通过弯曲电流实现无场自旋轨道力矩驱动的垂直磁性隧道结切换

Vaishnavi Kateel[1,2]、Viola Krizakova[3], Siddharth Rao[1]*、Kaiming Cai[1], Mohit Gupta[1], Maxwel Gama Monteiro[1,2], Farrukh Yasin[1], Bart Sorée[1,2], Johan De Boeck[1,2], Sebastien Couet[1], Pietro Gambardella[3], Gouri Sankar Kar[1], Kevin Garello[1,4]**

1. IMEC，比利时鲁汶 3001；2. 鲁汶大学，比利时鲁汶 3001；3. 苏黎世联邦理工学院材料系，瑞士苏黎世 8093；4. 格勒诺布尔-阿尔卑斯大学、法国原子能和替代能源委员会、法国国家科学研究中心、格勒诺布尔国立综合理工学院、SPINTEC，法国格勒诺布尔 38000。

关键词：无场切换、自旋轨道力矩、磁性隧道结、存储器、磁性随机存取存储器、自旋电子学

摘要：电流诱导自旋轨道力矩（SOT）能够快速、高效地操控磁性隧道结（MTJ）的磁态，使其成为存储器、存内计算和逻辑应用的理想选择。然而，垂直磁化自旋轨道力矩磁性隧道结要实现确定性翻转，需要外部磁场，这限制了其在实际应用中的实施。在此，我们通过对自旋轨道力矩通道进行塑形，使自旋轨道力矩电流形成“弯曲”，从而为自旋轨道力矩磁性隧道结器件引入一种无场切换（FFS）方案。电荷电流产生的弯曲会形成空间上非均匀的自旋流，进而在相邻的磁性自由层上产生非均匀自旋轨道力矩，实现确定性翻转。我们在纳秒时间尺度下的缩尺寸自旋轨道力矩磁性隧道结中，通过实验验证了无场切换。该方案具有可扩展性、不受材料限制，并且易于兼容晶圆级制造，从而为开发纯电流驱动的自旋轨道力矩系统开辟了路径。

由于铁磁体具有非易失性、CMOS兼容性和高运行速度，磁性隧道结（MTJ）的电操控对于嵌入式存储器应用和自旋逻辑正变得日益重要[1]。尤其是，采用自旋轨道力矩（SOT）切换的磁性隧道结颇具前景，这得益于其高耐久性（$> 10^{14}$）、高能效（< 1 fJ）和快速切换速度（< 1 ns）特性[2–7]。在自旋轨道力矩磁性隧道结中，自旋轨道力矩通道（重金属）中的自旋霍尔效应，以及自旋轨道力矩通道/铁磁自由层（FL）界面处的界面拉什巴相互作用，会产生具有面内自旋极化的自旋流，从而对磁化强度施加瞬时力矩。为实现超快的自旋轨道力矩诱导切换，通常优先采用垂直磁化磁性隧道结（pMTJ）[4]。然而，在这种构型中，所产生的力矩无法在本质上区分垂直磁化磁性隧道结的两种状态，因而导致非确定性翻转[8]。为实现自旋轨道力矩诱导的确定性翻转，需要打破时间反演对称性；传统上，这是通过沿电流方向施加外部面内磁场（$\boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}}$）来实现的。然而，使用这种外部磁场会削弱自旋轨道力矩磁性隧道结在嵌入式存储器应用中的潜力。

文献中已提出多种替代方案来移除或取代这种外场，大致可分为四类[9]：(i). 通过交换偏置[10] 产生内建磁场，或在垂直磁化磁性隧道结结构中生长一个解耦的面内磁体[11–13]；(ii). 利用晶体材料（PtCu[14,15], 、WTe_2[16–18]）、拉什巴场调制[19,20], 或竞争性的自旋霍尔角[21] 产生额外的自旋流；(iii). 混合方案将畴壁运动[22], 、自旋转移力矩[23], 、Dzyaloshinskii–Moriya相互作用（DMI）调制[24], 、由面内磁化铁磁层产生的自旋流[25]或耦合纳米磁体[26]与自旋轨道力矩诱导切换相结合；最后，(iv). 通过梯度产生结构不对称性，梯度的.....

