



斯格明子磁隧道结研究进展

赵孟琦^{1,2}, 何行^{1,2}, 江万军^{1,2*}

1. 清华大学物理系, 低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084

2. 清华大学量子信息前沿中心, 北京 100084

*联系人, E-mail: jiang_lab@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-12-17; 接受日期: 2025-02-14; 网络出版日期: 2025-09-02

摘要 磁斯格明子是受拓扑保护的自旋磁结构, 具有独特的稳定性和动力学行为. 由于体积小、结构稳定、易操控, 斯格明子被认为是下一代自旋存储、逻辑器件的优良信息载体. 斯格明子的产生、操控和探测是构建功能器件的三个前提条件. 到目前为止, 斯格明子的产生和操控方面取得了较大进展, 但其高效电学探测研究报道不多, 成为阻碍斯格明子器件开发和应用的瓶颈之一. 基于自旋取向依赖的量子隧道效应, 结合磁性层自旋态密度的差异, 隧穿磁电阻效应可以将斯格明子的有、无, 转换成千欧量级以上的电阻变化, 有望解决斯格明子的高效探测难题. 本文将总结斯格明子隧穿磁电阻、各向异性隧穿磁电阻和非共线磁电阻三种物理效应. 随后, 将详细介绍磁隧道结的分类和发展历程, 以及利用磁隧道结探测斯格明子的最新研究进展. 最后, 对斯格明子磁隧道结在磁随机存储器领域的应用前景和发展趋势进行展望.

关键词 自旋电子学, 磁斯格明子, 磁隧道结, 隧穿磁电阻, 赛道存储器

PACS: 03.75.Lm, 68.37.Ef, 75.50.Ss, 75.75.+a, 85.75.Dd

1 引言

磁斯格明子是一种具有准粒子特性的非共线自旋结构, 具有较好的稳定性和新奇的拓扑动力学特性^[1-14]. 磁斯格明子可以在铁磁、亚铁磁、反铁磁、多铁等材料体系中稳定存在, 易被磁场、电场、电流等方式调控, 被认为是下一代自旋存储、逻辑计算器件的理想信息载体^[6,7,9,10,13,15]. 按照实空间自旋分布状态, 斯格明子分为奈尔型、布洛赫型及反斯格明子等多种类型. 如图1所示, 在洛伦兹透射电子显微实验(Lorentz

Transmission Electron Microscopy, LTEM)中, 基于透射电子的偏转趋势, 可以区分不同类型的自旋结构^[16,17]. 奈尔型斯格明子主要存在于磁性多层膜中, 布洛赫型斯格明子及反斯格明子主要存在于手性的块体材料中. 从应用的角度来看, 磁性多层膜中的奈尔型斯格明子不仅与现代半导体工业制造工艺兼容, 电流在包含重金属的多层膜中也可以产生自旋力矩, 实现斯格明子的高效操控^[9,10,13,18-20]. 由于室温稳定、工业兼容、容易操控, 重金属/铁磁多层膜结构中奈尔型斯格明子具有潜在应用价值, 近年来受到广泛关注.

引用格式: 赵孟琦, 何行, 江万军. 斯格明子磁隧道结研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 227504

Zhao M Q, He H, Jiang W J. Recent progress of the skyrmionic magnetic tunnel junctions (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 227504, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0620

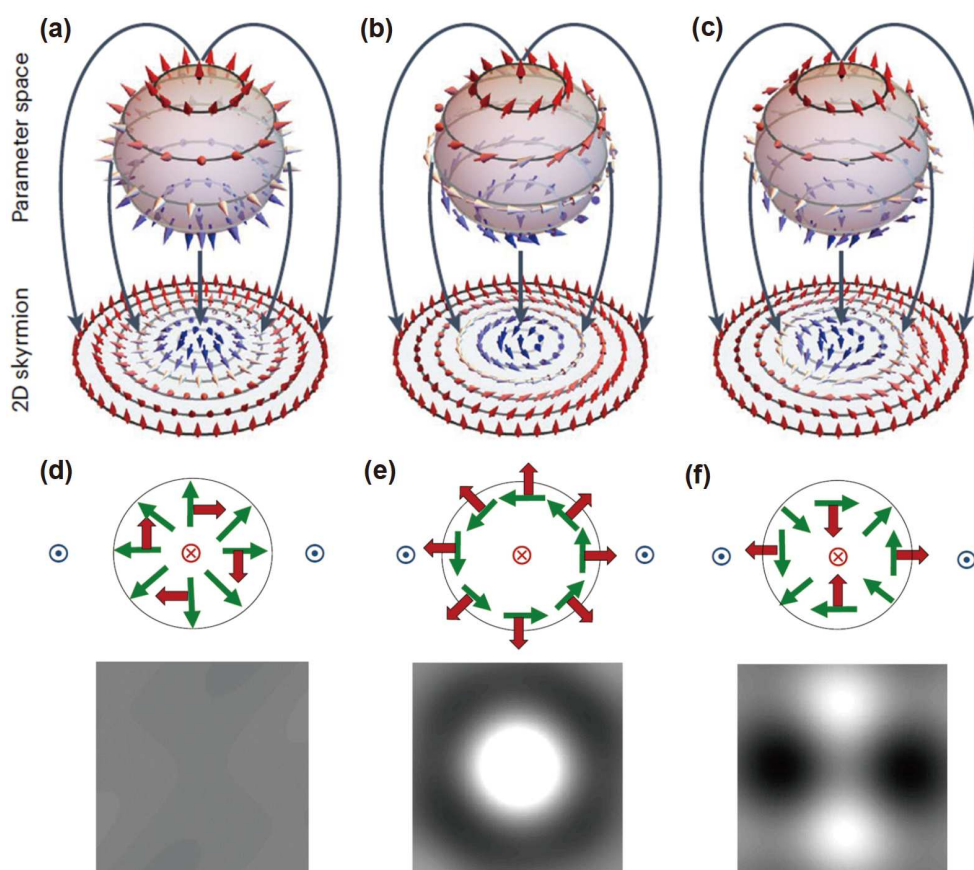


图 1 (网络版彩图) (a)–(c) 上图为奈尔型(a)、布洛赫型(b)和反斯格明子(c)三种类型斯格明子单位矢量球, 下图为对应矢量球上自旋的二维平面投影, 也对应不同斯格明子在实空间的二维自旋分布状态^[16]. (d)–(f) 上图为奈尔型(d)、布洛赫型(e)和反斯格明子(f)三种类型斯格明子面内自旋排列示意图(绿色箭头)以及透射电子受到洛伦兹力的偏转方向(红色箭头), 下图为对应的洛伦兹透射电子显微镜的模拟图案^[17]. 图片摘自文献^[16,17], 已获取授权

Figure 1 (Color online) Spin textures of a Néel skyrmion (a), a Bloch skyrmion (b), and an antiskyrmion (c) represented on a unit sphere (upper panel). The lower panel shows their corresponding 2D projections, reflecting real-space spin distributions characteristic of each skyrmion type [16]. (d)–(f) The upper panel illustrates the in-plane magnetic moment configurations (green arrows) and the Lorentz deflection directions of transmitted electrons (red arrows) for a Néel skyrmion (d), a Bloch skyrmion (e), and an antiskyrmion (f). The corresponding simulated LTEM images are shown in the lower panel [17]. Figures are reproduced with permission from refs. [16,17].

在重金属/铁磁多层膜结构中, 借助于强自旋轨道耦合效应在界面诱导出的Dzyaloshinskii-Moriya (DMI)相互作用, 室温奈尔型斯格明子在2015年由Jiang等人^[18]在Ta/CoFeB/TaO_x多层膜中首次发现. 随后在不同多层膜结构中, 纳米级奈尔型斯格明子得到了广泛研究^[19,20]. 但观测手段均以成像为主, 面向应用的高效电学探测手段发展较为缓慢. 尽管拓扑霍尔效应可用来探测斯格明子, 但单个斯格明子所产生的霍尔电阻极小, 且霍尔器件尺寸较大, 不利于高密度集成^[21]. 磁隧道结是由磁性层、隧穿层、磁性层组成的器件单元, 取决于磁性层磁矩相对取向, 隧穿磁电阻

效应可以将斯格明子的有和无两种状态, 转换为百欧甚至千欧量级电阻信号变化, 以及超过100%的电阻变化率^[22–27]. 磁隧道结凭借体积小、可集成度高、电阻变化率高的优势, 已经成为磁随机存储器(MRAM)的基本构成单元. 利用磁隧道结探测纳米级斯格明子, 不但能解决斯格明子高效电学探测的难题, 也能推动斯格明子器件集成、应用的进程^[28].

本文将回顾隧穿磁电阻的起源与发展历程, 进一步展望隧穿磁电阻探测斯格明子的应用前景. 文章组织结构如下, 我们首先讨论斯格明子隧穿磁电阻效应、斯格明子各向异性隧穿磁电阻效应, 以及斯格明

子非共线隧穿磁电阻效应. 其次, 我们将系统介绍磁隧道结的膜堆分类和应用场景. 再次, 我们将讨论斯格明子磁隧道结近年取得的初步进展, 包括微米结、纳米结及三端赛道存储器等原型器件. 最后, 我们将对斯格明子隧道结器件的应用前景进行了展望.

