z H, Guo Z X, Wang Z L, Wang G F, Zhao W S 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 704
- [12] Baumgartner M, Garello K, Mendil J, Avci C O, Grimaldi E, Murer C, Feng J X, Gabureac M, Stamm C, Acremann Y, Finizio S, Wintz S, Raabe J, Gambardella P 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 980
- [13] Lee K S, Lee S W, Min B C, Lee K J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 112410
- [14] Zhu D Q, Zhao W S 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 044078
- [15] Lee O, You L, Jang J, Subramanian V, Salahuddin S 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 252401
- [16] Wong G D H, Ang C C I, Gan W L, Law W C, Xu Z, Xu F, Seet C S, Lew W S 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 042402
- [17] Liu E, Fache T, Cespedes-Berrocal D, Zhang Z, Petit-Watelot S, Mangin S, Xu F, Rojas-Sánchez J C 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 044074
- [18] Wang W L, Liu J Q, Su W, Han Y L, Du Q, Wu J G, Hu Z Q, Wang C Y, Jiang Z D, Wang Z G, Liu M 2024 *Nano Lett.* **24** 2003
- [19] Li M L, Li C X, Xu X G, Wang M X, Zhu Z Q, Meng K K, He B, Yu G Q, Hu Y F, Peng L M, Jiang Y 2023 *Nano Lett.* **23** 3818
- [20] Li M L, Wang M X, Xu X G, Meng K K, He B, Yu G Q, Li A, Xu Z D, Hu Y F, Peng L M, Jiang Y 2026 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2424086
- [21] Wang W, Feng C W, Wang Y H, Huang Q K, Wang D, Fan Y B, Han X, Bai L H, Chen Y X, Tian Y F, Yan S S 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 182402
- [22] Xu J K, Xiang X Q, Wu B, Jiang S Y, Wang D, Zhao X F, Qiang X Y, Huang X L, Huo R, Wang W, Wang Y L, Gao N 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 40673
- [23] Li M L, Xu X G, Wang M X, He B, Zhang T Z, Guo J Q, Meng K K, Yu G Q, Jiang Y 2025 *Nano Res.* **18** 94907066
- [24] Vasil'eva N P, Kasatkin S I, Petrukhin B P 2004 *Autom. Remote Control* **65** 1357
- [25] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Van Dau F N, Petroff F, Eitenne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys.*