自由层厚度 [27,28] 或自旋轨道转矩通道厚度 [29]，倾斜自由层的易轴[30] 并设计自由层几何结构[31]。

在本研究中，我们通过在自旋轨道力矩通道中引入几何曲率（图 1a），提出了一种适用于 SOT-pMTJ 的新型无场切换（无场切换）方案。该曲率在系统中产生结构不对称性，并使自旋轨道力矩通道内形成非均匀电荷电流流动，从而改变自旋流的流动及其极化。这些自旋流的变化进一步在自由层上产生非均匀自旋轨道力矩，进而打破时间反演对称性。我们展示了低至 5 ns 电流脉冲下的确定性无场切换，并通过微磁模拟和有限元模拟阐明了其潜在机制。重要的是，该方法不会对自旋轨道力矩通道或自由层的材料选择施加额外限制。通过在自旋轨道力矩通道中诱导曲率来操控磁体，凭借其可扩展性、易于集成和可重复性，在实际应用中展现出令人振奋的潜力。

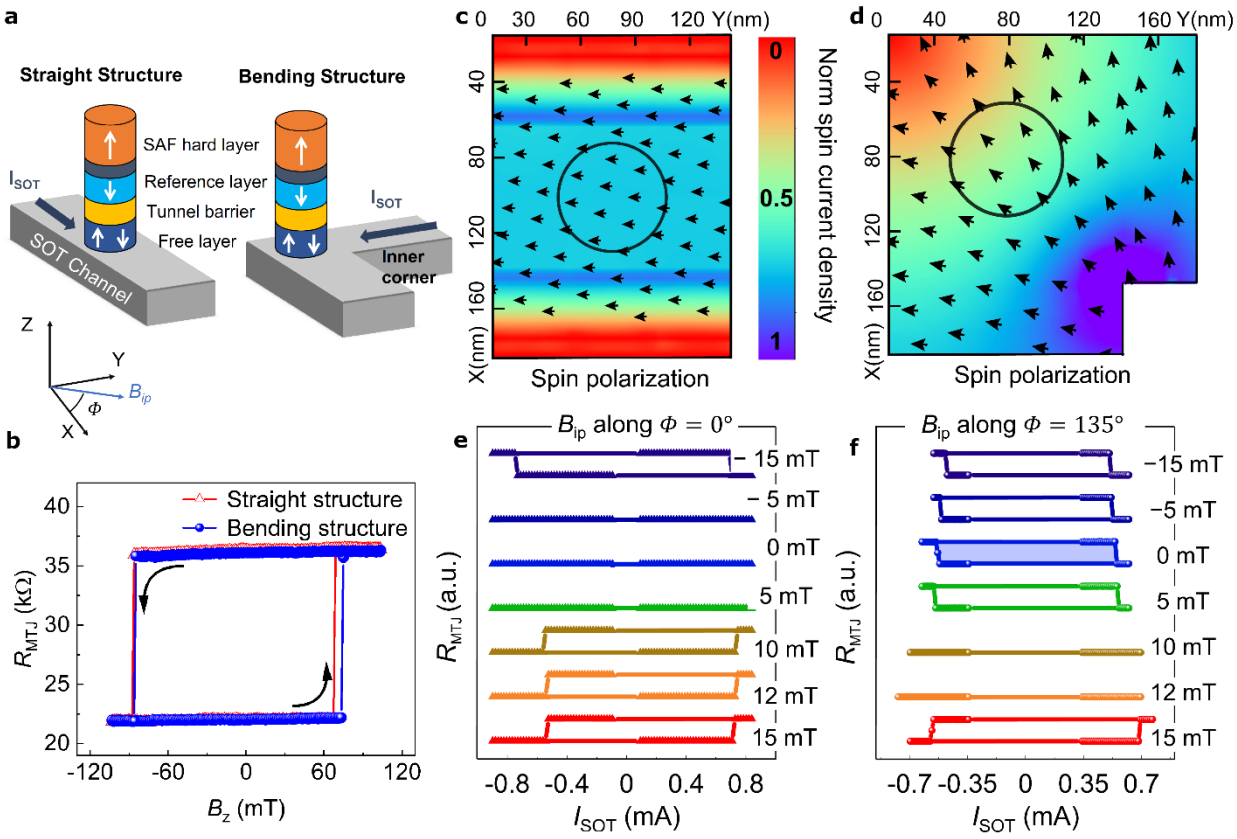


图 *1.* 弯曲结构中的无场切换及与直线结构的比较。 *(a)* 示意图展示了 直线结构和弯曲结构中 pMTJ 在自旋轨道力矩通道上的位置。 *(b)* 直线结构和弯曲结构中自由层的磁滞回线。 *(c and d)* 自旋轨道力矩通道中归一化自旋流密度的模拟色彩图（$\boldsymbol{J}_S$），箭头表示自旋极化方向（$\boldsymbol{\sigma}$）；（*c*）直线结构中，$\boldsymbol{\sigma}$ 沿 y 方向，MTJ 周围的$\boldsymbol{J}_S$ 均匀，但靠近 VIA 接触点的边缘处存在变化。（*d*）由于电流在拐角处弯曲，弯曲结构中的 MTJ 经历$\boldsymbol{J}_S$ 梯度，且$\boldsymbol{\sigma}$ 方向发生变化。*(e and f)*沿（*e*）$\Phi = 0°$的直线结构和（*f*）$\Phi = 135°$的弯曲结构，在不同$\boldsymbol{B}_{ip}$ 幅值下的 20 次直流翻转回线平均值。