2 斯格明子隧穿磁电阻的分类

扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)可以探测样品表面结构及局域电子态密度. 通过对比分析磁性探针或者非磁性探针的扫描结果, 可以得到三种不同的斯格明子隧穿磁电阻效应, 如图2所示. 它们分别是隧穿磁电阻效应(Tunnel Magnetoresistance, TMR)、各向异性隧穿磁电阻效应(Tunnel Anisotropic Magnetoresistance, TAMR), 以及非共线隧穿磁电阻效应(Non-collinear Magnetoresistance, NCMR). 隧穿磁电阻效应要求隧穿层两侧薄膜均具有磁性, 磁性层磁矩取向相同或相反会导致隧穿磁电阻的低、高阻态. 配备磁性针尖的扫描隧道显微镜, 可以得到斯格明子隧穿磁电阻效应的贡献^[29,30]. 各向异性隧穿磁电阻与非共线隧穿磁电阻不需要磁性探测层, 配备普通非磁性金属针尖的扫描隧道显微镜, 就可以探测到斯格明子的空间自旋分布. 其中各向异性隧穿磁电阻来自磁性层内自旋轨道耦合效应, 导致面内与面外磁矩取向存在电阻差异^[31-34]. 在磁性层内, 由于磁矩的非共线分布, 导致其能带杂化, 从而产生非共线隧穿磁电阻效应^[35]. 对于单个斯格明子, 中心和边缘处磁矩取向均垂直于样品面, 对应的各向异性隧穿磁电阻相同. 但是斯格明子中心处磁矩间存在夹角, 因而具有

非共线隧穿磁电阻信号; 边缘处磁矩平行排列, 没有非共线磁电阻信号. 非共线效应最强. 扫描隧道显微镜具有原子尺度的空间分辨能力, 可以帮助我们区分各向异性隧穿磁电阻效应与非共线隧穿磁电阻效应.

2.1 隧穿磁电阻效应

在由两个磁性电极间隔绝缘层组成的三明治结构中, 可以观察到隧穿磁电阻(TMR)效应^[22]. 基于自旋取向依赖的量子隧穿效应, 当两侧磁性电极磁矩方向相同时, 电子隧穿概率高, 隧穿电流大, 对应隧穿磁电阻低. 两侧磁性电极磁矩方向相反时, 电子隧穿概率受到抑制, 隧穿电流小, 隧穿磁电阻高.

自旋极化扫描隧道显微镜正是利用这种自旋依赖的量子隧穿效应, 如图3(b)所示. 通过选用磁性金属针尖, 控制针尖的磁矩方向, 可以测量到样品中不同取向磁矩分布. 2011年, 在外延生长的Fe/Ir表面上, Heinze等人^[29]利用垂直磁矩的针尖, 首次扫描到斯格明子晶格, 直接证实了斯格明子会贡献隧穿磁电阻效应. 此外, 由于隧穿电流是自旋极化的, 当电子在磁性针尖与样品表面隧穿时, 会产生自旋转移力矩(Spin-Transfer Torque, STT)效应, 并作用于斯格明子晶格, 还能实现纳米尺度斯格明子的写入与擦除^[30].

2.2 各向异性隧穿磁电阻

各向异性隧穿磁电阻也是一种量子隧穿效应, 但它只要求隧穿层的一侧为磁性电极, 另一侧电极可以不具有磁性. 由于自旋-轨道耦合的作用, 磁性电极的磁化取向垂直或平行电流方向时隧穿电流密度存在差异. 所以改变磁矩方向(面内或面外), 电子的隧穿概率

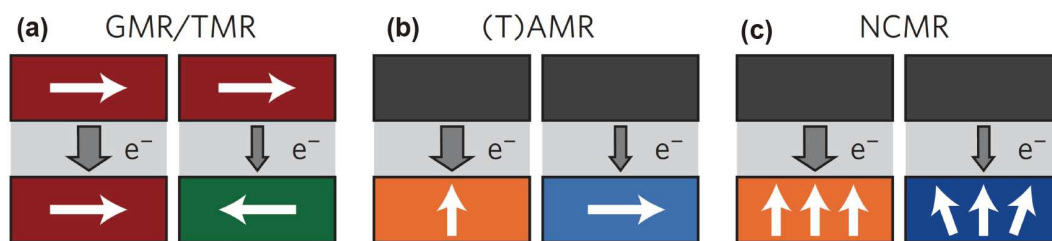


图2 (网络版彩图)三种不同的隧穿磁电阻效应. (a) 巨磁阻效应或隧穿磁电阻效应, 隧穿层两侧均为磁性材料. (b) 各向异性隧穿磁电阻, 探测层不需要具有磁性, 磁性层面内或面外的磁矩取向导致隧穿磁电阻的差异. (c) 非共线隧穿磁电阻, 探测层同样不需要磁性材料, 隧穿磁电阻差异来自磁性层中非共线磁矩^[35]. 图片摘自文献^[35], 已获取授权

Figure 2 (Color online) Three types of tunneling magnetoresistive effects. (a) Giant magnetoresistance (GMR) or TMR, in which both electrodes are magnetic materials. (b) TAMR, which does not require a sensing magnetic layer, with the difference in conductance arising from the in-plane or out-of-plane magnetic moment orientation in the magnetic layer. (c) NCMR, which does not require a sensing magnetic layer, with the conductance difference originating from the non-collinear magnetic moments within the magnetic layer^[35]. Figures are reproduced with permission from ref. ^[35].

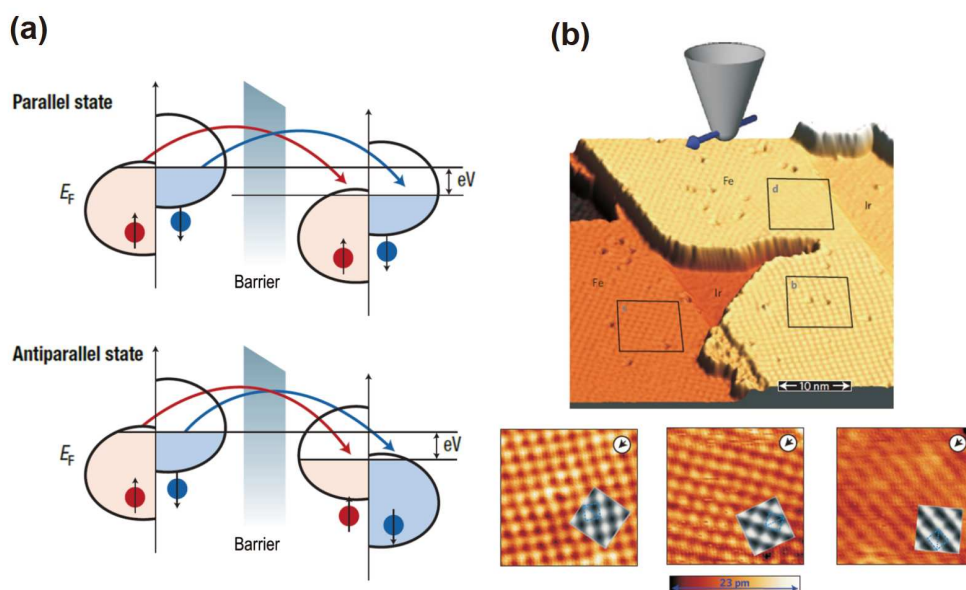


图 3 (网络版彩图) (a) 隧穿磁电阻效应示意图. 隧穿层两侧均为磁性层. 两磁性层磁矩方向相同时(上), 隧穿概率高, 对应隧穿磁电阻低; 磁矩方向相反时(下), 隧穿概率低, 对应隧穿磁电阻高^[36]. (b) 上图为自旋极化探针扫描隧道显微镜的设备示意图, 下图为不同磁矩取向探针扫描斯格明子晶格的扫描结果, 插图为对应模拟结果^[29]. 图片摘自文献^[29,36], 已获取授权

Figure 3 (Color online) (a) Schematic illustration of TMR in a system with two magnetic layers separated by a tunneling barrier. When the magnetizations of the two magnetic layers are parallel, the electrons tunnel more easily, resulting in a low TMR. When the magnetizations of the two magnetic layers are antiparallel, the tunneling probability is low, resulting in a high TMR [36]. (b) The upper panel illustrates a skyrmion lattice measured by a spin-polarized scanning tunneling microscope (SP-STM), and the lower panel presents three rational domains with different tip magnetization orientations. The inset shows the corresponding simulation results [29]. Figures are reproduced with permission from refs. [29,36].

变化, 导致隧穿磁电阻的各向异性^[32,33].

利用非磁金属针尖的扫描隧道显微镜, 基于各向异性隧穿磁电阻效应, 也可以得到样品磁矩分布信息. 2002年, Bode等人首先利用非磁探针观测到Fe/W样品磁畴信息, 如图4(d)所示^[31]. 因为磁畴壁处磁矩方向为面内, 磁畴磁矩方向为面外, 所以表现出各向异性隧穿磁电阻信号. 2012年, von Bergmann等人^[34]利用非磁探针得到斯格明子晶格的空间分布. 通过改变偏置电压大小, 可以选择性探测样品晶格结构或磁矩分布(图4(e)–(g)).