- Rev. Lett.* **61** 2472
- [26] Binasch G, Grunberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [27] Julliere M 1975 *Phys. Lett. A* **54** 225
- [28] Slonczewski J C 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1
- [29] Myers E B, Ralph D C, Katine J A, Louie R N, Buhrman R A 1999 *Science* **285** 867
- [30] Miron I M, Gaudin G, Auffret S, Rodmacq B, Schuhl A, Pizzini S, Vogel J, Gambardella P 2010 *Nat. Mater.* **9** 230
- [31] Miron I M, Garello K, Gaudin G, Zermatten P J, Costache M V, Auffret S, Bandiera S, Rodmacq B, Schuhl A, Gambardella P 2011 *Nature* **476** 189
- [32] Liu L Q, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 096602
- [33] Liu L Q, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [34] Huai Y M, Albert F, Nguyen P, Pakala M, Valet T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3118
- [35] Chappert C, Fert A, Van Dau F N 2007 *Nat. Mater.* **6** 813
- [36] Lyle A, Harms J, Patil S, Yao X F, Lilja D J, Wang J P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 152504
- [37] Mahmoudi H, Windbacher T, Sverdlov V, Selberherr S, Ieee 2014 *15th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS)* Stockholm, Sweden, April 7–9, 2014 p117
- [38] Nikonov D E, Bourianoff G I, Ghani T 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 1128
- [39] Lyle A, Yao X F, Ebrahimi F, Harms J, Wang J P 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 2216
- [40] Yao X F, Harms J, Lyle A, Ebrahimi F, Zhang Y S, Wang J P 2012 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11** 120
- [41] Zhao W S, Zhang Y, Devolder T, Klein J, Ravelosona D, Chappert C, Mazoyer P 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 1848
- [42] Bhatti S, Sbiaa R, Hirohata A, Ohno H, Fukami S, Piramanayagam S N 2017 *Mater. Today* **20** 530
- [43] Ramaswamy R, Lee J M, Cai K M, Yang H 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 031107
- [44] Fukami S, Anekawa T, Zhang C, Ohno H 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 621
- [45] Liu Y T, Huang C C, Chen K H, Huang Y H, Tsai C C, Chang T Y, Pai C F 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 024021
- [46] Guo Z X, Yin J L, Bai Y, Zhu D Q, Shi K W, Wang G F, Cao K H, Zhao W S 2021 *Proc. IEEE* **109** 1398
- [47] Manchon A, Zhang S 2009 *Phys. Rev. B* **79** 094422
- [48] Amin V P, Stiles M D 2016 *Phys. Rev. B* **94** 104419
- [49] Wu H, Zhang J, Cui B S, Razavi S A, Che X Y, Pan Q J, Wu D, Yu G Q, Han X F, Wang K L 2022 *Mater. Futures* **1** 022201
- [50] Liu L, Zhao T Y, Lin W N, Shu X Y, Zhou J, Zheng Z Y, Chen H L, Jia L X, Chen J S 2023 *Appl. Phys. Rev.* **10** 021319
- [51] Zhou J, Liu L, Shu X Y, Lin W N, Zhao T Y, Chen J S 2023 *IEEE Trans. Magn.* **59** 1
- [52] Zhang X, Wan C H, Yuan Z H, Fang C, Kong W J, Wu H, Zhang Q T, Tao B S, Han X F 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **428** 401
- [53] Wan C H, Zhang X, Yuan Z H, Fang C, Kong W J, Zhang Q T, Wu H, Khan U, Han X F 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600282
- [54] Lim G J, Chua D, Gan W L, Murapaka C, Lew W S 2020 *Adv. Electron. Mater.* **6** 1901090
- [55] Shin J, Seo J, Song S, Kim W, Hyeon D S, Hong J 2023 *Sci. Rep.* **13** 11600
- [56] Lin J, Zhang S, Li S H, Xu Y, Li X, Duan W, Hou J C, Zhou C X, Zhan W, Guo Z, Song M, Yang X F, Tian Y F, Zou X C, Feng D, You L 2025 *Engineering* **51** 215
- [57] Baek S h C, Park K W, Kil D S, Jang Y, Park J, Lee K J, Park B G 2018 *Nat. Electron.* **1** 398