在本研究中，我们按照文献[6]的报道，在300 mm晶圆上制备了基线顶部钉扎型自旋轨道力矩-磁性隧道结（SOT-MTJ），并将其退火至300 °C。该磁性隧道结由一层0.9 nm厚的CoFeB自由层、一层电阻面积乘积为~51 Ω·μm^2, 的MgO势垒层，以及一层1.1 nm厚的CoFeB参考层组成；参考层钉扎在合成反铁磁（SAF）硬层上。硬层

将参考层固定在 $-z$ 方向，使得当自由层磁化分别指向 $-z$（$+z$）方向时，磁性隧道结处于低电阻平行态（P）或高电阻反平行态（AP）。MTJ柱体的横截面为圆形，标称直径为 60、80 和 100 纳米。磁性隧道结沉积在厚度为 3.5 nm 的 β-W 自旋轨道力矩通道上，其电阻率为 160 μΩ cm；根据我们的二次谐波测量[32]，估算出的有效自旋霍尔角（θ_{SH}）为 −0.43。各尺寸对应的所有特性汇总于补充信息 I。下文中，本文将重点讨论 60 纳米磁性隧道结的结果。

本研究中使用的器件设计（图 1a）包括标准的直线型自旋轨道转矩通道，磁性隧道结位于通道中心，称为直线结构（作为参考结构）；以及拐角型自旋轨道转矩通道，磁性隧道结位于拐角处，称为弯曲结构。两种结构的自旋轨道转矩通道宽度均为 140 nm；与此同时，弯曲结构的长度比直线结构更长。弯曲结构较长的长度导致其电阻（4350 Ω）高于直线结构（500 Ω）。两种结构的磁性隧道结均呈现方形磁滞回线（图 1b），且磁性相近。每种类型超过 20 个结构的中位数分别为：隧道磁电阻比（TMR）为~73 ± 4 %，矫顽场（B_c）为 ~ 60 ± 6 mT，沿 z 方向的偏置场为 $|B_{off}|$ ~ 6.8± 4 mT（偏向反平行态），各向异性场为 B_k ~180 ± 3.4 mT。

使用 COMSOL 对两种结构中沿 z 方向的自旋流幅值（$\boldsymbol{J}_s$）表面分布及自旋流极化方向（$\boldsymbol{\sigma}$）进行了模拟（补充信息 II）。对于直线结构，当沿 $+x$ 方向施加电荷电流时，由于自旋霍尔效应，可观察到恒定的 $\boldsymbol{J}_s$，以及沿 $-y$ 方向均匀分布的 $\boldsymbol{\sigma}$（图 1c）。在弯曲结构中，内侧拐角处电子流方向的重新定向会导致 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})$ 发生旋转，从而改变整个自由层[33]中的自旋轨道转矩方向。此外，空间分布

电荷电流 ($J_C(r)$) 会导致 $\boldsymbol{J_S}$ 的振幅不均匀（图1d），如 $\boldsymbol{J_S}(\mathbf{r}) \sim \hbar/2e(\boldsymbol{J}_C(\mathbf{r}) \times \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}))\theta_{SH}$ 所示，从而使 xy 平面内的 $\boldsymbol{J_S}(\mathbf{r})$ 产生梯度，且 $J_s(r)$ 在内侧拐角处振幅最高。由于自旋轨道力矩通道的内侧拐角处电流积聚较多，所产生的自旋电流梯度与电荷电流方向无关。重要的是，由于非均匀的 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})$ 和 $\boldsymbol{J_S}(\mathbf{r})$，自由层受到空间变化的自旋轨道力矩作用；因此，这打破了时间反演对称性，并使确定性翻转成为可能。我们通过向自旋轨道力矩通道通入振幅可变的直流电流 (I_{SOT})，实现自旋轨道力矩诱导的磁化翻转。通过向磁性隧道结通入较低的读取电流 (I_{read} ~5 μA)，对自由层状态进行脉冲后读出。翻转过程中，可在 xy 平面内施加最大振幅为 40 mT 的 B_{ip}。图1e展示了在 x 方向施加不同 B_{ip} 时，直线结构典型的 R_{MTJ}-I_{SOT} 翻转回线。翻转条件符合负自旋霍尔角的预期；在零外场下，器件无法实现确定性翻转，且需要至少 B_{ip} ~±10 mT 才能确定切换极性。施加正向 I_{SOT} 时，当 $B_{ip} < -10$ mT，磁性隧道结状态从反平行态 (AP) 翻转至平行态 (P)；而当 $B_{ip} > 10$ mT，则发生平行态至反平行态转变。因此，对于直线结构，正向或负向 B_{ip} 下的自旋轨道力矩翻转分别产生顺时针 (CW) 或逆时针 (CCW) 翻转回线。器件的平均翻转电流 (I_{SW}) 为 ~500 μA，对应于 $B_{ip} = -10$ mT 时 9.5×10^7 A cm^{-2} 的翻转电流密度 (J_{SW})。值得注意的是，对于图1f所示的弯曲结构，在 $B_{ip} = 0$ mT 时会发生确定性双极性翻转，这证实了所提出的概念：自由层下方的非均匀自旋轨道力矩及 J_S 梯度导致时间反演对称性破缺。弯曲结构中的无场切换回线具有顺时针极性，与 $B_{ip} < 0$下直线结构的情况相同，这表明弯曲自旋轨道力矩通道所产生的有效自旋轨道转矩场 (B_{eff}) 的方向。当施加 B_{ip}~10 mT 时（在