2.3 非共线隧穿磁电阻

非共线隧穿磁电阻效应源自磁性材料中磁矩的非共线排列. 相邻磁矩的非共线排列会导致能带杂化, 进而显著调控费米面附近电子态密度(图5(b)). 电子态密度增加(减小)时, 相同电压下参与隧穿过程的电子数目增加(减小), 隧穿磁电阻减小(增大).

2015年, Hanneken等人^[35]选用配备非磁性金属针尖的扫描隧道显微镜, 在Pd/Fe/Ir样品上, 测到了如图5

(c)所示的隧穿磁电阻信号, 且越靠近斯格明子中心, 信号越强. 由于各向异性隧穿磁电阻只取决于磁矩平行或垂直于电流方向, 但是对于单个斯格明子, 因其中心和铁磁背景磁矩取向反平行, 所以中心和铁磁背景处各向异性磁电阻没有差异. 只有斯格明子周围的面内磁矩部分才有贡献, 所以图5(c)的信号不是各向异性磁电阻, 而是非共线隧穿磁电阻效应. 进一步增大磁场时, 斯格明子尺寸减小, 斯格明子中心处相邻磁矩夹角增大, 观察到增强的非共线隧穿磁电阻信号.

3 磁隧道结的发展历程

磁隧道结(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)是一种以铁磁层(FM)、绝缘层(I)、铁磁层(FM)为核心层的类三明治结构微纳器件, 如图6(a)和(c)所示. 当绝缘层两侧铁磁层的磁矩方向平行(反平行)时, 其穿过结区测量得到的电阻为低阻态(高阻态)^[36]. 可以通过沿着铁磁层磁各向异性轴的方向扫描得到磁隧道结的高低阻态, 如图6(b)和(d)所示分别为具有面内磁各向异性

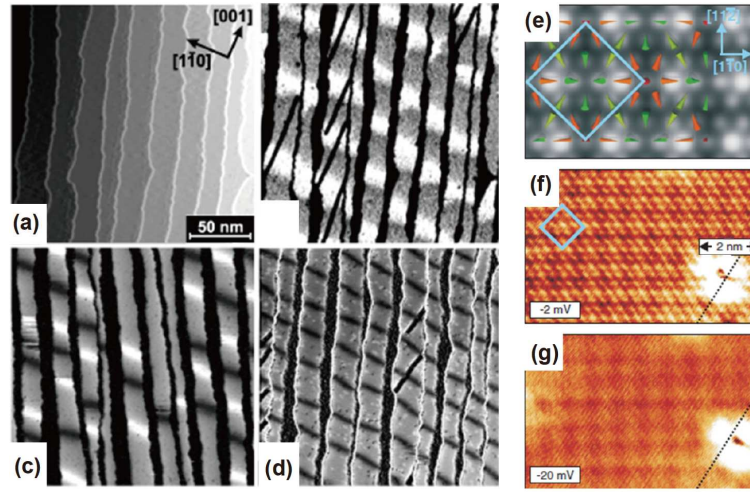


图 4 (网络版彩图) (a) Fe/W样品形貌图. 面外磁化探针(b)、面内磁化探针(c)与非磁性探针(d)测得的扫描隧道显微镜实验数据图^[31]. (e) Fe/Ir扫描隧道显微镜信号模拟图, 包含磁矩取向与原子晶格信号的叠加. (f), (g) 不同偏压下测得的斯格明子晶格的扫描隧道显微镜图^[34]. 图片摘自文献^[31,34], 已获取授权

Figure 4 (Color online) (a) Topography and STM images of Fe/W sample measured with an out-of-plane magnetized tip (b), an in-plane magnetized tip (c), and a non-magnetic tip (d) [31]. (e) Simulated STM image of the Fe/Ir sample, showing the superposition of the spin structure and the atomic structure. (f), (g) STM images of the skyrmion lattice obtained under different bias voltages [34]. Figures are reproduced with permission from refs. [31,34].

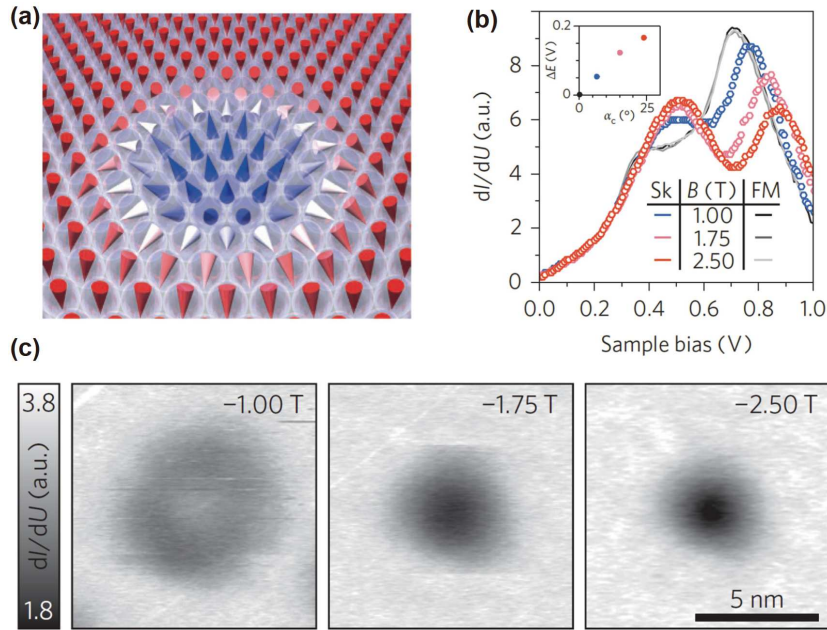


图 5 (网络版彩图) (a) 磁斯格明子示意图, 相邻磁矩非共线排列导致非共线隧穿磁电阻效应. (b) 利用装配非磁金属(钨W)针尖的扫描隧道显微镜, 观察到不同磁场下斯格明子中心位置(彩色线)和铁磁背景处(灰色线)隧穿微分电导谱, 对应位置费米面附近电子态密度. (c) 图(b)磁场下扫描隧道显微镜空间扫描图, 磁场越大, 非共线效应越强, 信号越明显^[35]. 图片摘自文献^[35], 已获取授权

Figure 5 (Color online) (a) Sketch of a magnetic skyrmion. Non-collinear spin structures give rise to NCMR. (b) dI/dU tunnel spectra measured using STM equipped with a non-magnetic W tip at the center (Sk) and outside (FW) of an individual skyrmion under different magnetic fields. The energy resolved dI/dU can be interpreted as the local density of states (LDOS) in the vacuum. (c) Corresponding laterally resolved dI/dU maps. The stronger magnetic fields enhance the degree of non-collinearity, resulting in more pronounced signals [35]. Figures are reproduced with permission from ref. [35].

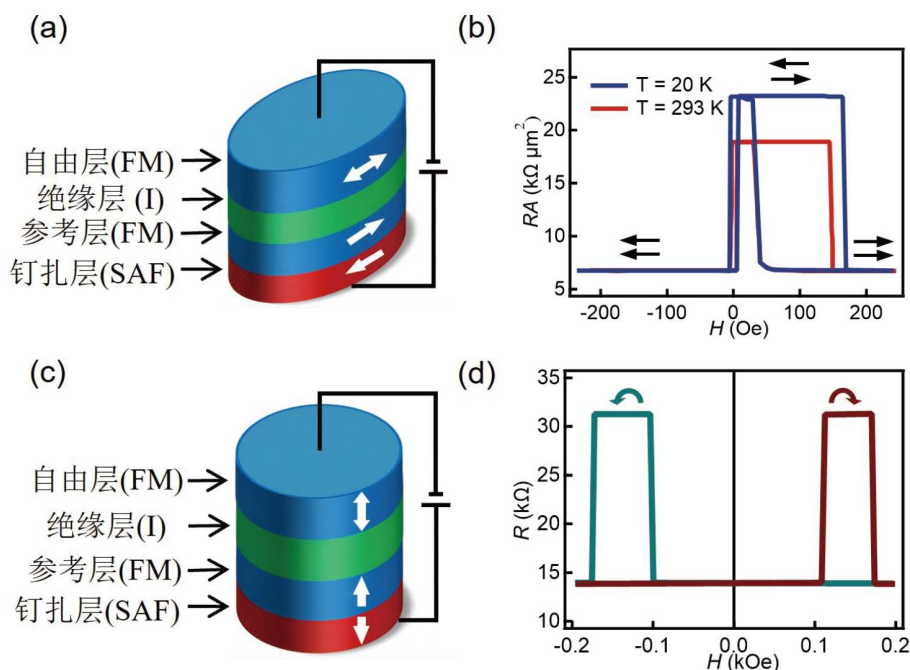


图 6 (网络版彩图) (a) 具有面内磁各向异性的磁隧道结器件示意图. (b) 对应器件沿着面内变化磁场所测到的TMR曲线^[37]. (c) 具有垂直磁各向异性的磁隧道结器件示意图, (d) 对应器件沿着面外扫磁场所测到的TMR曲线^[24]. 图片摘自文献^[24,37], 已获取授权

Figure 6 (Color online) (a) Schematic illustration of an MTJ device with in-plane magnetic anisotropy. (b) TMR hysteresis loop measured under an in-plane magnetic field ^[37]. (c) Schematic illustration of an MTJ device with perpendicular magnetic anisotropy. (d) TMR hysteresis loop measured under an out-of-plane magnetic field ^[24]. Figures are reproduced with permission from refs. ^[24,37].