- [58] Zheng Z Y, Zhang Z Z, Feng X Q, Zhang K, Zhang Y, He Y, Chen L, Lin K L, Zhang Y G, Amiri P K, Zhao W S 2022 *ACS Nano* **16** 8264
- [59] Zhu L B, Xu X G, Li M L, Meng K K, Wu Y, Chen J K, Jiang Y 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 212403
- [60] Posti R, Athira K R, Tiwari D, Roy D 2025 *ACS Appl. Electron. Mater.* **7** 3955
- [61] Fan Y B, Han X, Zhao X N, Dong Y A, Chen Y X, Bai L H, Yan S S, Tian Y F 2022 *ACS Nano* **16** 6878
- [62] Wang X, Wan C H, Kong W J, Zhang X, Xing Y W, Fang C, Tao B S, Yang W L, Huang L, Wu H, Irfan M, Han X F 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801318
- [63] Zhao X N, Dong Y N, Chen W B, Xie X J, Bai L H, Chen Y X, Kang S S, Yan S S, Tian Y F 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2105359
- [64] Wang Y B, Zhang J Y, Dou P W, Deng X, Zhao Y C, Qi J, Zhang Y, Shao B K, Xu J W, Zheng X Q, Huang H, Wu Y F, Shen B G, Wang S G 2025 *Adv. Electron. Mater.* **11** 2400270
- [65] Zhao T Y, Zheng Z Y, Wang J K, Zhou G W, Liu L, Zhou C H, Xie Q D, Jia L X, Xiao R, Zhang Q H, Ren L Z, Shi S, Zeng T, Gu Y D, Xu X H, Zhang Y, Chen J S 2025 *Nat. Commun.* **16** 2988
- [66] Yang A, Jiang Y F 2024 *IEEE Trans. Electron Devices* **71** 3279
- [67] Dong Y N, Zhao X N, Han X, Fan Y B, Xie X J, Chen Y X, Bai L H, Dai Y Y, Yan S S, Tian Y F 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 152403
- [68] Han X, Fan Y B, Wang D, Wang W, Bai L H, Chen Y X, Yan S S, Tian Y F 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 052404
- [69] Zhao M K, Wan C H, Luo X M, Wang Y Z, Ma T Y, Yang W L, Zhang Y, Yin L, Yu G Q, Han X F 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 212405
- [70] Yang W L, Yan Z R, Xing Y W, Cheng C, Guo C Y, Luo X M, Zhao M K, Yu G Q, Wan C H, Stebliy M E, Ogniev A, Samardak A S, Han X F 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 122402
- [71] Koh D, Kim D J, Kim T, Kang M, Viet D D, Hong H, Jeong J R, Park J, Park B G 2025 *Nano Lett.* **25** 14784
- [72] Cao Y, Sheng Y, Edmonds K W, Ji Y, Zheng H Z, Wang K Y 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907929
- [73] Zhang N, Cao Y, Li Y C, Rushforth A W, Ji Y, Zheng H Z, Wang K Y 2020 *Adv. Electron. Mater.* **6** 2000296
- [74] Li R Z, Li Y C, Sheng Y, Bekele Z A, Wang K Y 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 2646
- [75] Li Y C, Zhang N, Wang K Y 2022 *Sci. China Inform. Sci.* **65** 122404
- [76] Huang X H, Zhao Y R, Wang X R, Wang F, Liu L, Yang H, Zhao W S, Shi S Y 2023 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2308219
- [77] Chen B J, Lourembam J, Goolaup S, Lim S T 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 022401
- [78] Shi Y N, Chi K Q, Li Z, Zhang W B, Xing Y, Meng H, Liu B 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 072401
- [79] Lin C Y, Hsieh J Y, Wang P C, Tsai C C, Pai C F 2024 *APL Mach. Learn.* **2** 046110
- [80] Wang G C, Guo L, Su H, Zhang H W, Tang X L 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 27478
- [81] Ma Q L, Li Y F, Gopman D B, Kabanov Y P, Shull R D, Chien C L 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 117703
- [82] Liu X Y, Lan X K, Bekele Z A, Li W H, Zhu S G, Dou P W, Wang Y B, Zhang J Y, Wang S G, Wang K Y 2023 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **22** 576
- [83] Lan X K, Liu X Y, Bekele Z A, Lei K, Wang K Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 172402