−45°面内，此时对应有效的*xy* $\boldsymbol{J}_C$ 方向），器件呈现随机切换；进一步增大$\boldsymbol{B}_{ip}$ 后，切换极性则从顺时针回线反转为逆时针回线。切换极性的这一变化表明，对于$\boldsymbol{B}_{ip} > 15$ mT，$\boldsymbol{B}_{ip}$ 的作用强于$\boldsymbol{B}_{eff}$。弯曲结构的平均I_{SW} 与直线结构相近，为~530 μA，对应于$J_{SW} = 1 \times 10^8$ A cm^{-2} （$B_{ip} = 0$ mT时）。我们在基于 W 的自旋轨道力矩通道上，使用尺寸为 80 和 100 nm 的磁性隧道结观察到了无场切换。值得注意的是，我们在基于铂的磁隧道结中也观察到了无场切换，但切换极性相反。由于 Pt 的自旋霍尔角与 W 相反，这证实了弯曲结构中的无场切换由自旋轨道力矩物理主导（补充信息III）。

为研究弯曲结构中 B_{eff} 的方向和幅值，我们对 B_{ip} 进行角度变化的切换测量，并将其与直线结构进行比较。在存在 $|B_{ip}| = 25$ mT、方向在 xy 平面内从 $-180 \le \Phi \le 180°$ 变化的情况下，我们记录了平均翻转回线。我们观察到 I_{SW} 具有余弦角度依赖关系，其中 Φ，这是由于 B_{ip} 与反阻尼自旋轨道力矩场（B_{AD}）之间的角度变化所致[8,34]。P-AP 和 AP-P 转变中 I_{SW} 变化趋势相反，这与类场力矩场（B_{FL}）和 B_{ip} 之间的相互作用有关，二者会相互叠加或抵消[35]。B_{eff} 的方向可通过 B_{ip} 的角度变化确定，因为 B_{ip}、B_{AD} 和 B_{FL} 之间的相互作用决定了最低切换电流和随机（随机性）切换的区域[36]。在直线结构中（图 2a），随机切换区域出现在 ~ ±90°，而对于顺时针翻转回线，最小切换电流出现在 180°（对于逆时针切换回线则为 0°）。B_{eff} 由存在 B_{ip} 时自旋轨道力矩诱导切换中的 B_{FL}[34] 或 B_{AD}[35] 之和决定，并沿电流方向（顺时针翻转回线为 180°）。