和垂直磁各向异性磁隧道结器件电阻随磁场变化曲线^[24,37]. 磁隧道结的高低阻态可以作为数字信息“1”与“0”的载体, 用于二进制数据的存储^[38].

3.1 TMR比值的优化

1975年, Julliere^[22]在Fe/Ge/Co体系中观察到了14%的低温TMR比值, 并提出了与铁磁自旋极化率相关的经典模型, 然而这并没有引起学界的过多关注. 直到数十年后高真空隧道结制备技术的出现, 才让磁隧道结进入更多人的视野. 早期磁隧道结的隧穿层主要为Al₂O₃, 通过不断优化膜堆制备工艺, 基于Al₂O₃的室温TMR比值不断升高, 于2007年达到最大值(80%)^[39]. 与此同时, 人们发现以MgO作为隧穿层的磁隧道结具有更高的TMR比值. 基于第一性原理计算的指导^[40,41], 以MgO作为绝缘层的磁隧道结TMR比值不断提升^[23,37,42], 最终达到631%(室温下)^[43]. 而以CoFeB/MgO/CoFeB为核心结构的磁隧道结也成为当今学术研究以及应用的主要对象.

3.2 MTJ膜堆结构和工作原理介绍

由于MgO两侧铁磁层的矫顽场相差一般较小, 因此利用磁场改变其磁矩的相对方向较难. 利用反铁磁超晶格的RKKY相互作用对某一侧铁磁层进行钉扎, 就能显著提升高、低阻态对应的磁场范围. 常见磁隧道结的膜堆结构有钉扎层(Pinning Layer)、参考层(Reference Layer)、绝缘层(Insulating Layer)和自由层(Free Layer), 如图6(a)和(c)所示. 磁隧道结一般用来探测自由层的磁矩取向, 因此自由层又是信息的存储层. 参考层由于受到钉扎层的钉扎作用, 其磁矩方向较为稳定, 我们仅需改变自由层的磁矩方向, 便可实现隧道结器件的高低阻态, 和对应的信息写入和擦除. 完成磁矩信息的写入和擦除有多种方式, 按照先后发展的顺序, 主要有奥斯特磁场^[44]、自旋转移矩(Spin Transfer Torque, STT)^[45]、自旋轨道矩(Spin Orbit Torque, SOT)^[46]、电压控磁各向异性(Voltage Control Magnetic Anisotropy, VCMA)^[47]、电压控交换耦合

(Voltage Control Exchange Coupling, VCEC)^[48,49]五种, 具体可参考文献[50].

3.3 从面内磁各向异性MTJ到面外磁各向异性MTJ

早期的磁隧道结是具有面内磁各向异性的, 为了实现确定性的翻转状态, 器件形状通常为椭圆柱形, 如图6(a)所示. 然而随着器件尺寸的不断缩小, 杂散场效应对器件稳定性的影响越发明显, 制约了存储密度的提升. 具有垂直磁各向异性的磁隧道结器件, 具有更优异的热稳定性和抗磁场干扰能力, 能进一步提高集成度与存储密度. 其器件通常为圆柱形, 如图6(c)所示. 2002年, Nishimura等人^[51]首次制备出了具有垂直磁各向异性的磁隧道结(TbFeCo/CoFe/Al₂O₃/CoFe/GdFeCo)并且测得其室温TMR比值超过50%. 2010年, Ikeda等人^[24]制备出了具有垂直磁各向异性的CoFeB/MgO/CoFeB磁隧道结, 并利用自旋转移矩实现了信息的写入与擦除, 而且获得了超过120%的室温TMR, 为后续磁隧道结的研究奠定了重要基础^[52].

3.4 从底钉扎构型向顶钉扎构型

为提高参考层的稳定性, 需要利用钉扎层的交换相互作用增大其矫顽场. 钉扎层的位置决定了参考层的位置, 初期的磁隧道结大多参考层在底层, 简称为底钉扎膜堆结构, 如图7(b)所示^[53]. 然而在利用自旋转移矩对磁隧道结进行信息写入的时候, 由于膜堆结构的不对称性, 从平行态切换到反平行态的电流(电子运动方向从自由层向参考层), 要大于从反平行态切换到平行态的电流(电子运动方向从参考层向自由层). 而对于与CMOS工艺兼容的STT-MRAM技术, 用于选择单个比特进行信息写入的晶体管在磁隧道结下方, 即一个晶体管对应一个磁隧道结(1 Transistor 1 MTJ, 1T-1MTJ)^[54], 如图7(a)所示. 而由于晶体管沿着相反方向通电流时其阻值亦具有不对称, 且刚好与底钉扎STT-MTJ翻转电流大小的特征相悖, 不利于器件的操作. 若增加额外的引线将晶体管连接到磁隧道结顶部, 则会增加面积, 不利于更小尺寸器件的集成. 采用顶部钉扎的磁隧道结膜堆结构, 能更好地适应STT-MRAM技术中一个晶体管一个磁隧道结(1T-1MTJ)构型外, 它

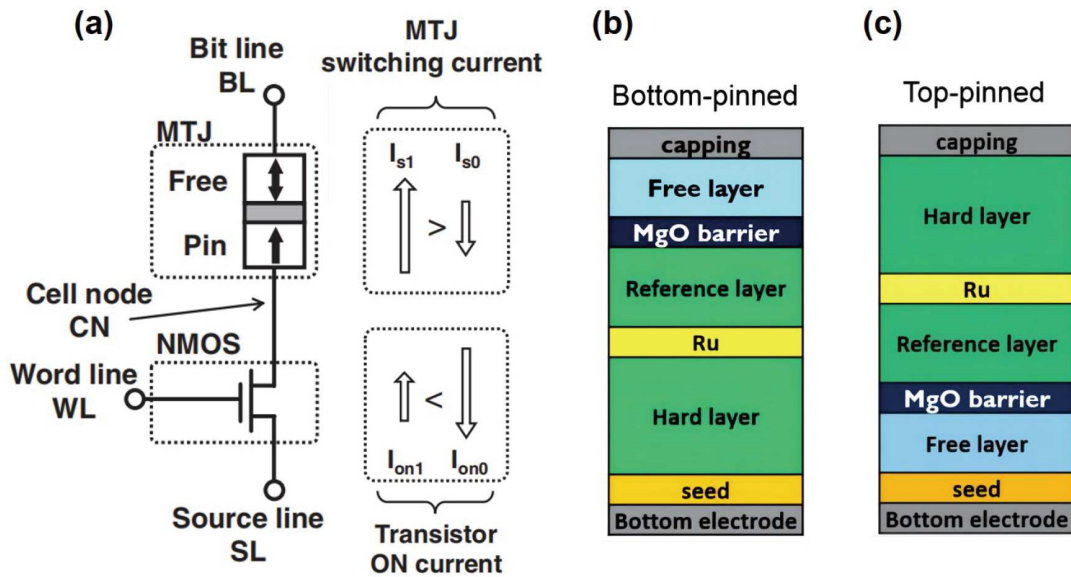


图 7 (网络版彩图) (a) 一个晶体管对应一个磁隧道结(1T-1MTJ)构型示意图^[54], 晶体管的双向开启电流 $I_{on1} > I_{on0}$, 与MTJ的双向切换电流 $I_{s1} > I_{s0}$ 相悖. (b) 底钉扎磁隧道结膜堆结构示意图^[53], 钉扎层通过交换相互作用与参考层耦合在一起, 并位于在自由层下方. (c) 顶钉扎磁隧道结膜堆结构示意图^[53], 钉扎层通过交换相互作用与参考层耦合在一起, 并位于在自由层上方. 图片摘自文献[53,54], 已获取授权

Figure 7 (Color online) (a) Schematic diagram of a 1T-1MTJ configuration^[54], where the bidirectional turn-on current of the transistor ($I_{on1} > I_{on0}$) contradicts the bidirectional switching current of the MTJ ($I_{s1} > I_{s0}$). (b) Schematic diagram of a bottom-pinned MTJ stack^[53]. The pinned layer is coupled to the reference layer through exchange interaction and is located underneath the free layer. (c) Schematic diagram of a top-pinned MTJ stack structure. The pinned layer is coupled to the reference layer through exchange interaction and is located above the free layer^[53]. Figures are reproduced with permission from refs. [53,54].

在自旋轨道力矩(Spin-Orbit Torque)材料和物理探索、斯格明子和磁畴壁赛道存储器件研发等方面有着更明显的优势,如图7(c)所示^[53].一方面因为不同自由层材料的优化需要合适的打底层,若采用底钉扎,生长自由层时自由层下方的MgO不一定适用于材料优化.另一方面基于自旋轨道矩的SOT-MTJ探测器件,需要由SOT沟道产生自旋流并作用于自由层,但是底钉扎构型不利于SOT器件的加工.