- [84] Liu L, Zhou C H, Shu X Y, Li C J, Zhao T Y, Lin W N, Deng J Y, Xie Q D, Chen S H, Zhou J, Guo R, Wang H, Yu J H, Shi S, Yang P, Pennycook S, Manchon A, Chen J S 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 277
- [85] Vermeulen B B, Sorée B, Couet S, Temst K, Nguyen V D 2024 *Micromachines* **15** 696
- [86] Parkin S, Yang S H 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 195
- [87] Luo Z C, Hrabec A, Dao T P, Sala G, Finizio S, Feng J X, Mayr S, Raabe J, Gambardella P, Heyderman L J 2020 *Nature* **579** 214
- [88] Wang W Y, Sheng Y, Zheng Y H, Ji Y, Wang K Y 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2200412
- [89] Lin H, Xu N, Wang D, Liu L, Zhao X F, Zhou Y J, Luo X M, Song C, Yu G Q, Xing G Z 2022 *Adv. Intell. Syst.* **4** 2200028
- [90] Chen L, Huang W T, Zhang K, Li B, Zhang Z Z, Feng X Q, Lin K L, He Y, Zhao W S, Zhang Y 2024 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 504
- [91] Li Y R, Yang M Y, Yu G Q, Cui B S, Liu J B, Li Y L, Shao Q M, Luo J 2024 *Rare Met.* **43** 3868
- [92] Zhou Q, Fang B, Shan J H, Sun F C, Guo D 2020 *5th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* Shenzhen, China, December 18–21, 2020 p198
- [93] Kim M S, Almuslem A S, Babatain W, Bahabry R R, Das U K, El-Atab N, Ghoneim M, Hussain A M, Kutbee A T, Nassar J, Qaiser N, Rojas J P, Shaikh S F, Sevilla G A T, Hussain M M 2024 *Adv. Mater.* **36** 2406424
- [94] Chen Y Z, Li Z Y, Zhang Z, Hu S C, Li Z H, Hou J W, Wang L, Yan Y, Li Y, He L, Du J, Zhang R, Wu J, Lu X Y, Xie H, Xu Y B 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 172403
- [95] Guo Q, Gao X Y, Li C F, Zong S T, Hu J F, Wang Z C, Jin Y X 2025 *J. Magn. Magn. Mater.* **624** 173025
- [96] Chen Z L, Liu X, Jiang J W, Li R, Wang Y, Guo L, Xu Y D, Mi W B 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 6209
- [97] Du Q, Wang W, Sun X, Wu J G, Hu Z Q, Tian B, Lv Q C, Wang Z G, Liu M 2024 *Nano Res.* **17** 10017
- [98] Gong L G, Song J, Lao B, Li R W, Wang Z M 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 192402
- [99] Gong L G, Jiang H P, Lao B, Zheng X, Chen X J, Zhong Z C, Sun Y, Hao X, Radovic M, Li R W, Wang Z M 2025 *Adv. Electron. Mater.* **11** e00364
- [100] Bitla Y, Chu Y H 2020 *Nanoscale* **12** 18523
- [101] Huang J J, Chen W J 2022 *Iscience* **25** 105041
- [102] Lu D, Baek D J, Hong S S, Kourkoutis L F, Hikita Y, Hwang H Y 2016 *Nat. Mater.* **15** 1255
- [103] Yun S, Cozannet T E I, Christoffersen C H, Brand E, Jespersen T S, Pryds N 2024 *Small* **20** 2310782
- [104] Peng H N, Lu N P, Yang S Z, Lyu Y J, Liu Z W, Bu Y F, Shen S C, Li M Q, Li Z L, Gao L, Lu S C, Wang M, Cao H, Zhou H, Gao P, Chen H H, Yu P 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2111907
- [105] Bakaul S R, Serrao C R, Lee M, Yeung C W, Sarker A, Hsu S L, Yadav A K, Dedon L, You L, Khan A I, Clarkson J D, Hu C M, Ramesh R, Salahuddin S 2016 *Nat. Commun.* **7** 10547
- [106] Pesquera D, Khestanova E, Ghidini M, Zhang S, Rooney A P, Maccherozzi F, Riego P, Farokhipoor S, Kim J, Moya X, Vickers M E, Stelmashenko N A, Haigh S J, Dhesi S S, Mathur N D 2020 *Nat. Commun.* **11** 3190
- [107] Takahashi R, Lippmaa M 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 25042
- [108] Zhang H, Liu Y D, Yang C, Xiang L, Hu Y F, Peng L M 2018 *Adv. Mater.* **30** 1805408