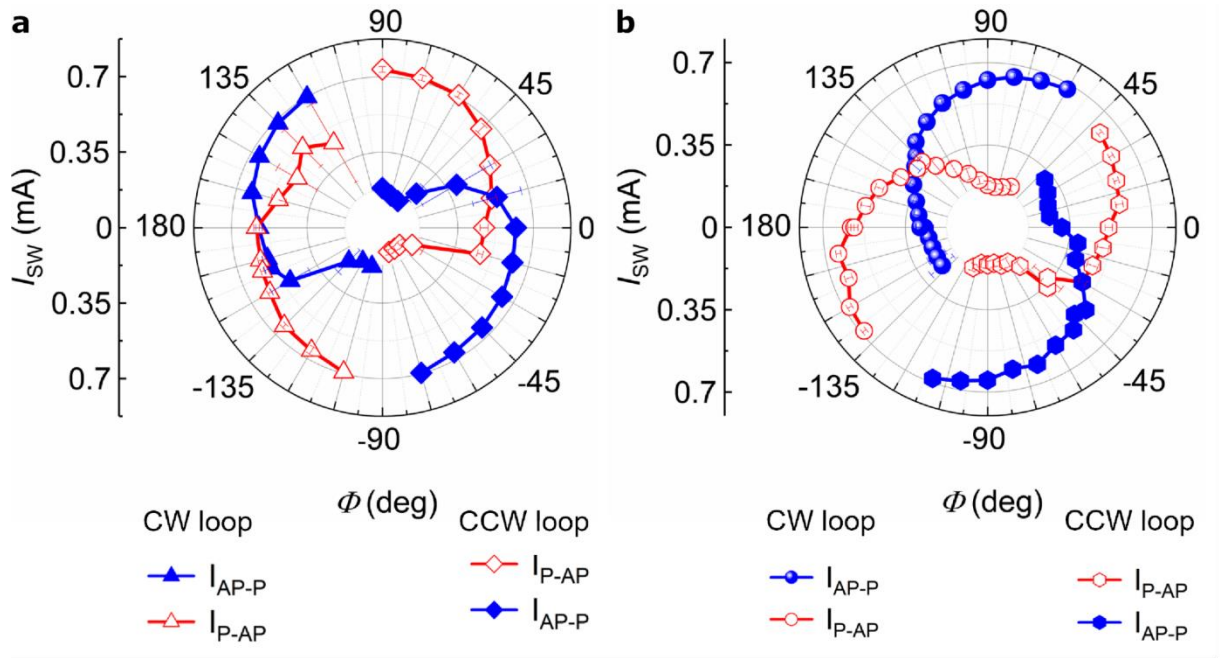


图 *2. xy* 平面内 B 的临界切换电流随角度变化的关系$_{ip}$，其中$|B_{ip}| = 25mT$。*(a)*直线结构的极坐标图显示，在 $\Phi = 180°$（或 $-15°$）时，两种转变的顺时针（逆时针）翻转回线对应的切换电流最小；在 $-90°$（或 $110°$）时不会发生切换。*(b)*弯曲结构的极坐标图显示，在角度 $-120°$、$\leq \Phi \leq 40°$（$\Phi \geq 60°$、$\Phi \leq -150°$）时出现逆时针（顺时针）翻转回线。切换电流最小和随机切换分别出现在 $\Phi = 135°$（$-30°$）和 $45°$（$-130°$）。

对于弯曲结构（图2b），显示顺时针（CW）翻转回线的区域对应的角度范围为 $-140°$ 至 $50°$。对于顺时针（CW）和逆时针（CCW）翻转回线，两种状态转换所需的最小切换电流分别出现在 $135°$ 和 $-30°$。根据弯曲结构的相同类比，我们可以得出结论，对无场切换（FFS）有贡献的 $\boldsymbol{B}_{\mathbf{eff}}$ 方向为 $135°$。我们利用这一认识测量了图1e、f中的平均 R_{MTJ}-I_{SOT} 切换回线。

为深入了解其背后的翻转机制，我们对弯曲结构和直线结构进行了微磁学模拟。在微磁学框架中，我们考虑了交换相互作用、各向异性、阻尼参数、产生的SOT（包括

反阻尼型SOT和类场SOT）、奥斯特场、磁静相互作用以及DMI。我们首先进行有限元模拟，计算弯曲的自旋轨道力矩通道所诱导的$\boldsymbol{J}_{\mathrm{C}}$ 空间分布，由此产生$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$梯度、 非均匀$\boldsymbol{\sigma}$（图1d）以及奥斯特场。在模拟中，我们通过将FL初始化为沿+z（或–z方向）来记录磁化强度轨迹，并使其弛豫0.1 ns。随后施加I_{SOT} 切换脉冲，持续1 ns（图3 a、b中的黄色区域所示），然后关闭电流脉冲，使系统再弛豫6 ns。对于直线结构（图3a）和弯曲结构（图3b），在$I_{\mathrm{SOT}} > 0$ 条件下均发生确定性翻转，表现为反平行态至平行态转变（插图显示了$I_{\mathrm{SOT}} < 0$下的平行态至反平行态转变）；在存在$\boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}} = -20$ mT磁场和无磁场的情况下，结果分别如此。无场切换可靠，并呈现固定的切换极性，这证实了实验中观察到的顺时针回线。值得注意的是，当强制FL呈现相反的切换极性（为$I_{\mathrm{SOT}} > 0$ （$I_{\mathrm{SOT}} < 0$）设定初始平行态（反平行态））时，不会发生翻转。

图 3c 展示了直线结构在不同时刻的磁构型快照，显示磁化反转始于边缘处的手性畴成核，随后畴壁穿过自由层传播；这是直径为 ≥ 50 nm、具有垂直磁各向异性（PMA）的自旋轨道力矩-磁性隧道结的典型行为[7,37]。两种切换过程的成核点不同，因为成核主要由 DMI[35]和自旋轨道力矩场驱动，并呈现四重对称性，具体取决于面内磁场与电流极性的相互作用。有趣的是，在弯曲结构中（图 3d），无论初始磁化方向或自旋轨道力矩通道中的电流方向如何，成核都发生在更靠近内侧拐角的位置。考虑到空间电流分布，对于两种极性，较高的自旋流密度都会使自由层的内侧拐角成为优先成核位置，随后畴壁传播，直至电流脉冲关闭。畴壁传播归因于由自旋极化方向持续变化引起的非均匀自旋轨道力矩[31] 。一旦脉冲