4 斯格明子隧穿磁电阻器件研究进展

隧穿磁电阻效应能解决斯格明子电学探测难题.得益于磁隧道结领域的技术积累,利用磁隧道结探测斯格明子已经取得了初步进展.目前在磁隧道结中稳定斯格明子主要有两种方式:一是利用微波电流或者偏置电压,在常规CoFeB/MgO/CoFeB垂直磁隧道结中直接形核斯格明子;二是将稳定斯格明子的磁性多层膜与垂直磁隧道结中自由层铁磁耦合,组成复合自由层,把斯格明子“拓印”在自由层中.

4.1 基于CoFeB/MgO/CoFeB垂直磁隧道结产生和探测斯格明子

(1) 2019年, Penthorn等人^[55]在纳米磁隧道结器件两侧施加微波电流,当微波频率与斯格明子共振时,在高、低两阻态间出现了中间电阻态,这表明自由层中出现了磁畴结构,如图8(a)所示^[55].结合微磁学模拟,该研究表明隧道结参考层的杂散磁场,可以辅助形成纳米尺度斯格明子.这种利用杂散场的研究思路,随后被应用于单个斯格明子电压写入与擦除^[25,26].

(2) CoFeB垂直磁各向异性源自MgO/CoFeB界面轨道杂化.隧道结两侧偏置电压会调节CoFeB层电子态密度,进而影响参考层和自由层CoFeB磁各向异性,实现电压控磁各向异性效果(VCMA),如图8(b)所示^[26,56].2019年,在微米隧道结中, Kasai等人^[57]利用偏置电压调节自由层界面磁各向异性效应,在磁隧道结中产生出斯格明子.

(3) 2022年,通过精确调控膜堆结构, Li等人^[58]在Co/Ta/MgO/CoFeB/Mo磁隧道结中测得斯格明子信号.但该结构参考层没有被钉扎,并且隧穿层与自由层之间插入额外的Ta间隔层以调节DMI,导致最终隧穿磁电阻比例很低,最高TMR结果为5.5%,未来可以进一

步优化膜堆结构,提升隧穿磁电阻的变化率.

(4) 扫描透射X射线成像技术(Scanning Transmission X-ray Microscopy, STXM)可以进行元素分辨的磁结构成像,能够用来原位观测磁隧道结器件中自由层磁矩的空间分布.2024年, Urrestarazu Larrañaga等人^[26]在Si₃N₄窗口上制备出斯格明子磁隧道结器件,在施加偏置脉冲电压同时,开展了扫描透射X射线磁成像研究.如图8(c)所示,利用参考层杂散场与电压调控界面磁各向异性效应,实现磁隧道结内单个斯格明子的产生与湮灭.

(5) CoFeB自由层厚度会影响界面垂直磁各向异性.通过生长具有厚度梯度的CoFeB自由层磁隧道结,可以在自由层部分区域观察到斯格明子.2023年, He等人^[28]采用该方案,通过制备具有厚度梯度的CoFeB自由层磁隧道结,在磁隧道结部分区域观察到磁斯格明子.此外,在自由层下方生长反铁磁层,利用交换偏置效应,在磁隧道结中观察到零场斯格明子.

4.2 复合自由层磁隧道结

在CoFeB/MgO/CoFeB垂直磁隧道结中,一般需要施加微波电流,或者利用电压调控自由层的界面磁各向异性,形成斯格明子.2023年, Guang等人^[59]将斯格明子磁性多层膜与磁隧道结自由层耦合,构成复合自由层磁隧道结,利用层间偶极相互作用,将多层膜中斯格明子拓印到自由层CoFeB中.该方案在CoFeB自由层中稳定斯格明子的同时,保持了高隧穿磁电阻比率.

(1) 复合自由层,是指将CoFeB/MgO/CoFeB磁隧道结中CoFeB自由层与其他磁性层耦合,增强CoFeB自由层的稳定性,提高器件加工过程的容错率^[60,61].2023年, Guang等人^[59]将复合自由层的思路引入斯格明子磁隧道结的研究中.在不需要微波电流或者偏置电压情况下,通过将Pt/Co/Ta磁性多层膜与磁隧道结自由层结合,在磁隧道结自由层CoFeB中产生了室温斯格明子的同时,也观察到可观的隧道磁电阻.

(2) Guang等人^[59]研究的斯格明子磁隧道结,结区直径3 μm .磁力显微镜数据显示隧道结内存在多个斯格明子,由于单个斯格明子对应的隧穿磁电阻小;且该磁隧道结为底钉扎结构,不能与三端斯格明子赛道存储器件兼容.2024年, Chen等人^[25]选择[Ir/Fe/Co/Pt]₃磁性多层膜耦合CoFeB自由层,制备出参考层顶钉扎的

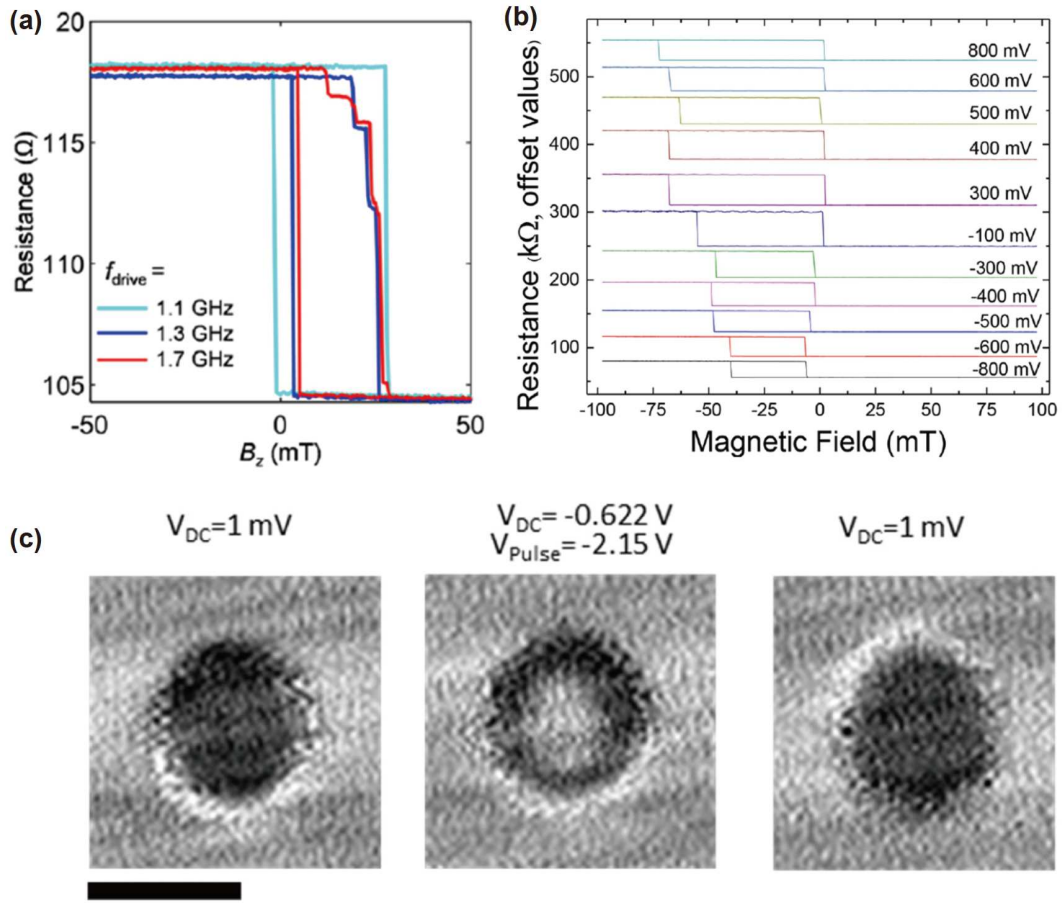


图 8 (网络版彩图) (a) 施加恒定的微波电流, 扫描磁场时所得到的隧穿磁电阻回线. 在 1.3 和 1.7 GHz 微波电流下, 出现了额外的中间阻态, 意味着斯格明子在隧道结内形核^[55]. (b) 不同偏置电压下隧穿磁电阻随外加磁场的变化关系, 由于电压调控界面磁各向异性, 矫顽场随偏置电压增大而增大^[26]. (c) 利用脉冲电压实现单个斯格明子的写入与擦除, 图中比例尺长 500 nm^[26]. 图片摘自文献^[26,55], 已获取授权

Figure 8 (Color online) (a) TMR hysteresis loops measured under a constant microwave current. An intermediate resistance state appears at microwave frequencies of 1.3 and 1.7 GHz, indicating a skyrmion nucleated in the MTJ [55]. (b) TMR hysteresis loops measured under different bias voltages. The coercive field H_c increases with bias voltage due to VCMA effect [26]. (c) Nucleation and annihilation of a skyrmion using pulse voltage. The scale bar is 500 nm [26]. Figures are reproduced with permission from ref. [26,55].