- [109] Chouhan A, Mendonca H A, Dutta S, Shukla A S, Pandey R, Tulapurkar A A 2023 *J. Magn. Magn. Mater.* **587** 171337
- [110] Fan Y B, Upadhyaya P, Kou X F, Lang M R, Takei S, Wang Z X, Tang J S, He L, Chang L T, Montazeri M, Yu G Q, Jiang W J, Nie T X, Schwartz R N, Tserkovnyak Y, Wang K L 2014 *Nat. Mater.* **13** 699
- [111] Han J H, Richardella A, Siddiqui S A, Finley J, Samarth N, Liu L Q 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 077702
- [112] Wang Y, Zhu D P, Wu Y, Yang Y M, Yu J W, Ramaswamy R, Mishra R, Shi S Y, Elyasi M, Teo K L, Wu Y H, Yang H 2017 *Nat. Commun.* **8** 1364
- [113] Khang N H D, Ueda Y, Hai P N 2018 *Nat. Mater.* **17** 808
- [114] Shi S Y, Liang S H, Zhu Z F, Cai K M, Pollard S D, Wang Y, Wang J Y, Wang Q S, He P, Yu J W, Eda G, Liang G C, Yang H 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 945
- [115] Zhang M F, Cui B, An T Y, Ren X, Liu W K, Zhao X X, Ding H H, Zhang Z Y, Zhang X, Kuai W J, Zhou G J, Cheng B, Liu L, Hu J F 2025 *Adv. Sci.* **12** 2417621
- [116] Young S M, Kane C L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 126803
- [117] Li H, Wang X H, Manchon A 2016 *Phys. Rev. B* **93** 035417
- [118] Wang Y, Ramaswamy R, Motapothula M, Narayanapillai K, Zhu D P, Yu J W, Venkatesan T, Yang H 2017 *Nano Lett.* **17** 7659
- [119] Xie Q D, Lin W N, Yang B S, Shu X Y, Chen S H, Liu L, Yu X J, Breese M B H, Zhou T J, Yang M, Zhang Z, Wang S J, Yang H X, Chai J W, Han X F, Chen J S 2019 *Adv. Mater.* **31** 1900776
- [120] Zhao B, Khokhriakov D, Zhang Y, Fu H X, Karpiak B, Hoque A M, Xu X G, Jiang Y, Yan B H, Dash S P 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 013286
- [121] Song P, Hsu C H, Vignale G, Zhao M, Liu J W, Deng Y J, Fu W, Liu Y P, Zhang Y B, Lin H, Pereira V M, Loh K P 2020 *Nat. Mater.* **19** 292
- [122] Xu H J, Wei J W, Zhou H G, Feng J F, Xu T, Du H F, He C L, Huang Y, Zhang J W, Liu Y Z, Wu H C, Guo C Y, Wang X, Guang Y, Wei H X, Peng Y, Jiang W J, Yu G Q, Han X F 2020 *Adv. Mater.* **32** 2000513
- [123] Lee K J, Cros V, Lee H W 2024 *Nat. Mater.* **23** 1302
- [124] Peng S Y, Zheng X, Li S, Lao B, Han Y M, Liao Z L, Zheng H S, Yang Y M, Yu T Y, Liu P T, Sun Y, Chen X Q, Peng S Z, Zhao W S, Li R W, Wang Z M 2025 *Nat. Mater.* **24** 1749
- [125] Behin-Aein B, Datta D, Salahuddin S, Datta S 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 266
- [126] Wang S, Zou X, Li H A, Shan D, Fan H L 2023 *Micro Nano Lett.* **18** e12164
- [127] Manipatruni S, Nikonov D E, Young I A 2018 *Nat. Phys.* **14** 338
- [128] Manipatruni S, Nikonov D E, Lin C C, Gosavi T A, Liu H, Prasad B, Huang Y L, Bonturim E, Ramesh R, Young I A 2019 *Nature* **565** 35
- [129] Han L, Fang Y H, Zhao Y Q, Zang Y P, Gu Z B, Nie Y F, Pan X Q 2020 *Adv. Mater. Interfaces* **7** 1901604
- [130] Lu Z X, Bai X, Lao B, Zheng X, Deng H Y, Fan Z, Li R W, Wang Z M 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2500755
- [131] Han K L, Lee W B, Kim Y D, Kim J H, Choi B D, Park J S 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 5037
- [132] Li K, Shuai Y M, Cheng X, Luan H W, Liu S Y, Yang C, Xue Z G, Huang Y G, Zhang Y H 2022 *Small* **18** 2107879
- [133] Kang S H, Jo J W, Lee J M, Moon S, Shin S B, Choi S B, Byeon D, Kim J, Kim M G, Kim Y H, Kim J W, Park S K 2024 *Nat. Commun.* **15** 2814