关闭，在交换相互作用、各向异性和 DMI 的作用下，磁化强度弛豫至由初始成核畴取向决定的均匀基态。我们进一步研究了自旋电流梯度、非均匀自旋极化和 DMI 对弯曲结构切换的作用（补充信息 IV.i）。值得注意的是，对于两种电流极性，自旋电流梯度都有助于将成核点固定在自旋轨道力矩通道的内侧拐角处。畴壁动力学由自旋极化方向以及 DMI 的强度和方向决定。由于自旋极化随空间位置变化，畴壁磁化强度受到非均匀自旋轨道力矩作用；其磁化取向取决于电流方向和自由层的初始磁化方向，因此能够区分两种切换过程。DMI 的强度和手性会影响成核后的动力学；只有正 DMI（促进右手畴壁手性）才能在我们的电流弯曲结构设计 中实现切换。切换极性由 DMI 手性以及空间变化的自旋极化对畴壁磁化强度产生的自旋轨道力矩共同决定。对于不同的脉冲参数、磁性隧道结尺寸以及磁性隧道结在自旋轨道力矩通道上的位置，也能观察到由自旋电流梯度决定的固定成核点以及随后的完全切换，表明器件可可靠运行（详情见补充信息 IV.ii）。我们还模拟了升高温度下的反转动力学，发现与 0 K 模拟相比，成核位置和切换轨迹均未受到影响，表明该切换过程能够抵御随机热涨落，具有良好的可靠性。这证实了我们的假设：无场切换过程的确定性源于 DMI 辅助下的空间变化自旋轨道力矩。

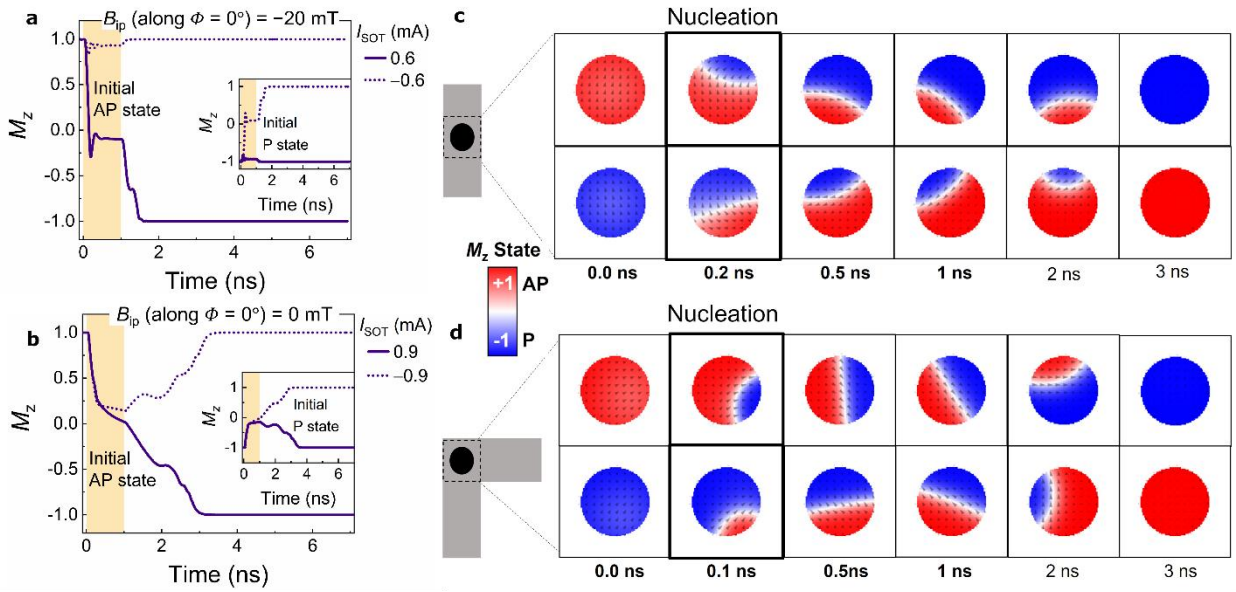


图 *3.* 磁化翻转的微磁模拟。（*a* 和 *b*）归一化M_Z 轨迹显示，在正向电流下从 AP 态发生翻转（负向电流下不发生翻转）；插图显示，在负向电流下从 P 态发生翻转（正向电流下不发生翻转）。图中分别为：*(a)*存在$B_{ip} = -20$ mT 时的直线结构；*(b)* 不存在B_{ip}时的弯曲结构。（*c* 和 *d*）翻转过程中不同时间点两种转变的磁化强度定格图，显示（*c*）在存在$B_{ip} = -20$ mT 时，直线结构的成核点随电流方向而变化；（*d*）两种转变均表现为无场切换，成核点固定在由自旋电流梯度决定的内侧拐角处。

此外，我们通过在存在或不存在这些参数的情况下进行模拟，研究了非均匀 $\boldsymbol{B}_{FL}$ 以及由自旋轨道力矩通道的曲率产生的奥斯特场的作用。磁化强度轨迹几乎没有变化（补充信息 IV.iii）。阻尼参数的幅值有所变化；模拟中记录的切换轨迹没有显著变化。同时，自旋轨道力矩通道中的非均匀焦耳热导致磁性参数发生空间变化，这有中等程度的影响；我们观察到，它只会降低临界切换电流，不会影响弯曲结构的切换动力学。弯曲结构中的磁化强度反转主要受自旋轨道力矩下方的非均匀电流分布和 DMI 的手性影响；