磁隧道结膜堆, 并加工出结区直径 300 nm 斯格明子磁隧道结器件. 采用如图 9(a) 所示测量示意图, 得到了约 95% 的隧穿磁电阻变化比例. 进一步借助磁力显微镜, 实验证实了器件中存在单个斯格明子. 利用如图 9(b) 所示的电压调控界面磁各向异性效应与参考层杂散场, 还在图 9(c) 中磁隧道结内, 实现了单个斯格明子的高效写入与擦除.

(3) Chen 等人^[25]使用顶钉扎磁隧道结膜堆结构, 使得自由层能兼容更复杂的器件结构设计. 由于斯格明子独特的拓扑准粒子属性, 运动的斯格明子在存储器件、逻辑运算、人工智能计算等方面具有广阔的应

用前景. 如图 9(e) 所示, 将底电极加工成斯格明子赛道, 赛道上特定位置保留磁隧道结, 利用脉冲电流驱动斯格明子在自由层运动的同时, 在磁隧道结上方探测斯格明子所产生的隧道磁电阻. 2024 年, Zhao 等人^[27]选择图 9(d) 所示的顶钉扎参考层、[Pt/Co/Ta]₁₀/CoFeB 复合自由层的斯格明子磁隧道结膜堆结构, 将自由层制备成连续赛道, 演示了三端类赛道存储器件. 如图 9(f) 所示, 在赛道两侧施加脉冲电流, 电流所产生的自旋轨道力矩效应驱动斯格明子运动, 通过时间分辨的隧穿磁电阻测量, 实时探测了运动斯格明子经过隧道结下方时所产生的磁电阻变化.

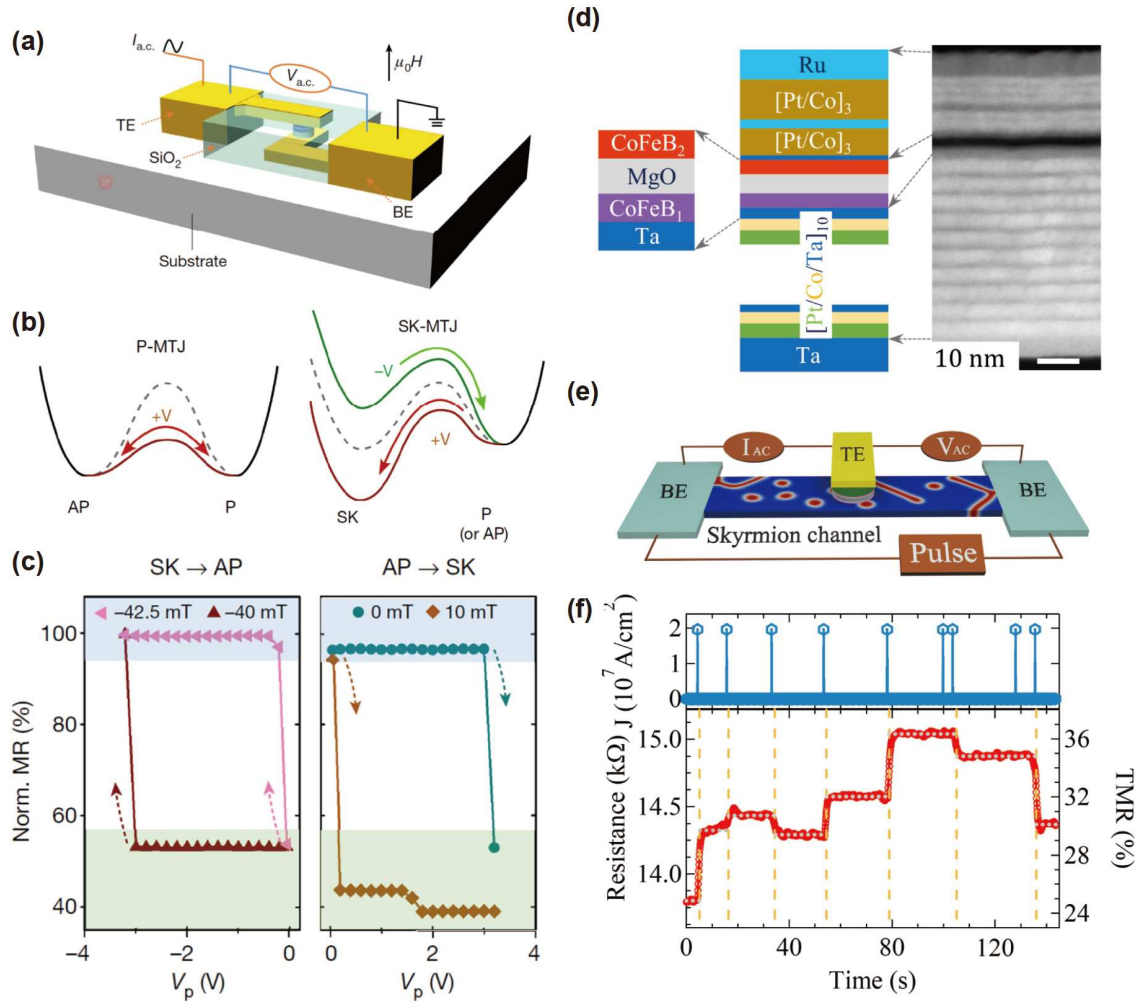


图 9 (网络版彩图) (a) 斯格明子磁隧道结电学测量示意图^[25]. (b) 电压调控磁隧道结界面磁各向异性原理示意图. 对于垂直磁隧道结, 电压实现高、低阻态切换; 对于斯格明子磁隧道结, 电压可以切换斯格明子态与高低阻态^[25]. (c) 脉冲电压对磁隧道结器件内单个斯格明子的写入与擦除^[25]. (d) 复合自由层磁隧道结膜堆示意图(左), 膜堆截面高角环形暗场扫描透射电子显微镜图(右)^[27]. (e) 利用磁隧道结探测运动斯格明子的三端赛道器件电路示意图. (f) 基于图(e)的测试电路, 底电极施加脉冲电流得到的时间依赖的隧穿磁电阻信号, 隧穿磁电阻的变化表明斯格明子在隧道结结区下方移动, 引起自由层CoFeB畴状态的变化^[27]. 图片摘自文献^[25,27], 已获取授权

Figure 9 (Color online) (a) Schematic of electrical measurement of skyrmionic MTJs [25]. (b) Illustration of VCMA effects in MTJs. For perpendicular MTJs, voltage enables switching between low and high resistance states. For skyrmionic MTJ, the voltage enables switching between the skyrmion states and low/high states [25]. (c) Voltage-induced nucleation and annihilation of a single skyrmion in the same MTJ device [25]. (d) Schematic of a MTJ stack with hybrid free layer (left) and the corresponding cross-section HAADF-STEM image (right) [27]. (e) Schematic of a three-terminal racetrack device utilizing MTJs to detect mobile skyrmions [27]. (f) The time-dependent TMR signal that is obtained under pulsed current applied along the bottom racetrack, as shown in panel (e). The change in the TMR ratio indicates the motion of skyrmions underneath the MTJ pillar along the racetrack, thereby causing changes in the magnetic domain state of the CoFeB free layer [27]. Figures are reproduced with permission from refs. [25,27].

5 斯格明子磁隧道结发展趋势

近年来, 斯格明子磁隧道结的相关研究取得了较大进展. 在这类膜堆结构中, 磁性参考层的引入会产生杂散场, 影响自由层斯格明子运动^[61]. 各向异性隧

穿磁电阻效应与非共线隧穿磁电阻效应不需要磁性参考层, 但目前尚未有室温实验报道. 基于密度泛函理论, 2024年, Li等人^[63]研究了 Fe_3GeTe_2 中斯格明子的非共线隧穿磁电阻效应, 计算得到了高达隧穿磁电阻变化率392%. 由于参考层不具有磁性, 避免了参考层结

区杂散场对自由层斯格明子的钉扎效应. 但是非共线磁电阻效应只有在斯格明子尺寸小、磁矩非共线程度强的情形才有高的电阻变化率, 因此在样品选择和器件制备方面存在较大难度.

斯格明子磁隧道结还有望和逻辑计算、神经形态计算等结合, 构建斯格明子存算一体器件和芯片^[64,65]. 图10(a)通过独特的斯格明子器件结构设计, 提出了逻辑运算的原型方案, 若磁隧道结能将斯格明子输入和输出转换为电学信号, 有望实现全电控斯格明子逻辑门^[66]. 若将斯格明子层换成人工合成反铁磁多层膜, 可以进一步实现反铁磁斯格明子逻辑器件^[67], 在规避斯格明子霍尔效应的同时, 还能实现高速的器件响应.