SPECIAL TOPIC — Applied magnetism

Programmable spin logic devices and their flexibilization*WU Keyi¹⁾²⁾ LAO Bin¹⁾ HAN Yamin¹⁾²⁾LI Runwei^{1)2)3)†} WANG Zhiming^{1)2)‡}

1) (*Zhejiang Key Laboratory of Magnetic Materials and Applications, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China*)

2) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

3) (*Eastern Institute of Technology, Ningbo 315200, China*)

(Received 26 November 2025; revised manuscript received 30 December 2025)

Abstract

Spintronic devices, characterized by non-volatility, high-speed operation, and ultra-low power consumption, hold the potential to overcome the performance limitations of the von Neumann architecture, thus emerging as a transformative paradigm for next-generation programmable logic technologies. Spintronic devices based on the spin-orbit torque are an important development direction for realizing programmable logic functions.

Spin-orbit torque can efficiently drive the fast dynamics of magnetization state for various logic functions. However, due to symmetry constraints, deterministic manipulation of perpendicular magnetization cannot be achieved solely by traditional spin-orbit torque, and additional auxiliary approaches are usually required to break the symmetry. Currently, through the coordinate electric and magnetic field control or all electric approaches, the magnetization state can be deterministically operated via spin-orbit torque, enabling the dynamic reconfiguration of logic functions. In the coordinate electric and magnetic field control approaches, the methods such as utilizing localized auxiliary magnetic fields, Joule heating, and voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA) are used to achieve deterministic switching of perpendicular magnetization. To develop spin logic devices with lower power consumption and higher integration, the methods including interlayer exchange coupling, structurally asymmetric designs, and specialized low-symmetry materials can be adopted to realize all-electrically-driven logic functions. When fabricated into flexible devices, programmable spin logic devices enable expanding their functionality with the excellent performances on diverse flexible platforms. Flexible substrates with low thermal conductivity can effectively accumulate Joule heating generated by current flow, thereby reducing the magnetic energy barrier during switching and lowering the write energy. Consequently, the development of flexible programmable spin logic devices lays the foundation for low-power flexible and wearable compute-in-memory applications. Therefore, the spin logic devices based on spin-orbit-torque show great potential in versatile scenarios. This article mainly reviews the development of programmable spin logic devices, the research status of the devices based on spin-orbit torque, and the state-of-the-art flexibilization approaches. Finally, it looks forward to the future development trends.

Keywords: programmable spin logic, spin-orbit torque, all-electric-driven, flexible

DOI: [10.7498/aps.75.20251612](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251612)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251612](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251612)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFA1410200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174406, U24A6001, 52127803).

† Corresponding author. E-mail: runweili@nimte.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhiming.wang@nimte.ac.cn



可编程自旋逻辑器件及柔性化

吴可怡 劳斌 韩雅敏 李润伟 汪志明

Programmable spin logic devices and their flexibilization

WU Keyi LAO Bin HAN Yamin LI Runwei WANG Zhiming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251612

CSTR: 32037.14.aps.75.20251612

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251612>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自旋轨道矩协助自旋转移矩驱动磁化强度翻转

The magnetization reversal driven by spin-orbit-assisted spin-transfer torque

物理学报. 2023, 72(8): 087202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222433>

基于外尔半金属 WTe_2 的自旋-轨道矩驱动磁矩翻转

Magnetization switching driven by spin-orbit torque of Weyl semimetal WTe_2

物理学报. 2024, 73(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231836>

基于稀土金属 $Dy/Pt/[Co/Pt]_3$ 磁性多层膜的自旋轨道矩

Investigation of spin-orbit torques in rare-earth $Dy/Pt/[Co/Pt]_3$ magnetic multilayers

物理学报. 2025, 74(13): 137203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250186>

$SrRuO_3$ 薄膜中自旋轨道力矩效率和磁矩翻转的晶向调控

Crystal orientation regulation of spin-orbit torque efficiency and magnetization switching in $SrRuO_3$ thin films

物理学报. 2024, 73(11): 117701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240367>

基于协同钝化策略制备高性能柔性钙钛矿太阳能电池

Fabrication of high-performance flexible perovskite solar cells based on synergistic passivation strategy

物理学报. 2024, 73(7): 078401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231846>

三明治结构柔性储能电介质材料研究进展

Research progress of flexible energy storage dielectric materials with sandwiched structure

物理学报. 2024, 73(2): 027702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20230614>