其他因素，例如奥斯特场、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{FL}}$、阻尼参数以及自旋轨道力矩通道中的非均匀焦耳热，不会对时间反演对称性破缺起作用，只会提高（降低）切换可靠性。

值得注意的是，我们在图4a中实验比较了$\boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}} = 0$ mT下弯曲结构的脉冲切换与不同面内磁场下直线结构的切换（实验装置的更多详情见补充信息III）。脉冲切换结果证实，所提出的无场切换机制似乎不受切换速度限制，因为在$J_{\mathrm{SW}} = 1.5 \times 10^{8}$ A cm^{-2}条件下，我们可以在5 ns内实现确定性切换。遗憾的是，当脉冲宽度（τ_p）短于5 ns时，弯曲结构较大的自旋轨道力矩通道电阻以及实验装置的电压输送能力限制了切换。在更长的τ_p（> 50 ns）下，弯曲结构（$\boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}} = 0$ mT）的I_{SW}与直线结构（沿x-方向$\boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}} = -12.8$ mT）相近，因为热涨落有助于降低弯曲结构所需的$\boldsymbol{B}_{\mathrm{eff}}$（$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$）。两种结构的切换电流差异在较短脉冲下会增大，因为弯曲结构中的$\boldsymbol{B}_{\mathrm{eff}}$取决于电流幅值；相比之下，直线结构中的$\boldsymbol{B}_{\mathrm{eff}}$为静态（$\boldsymbol{B}_{\mathrm{eff}} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{ip}}$）。我们还注意到，对于磁隧道结直径较大的弯曲结构（80 nm和100 nm），可以在10 ns下实现可靠切换（见补充信息III）。

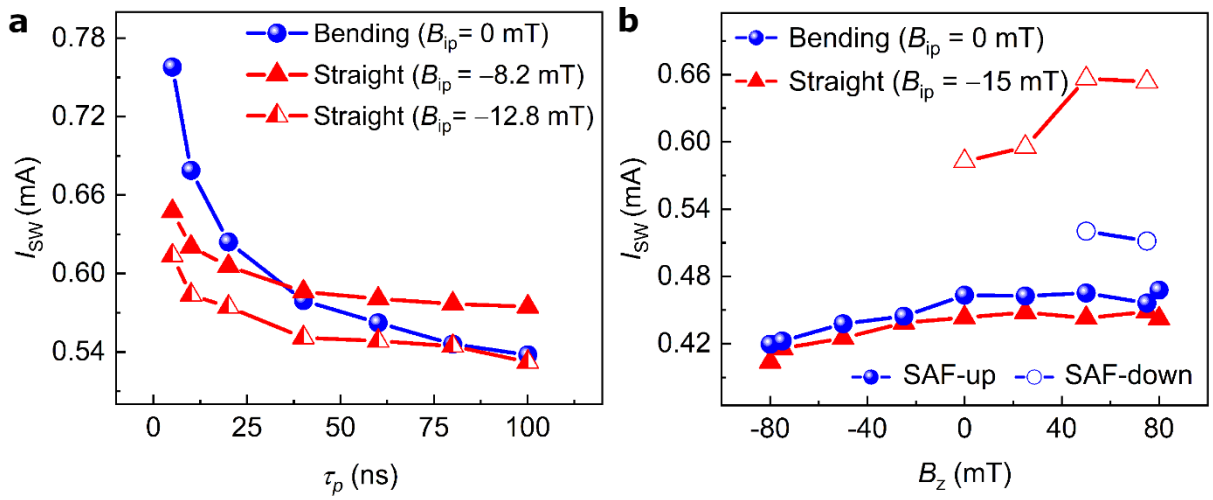


图 *4.* 弯曲结构的开关性能。 *(a)* 弯曲结构（B_{ip} = 0 mT）和直线结构（B_{ip} 沿 Φ = 0°方向为 −8.2 mT 和 −12.8 mT）中 I_{SW} 随脉冲宽度（τ_p）的变化。 *(b)* 硬层取向为 +*z* （SAF 朝上） 和 −*z* （SAF 朝下）时，弯曲结构（B_{ip} = 0 mT）和直线结构（B_{ip} = −15 mT）中 I_{SW}（直流）随 B_z 的变化。

鉴于模拟中观察到的切换动力学以及z向磁场对畴壁位移的重要性[38],，我们测量了切换随硬磁层产生的杂散场方向及面外磁场（$\boldsymbol{B_z}$）变化的情况，如图4b所示。硬磁层磁化方向为+*z*（SAF向上）的弯曲结构器件，在较宽范围的*z*向磁场下均能可靠切换；而SAF向下的结构只有在较大的正z向磁场下才会切换。这表明，硬磁层产生的杂散场会通过在反转过程中协助或对抗畴壁磁化强度上的B_{AD}，影响切换动力学[38]（更多详情见补充信息V）。与直线结构相比，这种效应在弯曲结构中更为显著，因为弯曲结构中的畴壁磁化强度由DMI（内禀属性）决定，而直线结构中的畴壁磁化强度则由$\boldsymbol{B_{ip}}$的幅值和方向控制。