神经形态计算是仿照生物神经系统的计算方式, 可以解决传统计算机中冯诺依曼架构的存储墙问题. 如图10(b)所示, 斯格明子在自由层中做随机布朗运动, 在特定位置制备磁隧道结, 实时读取斯格明子位置, 可用于实现储备池计算^[68]. 斯格明子磁隧道结还可以用于如图10(c)所示人工突触器件, 斯格明子的数目作为施加在人工突触上的权重, 可以演示类似生物突触的增强(Potential)和抑制(Depression)效果^[69]. 通过生长梯度厚度自由层, 调控自由层的界面磁各向异性, 如图10(d)所示^[70], 在斯格明子磁隧道结器件中能实现

类似生物突触的“泄露-积分-触发”功能(Leaky-Integrate-Fire). 如图10(e)所示, 兼容隧道结构型的斯格明子还可用作量子比特, 在量子计算领域也具有应用潜力^[71].

6 总结与展望

磁斯格明子独特的拓扑属性, 使得它在具有隧穿磁电阻的同时, 还有各向异性隧穿磁电阻和非共线隧穿磁电阻. 后两种效应不需要磁性参考层, 可以规避参考层的钉扎效应. 受限与斯格明子膜堆和器件加工手段, 斯格明子各向异性隧穿磁电阻和非共线隧穿磁电阻的器件研究, 目前依然以理论和计算为主, 相关的实验工作有待发展.

在依赖磁性参考层的斯格明子磁隧道结领域, 出现了微米结、纳米结及三端赛道存储器等原型器件. 磁隧道结中的斯格明子可以通过微波电流、脉冲电压产生, 也可以采用复合自由层的方式, 在自由层CoFeB中“拓印”出斯格明子. 同时, 顶钉扎的斯格明子磁隧道结可以用于开发功能优异的斯格明子存储、逻辑和运算器件, 还可用于研究全电控斯格明子人工智能器件, 具有极大的研究和应用价值.

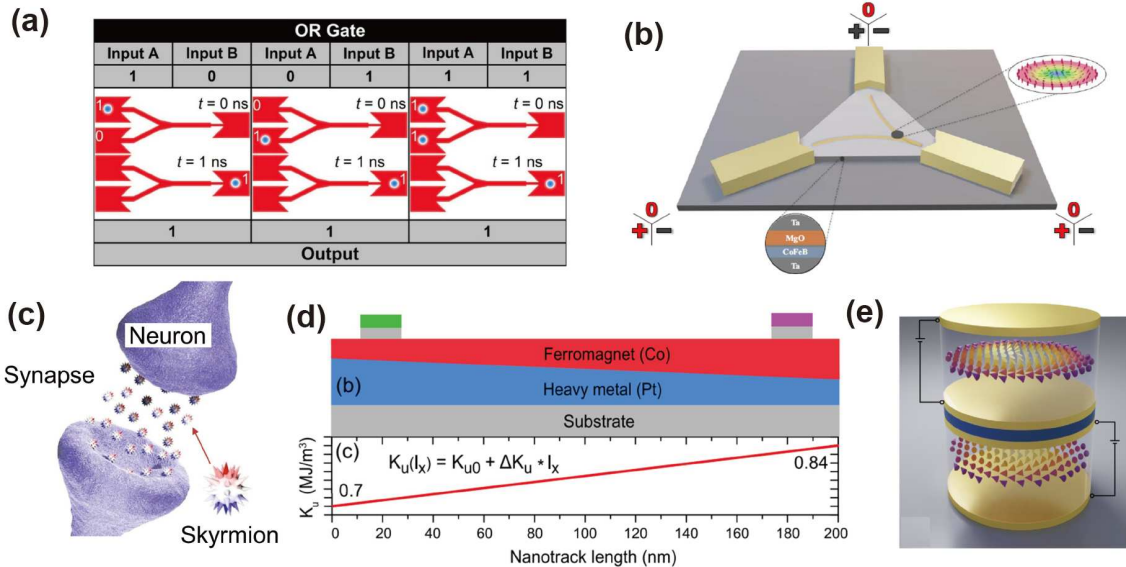


图 10 (网络版彩图) (a) 斯格明子逻辑或门的理论方案^[66]. (b) 斯格明子布朗运动储备池计算器件示意图^[68]. (c) 斯格明子人工突触器件原理示意图^[69]. (d) 斯格明子人工突触器件, 具有“泄露-积分-触发”功能^[70]. (e) 斯格明子量子比特^[71]. 图片摘自文献^[66,68–71], 已获取授权

Figure 10 (Color online) (a) Skyrmion OR logic gate ^[66]. (b) Schematic of the Brownian reservoir computing devices ^[68]. (c) Schematic of a skyrmion-based artificial synapse ^[69]. (d) Schematic of the skyrmion-based artificial neuron device with the leaky-integrate-fire function ^[70]. (e) A proposal for the skyrmion qubit ^[71]. Figures are reproduced with permission from refs. ^[66,68–71].

参考文献

- 1 Röbber U K, Bogdanov A N, Pfleiderer C. Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature*, 2006, 442: 797–801
- 2 Mühlbauer S, Binz B, Jonietz F, et al. Skyrmion lattice in a chiral magnet. *Science*, 2009, 323: 915–919
- 3 Yu X Z, Onose Y, Kanazawa N, et al. Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal. *Nature*, 2010, 465: 901–904
- 4 Nagaosa N, Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nat Nanotech*, 2013, 8: 899–911
- 5 Everschor-Sitte K, Sitte M. Real-space Berry phases: Skyrmion soccer (invited). *J Appl Phys*, 2014, 115: 172602
- 6 Soumyanarayanan A, Reyren N, Fert A, et al. Emergent phenomena induced by spin-orbit coupling at surfaces and interfaces. *Nature*, 2016, 539: 509–517
- 7 Wiesendanger R. Nanoscale magnetic skyrmions in metallic films and multilayers: A new twist for spintronics. *Nat Rev Mater*, 2016, 1: 16044
- 8 Kang W, Huang Y, Zhang X, et al. Skyrmion-electronics: An overview and outlook. *Proc IEEE*, 2016, 104: 2040–2061
- 9 Jiang W, Chen G, Liu K, et al. Skyrmions in magnetic multilayers. *Phys Rep*, 2017, 704: 1–49
- 10 Fert A, Reyren N, Cros V. Magnetic skyrmions: Advances in physics and potential applications. *Nat Rev Mater*, 2017, 2: 17031
- 11 Jiang W, Zhang X, Yu G, et al. Direct observation of the skyrmion Hall effect. *Nat Phys*, 2017, 13: 162–169
- 12 Litzius K, Lemesch I, Krüger B, et al. Skyrmion Hall effect revealed by direct time-resolved X-ray microscopy. *Nat Phys*, 2017, 13: 170–175
- 13 Everschor-Sitte K, Masell J, Reeve R M, et al. Perspective: Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field. *J Appl Phys*, 2018, 124: 240901
- 14 Wang C J, Wang P, Zhou Y, et al. Formation of magnetic biskyrmions mediated by an intrinsic emergent monopole-antimonopole pair. *npj Quantum Mater*, 2022, 7: 78
- 15 Zhou Y, Li S, Liang X, et al. Topological spin textures: Basic physics and devices. *Adv Mater*, 2025, 37: 2312935
- 16 Shen Y, Zhang Q, Shi P, et al. Optical skyrmions and other topological quasiparticles of light. *Nat Photon*, 2024, 18: 15–25
- 17 Nayak A K, Kumar V, Ma T, et al. Magnetic antiskyrmions above room temperature in tetragonal Heusler materials. *Nature*, 2017, 548: 561–566
- 18 Jiang W, Upadhyaya P, Zhang W, et al. Blowing magnetic skyrmion bubbles. *Science*, 2015, 349: 283–286
- 19 Woo S, Litzius K, Krüger B, et al. Observation of room-temperature magnetic skyrmions and their current-driven dynamics in ultrathin metallic ferromagnets. *Nat Mater*, 2016, 15: 501–506
- 20 Soumyanarayanan A, Raju M, Gonzalez Oyarce A L, et al. Tunable room-temperature magnetic skyrmions in Ir/Fe/Co/Pt multilayers. *Nat Mater*, 2017, 16: 898–904
- 21 Maccariello D, Legrand W, Reyren N, et al. Electrical detection of single magnetic skyrmions in metallic multilayers at room temperature. *Nat Nanotech*, 2018, 13: 233–237
- 22 Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films. *Phys Lett A*, 1975, 54: 225–226
- 23 Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, et al. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers. *Nat Mater*, 2004, 3: 862–867
- 24 Ikeda S, Miura K, Yamamoto H, et al. A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction. *Nat Mater*, 2010, 9: 721–724
- 25 Chen S, Lourembam J, Ho P, et al. All-electrical skyrmionic magnetic tunnel junction. *Nature*, 2024, 627: 522–527
- 26 Urrestarazu Larrañaga J, Sisodia N, Guedas R, et al. Electrical detection and nucleation of a magnetic skyrmion in a magnetic tunnel junction observed via *Operando* magnetic microscopy. *Nano Lett*, 2024, 24: 3557–3565
- 27 Zhao M, Chen A, Huang P Y, et al. Electrical detection of mobile skyrmions with 100% tunneling magnetoresistance in a racetrack-like device. *npj Quantum Mater*, 2024, 9: 50
- 28 He B, Hu Y, Zhao C, et al. Realization of zero-field skyrmions in a magnetic tunnel junction. *Adv Elect Mater*, 2023, 9: 2201240
- 29 Heinze S, von Bergmann K, Menzel M, et al. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions. *Nat Phys*, 2011, 7: 713–718
- 30 Romming N, Hanneken C, Menzel M, et al. Writing and deleting single magnetic skyrmions. *Science*, 2013, 341: 636–639
- 31 Bode M, Heinze S, Kubetzka A, et al. Magnetization-direction-dependent local electronic structure probed by scanning tunneling spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 237205
- 32 Gould C, Rüster C, Jungwirth T, et al. Tunneling anisotropic magnetoresistance: A spin-valve-like tunnel magnetoresistance using a single magnetic layer. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 117203

- 33 Giddings A D, Khalid M N, Jungwirth T, et al. Large tunneling anisotropic magnetoresistance in (Ga, Mn)As nanoconstrictions. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 127202
- 34 von Bergmann K, Menzel M, Serrate D, et al. Tunneling anisotropic magnetoresistance on the atomic scale. *Phys Rev B*, 2012, 86: 134422
- 35 Hanneken C, Otte F, Kubetzka A, et al. Electrical detection of magnetic skyrmions by tunnelling non-collinear magnetoresistance. *Nat Nanotech*, 2015, 10: 1039–1042
- 36 Chappert C, Fert A, Van Dau F N. The emergence of spin electronics in data storage. *Nat Mater*, 2007, 6: 813–823
- 37 Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nat Mater*, 2004, 3: 868–871
- 38 Ikegawa S, Mancoff F B, Janesky J, et al. Magnetoresistive random access memory: Present and Future. *IEEE Trans Electron Devices*, 2020, 67: 1407–1419
- 39 Wei H X, Qin Q H, Ma M, et al. 80% tunneling magnetoresistance at room temperature for thin Al-O barrier magnetic tunnel junction with CoFeB as free and reference layers. *J Appl Phys*, 2007, 101: 09B501
- 40 Mathon J, Umerski A. Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction. *Phys Rev B*, 2001, 63: 220403
- 41 Butler W H, Zhang X G, Schulthess T C, et al. Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches. *Phys Rev B*, 2001, 63: 054416
- 42 Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, et al. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 082508
- 43 Scheike T, Wen Z, Sukegawa H, et al. 631% room temperature tunnel magnetoresistance with large oscillation effect in CoFe/MgO/CoFe(001) junctions. *Appl Phys Lett*, 2023, 122: 112404
- 44 Engel B N, Akerman J, Butcher B, et al. A 4-Mb toggle MRAM based on a novel bit and switching method. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 132–136
- 45 Ralph D C, Stiles M D. Spin transfer torques. *J Magn Magn Mater*, 2008, 320: 1190–1216
- 46 Han X, Wang X, Wan C, et al. Spin-orbit torques: Materials, physics, and devices. *Appl Phys Lett*, 2021, 118: 120502
- 47 Shao Y, Khalili Amiri P. Progress and application perspectives of voltage-controlled magnetic tunnel junctions. *Adv Mater Technol*, 2023, 8: 2300676
- 48 Tong Z, Wang X, Wu X, et al. Modeling of magnetic tunnel junction switching by voltage-controlled exchange coupling. *IEEE Electron Device Lett*, 2024, 45: 1449–1452
- 49 Zhang D, Bapna M, Jiang W, et al. Bipolar electric-field switching of perpendicular magnetic tunnel junctions through voltage-controlled exchange coupling. *Nano Lett*, 2022, 22: 622–629
- 50 Guo Z, Yin J, Bai Y, et al. Spintronics for energy-efficient computing: An overview and outlook. *Proc IEEE*, 2021, 109: 1398–1417
- 51 Nishimura N, Hirai T, Koganei A, et al. Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory. *J Appl Phys*, 2002, 91: 5246–5249
- 52 Cao K, Li H, Cai W, et al. Low-temperature performance of nanoscale perpendicular magnetic tunnel junctions with double MgO-interface free layer. *IEEE Trans Magn*, 2019, 55: 1–4
- 53 Liu E, Wu Y C, Couet S, et al. Synthetic-ferromagnet pinning layers enabling top-pinned magnetic tunnel junctions for high-density embedded magnetic random-access memory. *Phys Rev Appl*, 2018, 10: 054054
- 54 Koike H, Ohsawa T, Miura S, et al. Wide operational margin capability of 1 kbit spin-transfer-torque memory array chip with 1-PMOS and 1-bottom-pin-magnetic-tunnel-junction type cell. *Jpn J Appl Phys*, 2014, 53: 04ED13
- 55 Penthorn N E, Hao X, Wang Z, et al. Experimental observation of single skyrmion signatures in a magnetic tunnel junction. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 257201
- 56 Wang W G, Li M, Hageman S, et al. Electric-field-assisted switching in magnetic tunnel junctions. *Nat Mater*, 2012, 11: 64–68
- 57 Kasai S, Sugimoto S, Nakatani Y, et al. Voltage-controlled magnetic skyrmions in magnetic tunnel junctions. *Appl Phys Express*, 2019, 12: 083001
- 58 Li S, Du A, Wang Y, et al. Experimental demonstration of skyrmionic magnetic tunnel junction at room temperature. *Sci Bull*, 2022, 67: 691–699
- 59 Guang Y, Zhang L, Zhang J, et al. Electrical detection of magnetic skyrmions in a magnetic tunnel junction. *Adv Elect Mater*, 2023, 9: 2200570
- 60 Liu E, Swerts J, Couet S, et al. [Co/Ni]-CoFeB hybrid free layer stack materials for high density magnetic random access memory applications. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 132405

- 61 Raymenants E, Bultynck O, Wan D, et al. Nanoscale domain wall devices with magnetic tunnel junction read and write. *Nat Electron*, 2021, 4: 392–398
- 62 Chen H, Bouckaert W, Majetich S A. Tunnel magnetoresistance detection of skyrmions. *J Magn Magn Mater*, 2022, 541: 168552
- 63 Li D, Haldar S, Heinze S. Proposal for all-electrical skyrmion detection in van der Waals tunnel junctions. *Nano Lett*, 2024, 24: 2496–2502
- 64 Chen X, Araujo F A, Riou M, et al. Forecasting the outcome of spintronic experiments with neural ordinary differential equations. *Nat Commun*, 2022, 13: 1016
- 65 Sun Y, Lin T, Lei N, et al. Experimental demonstration of a skyrmion-enhanced strain-mediated physical reservoir computing system. *Nat Commun*, 2023, 14: 3434
- 66 Zhang X, Ezawa M, Zhou Y. Magnetic skyrmion logic gates: Conversion, duplication and merging of skyrmions. *Sci Rep*, 2015, 5: 9400
- 67 Fattouhi M, Mak K Y, Zhou Y, et al. Logic gates based on synthetic antiferromagnetic bilayer skyrmions. *Phys Rev Appl*, 2021, 16: 014040
- 68 Raab K, Brems M A, Beneke G, et al. Brownian reservoir computing realized using geometrically confined skyrmion dynamics. *Nat Commun*, 2022, 13: 6982
- 69 Song K M, Jeong J S, Pan B, et al. Skyrmion-based artificial synapses for neuromorphic computing. *Nat Electron*, 2020, 3: 148–155
- 70 Li S, Kang W, Huang Y, et al. Magnetic skyrmion-based artificial neuron device. *Nanotechnology*, 2017, 28: 31LT01
- 71 Psaroudaki C, Panagopoulos C. Skyrmion qubits: A new class of quantum logic elements based on nanoscale magnetization. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 067201

Recent progress of the skyrmionic magnetic tunnel junctions

ZHAO MengQi^{1,2}, HE Hang^{1,2} & JIANG WanJun^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Frontier Science Center for Quantum Information, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Corresponding author (email: jiang_lab@tsinghua.edu.cn)

Magnetic skyrmions are nonlinear spin textures characterized by unique topological stability and dynamic properties. Due to their nanometric size, stable spin structure, and susceptible to different manipulation methods, skyrmions are regarded as promising information carriers for next-generation spintronic memory and computing devices. Three prerequisites should be achieved prior to device applications: generation, manipulation, and detection. In recent years, significant progress have been made in the generation and manipulation of skyrmions; however, there have been relatively few reports on efficient electrical detection of skyrmions, which hinders their application. Based on the quantum-mechanical effect and the spin-dependent density of states, the tunneling magnetoresistance (TMR) enables the conversion of the presence and absence of skyrmion into robust electrical signals with large on/off ratios, providing a viable approach for the efficient electrical detection of skyrmions. This review highlights three characteristic TMR effects associated with skyrmions: conventional tunnel magnetoresistance (TMR), tunnel anisotropic magnetoresistance (TAMR), and non-collinear magnetoresistance (NCMR). We further present an overview of the classification and development of magnetic tunnel junctions (MTJs), along with the latest advances in skyrmionic MTJs. In the end, the application prospects of skyrmionic MTJs and projections of their future developments will be discussed.

spintronics, magnetic skyrmions, magnetic tunnel junctions, tunneling magnetoresistance, racetrack memory

PACS: 03.75.Lm, 68.37.Ef, 75.50.Ss, 75.75.+a, 85.75.Dd

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0620](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0620)