讨论与结论

最后，为了评估弯曲结构对架构设计的影响，我们针对弯曲结构进行了设计-技术协同优化（DTCO）分析，并在5纳米技术节点[39] 将其与其他嵌入式存储器技术（如静态随机存取存储器、自旋转移矩磁性随机存取存储器和自旋轨道力矩磁性随机存取存储器）进行比较（补充信息 VI）。值得注意的是，我们发现，与标准自旋轨道力矩磁性随机存取存储器相比，弯曲自旋轨道力矩通道不会影响单位比特面积，同时还能实现无场切换，且不会增加切换电流。

然而，要使弯曲结构成为一种有前景的无场切换方案，还需从设计和材料特性等方面研究多种因素，以提升其切换性能。首先，需要了解合成反铁磁硬层产生的杂散场对无场切换的影响，并对硬层进行设计，使其有助于畴壁动力学。其次，优化自由层与自旋轨道力矩通道之间的界面性质（如 DMI 和 θ_{SH}），将增大自旋电流梯度并改善畴壁动力学。第三，通过缩短自旋轨道力矩通道来重新设计结构，可以降低电阻、限制器件击穿，并为研究更短的脉冲工作区间提供机会。最后，将磁性隧道结置于更靠近内侧拐角的位置，会使磁性隧道结下方的电流梯度增大。如果磁性隧道结比我们当前设计更靠近自旋轨道力矩通道的内侧拐角 18 nm，预计临界电流将降低 ~25%。针对这一优化后的磁性隧道结位置进行的设计-技术协同优化分析显示，其性能与直线结构相似。

总之，我们提出并验证了一种新的无场切换概念：在 SOT-pMTJ 的自旋轨道力矩通道中引入曲率，且不影响磁性隧道结堆栈的静态特性。由于自由层下方非均匀自旋轨道力矩所产生的时间反演

对称性破缺，实现了低至纳秒脉冲的确定性无场切换。该翻转机制可解释为：由自旋轨道力矩通道的几何形状确定的成核固定点形成，随后在非均匀自旋轨道力矩的作用下发生复杂的畴壁传播。弯曲结构设计为在 SOT-pMTJ 中实现无场切换开辟了一条新途径；该设计可扩展、不受材料限制，并适用于大规模集成。

补充信息：

I. 弯曲结构的磁性 II. 有限元法模拟 III. 弯曲结构中的自旋轨道力矩诱导翻转 i. 直流自旋轨道力矩翻转的实验装置 ii. 脉冲自旋轨道力矩翻转的实验装置 iii. 无场切换 IV. 微磁模拟： i. 弯曲结构的翻转机制 ii. 弯曲结构的翻转鲁棒性 iii. 模拟参数的变化。 V. 合成反铁磁硬层的影响 VI. 弯曲结构设计分析

方法

样品制备

这些器件在 IMEC 的 300毫米磁阻式随机存取存储器中试线上制造。自旋轨道力矩磁隧道结堆栈沉积在由嵌入 SiO_2 中的 W-VIA底电极构成的预处理晶圆上。自旋轨道力矩磁隧道结采用 300 毫米集群式 EC7800 Canon-Anelva 设备，通过物理气相沉积在室温下原位沉积，随后在 1 T 垂直磁场中于 300 °C 退火 30 分钟。顶部钉扎磁隧道结的材料组成

W/CoFeB的叠层为W(3.5)/$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$(0.9)/MgO (~1)/$Co_{17.5}Fe_{52.5}B_{30}$ (1.1)/W(0.3)/Co(1.2)/Ru(.85)/Co(0.6)/Pt(0.8)[Co(0.3)/Pt(0.8)]$_6$Ru(5)（单位为nm）。随后，采用193纳米浸没式光刻对磁性隧道结柱体进行图形化，接着以垂直入射方式进行离子束刻蚀，并优化刻蚀停止条件。自旋轨道力矩通道保持完整，未在势垒层两侧产生侧壁短路。采用双大马士革工艺制作铜电极，以实现顶部和底部的电连接。

作者信息

通讯作者：

Vaishnavi Kateel—IMEC，比利时鲁汶 3001；鲁汶大学，比利时鲁汶 3001；电子邮箱：vaishnavi.kateel@imec.be

Siddharth Rao—IMEC，鲁汶 3001；电子邮箱：siddharth.rao@imec.be

Kevin Garello—IMEC，鲁汶 3001；格勒诺布尔-阿尔卑斯大学、法国原子能和替代能源委员会、法国国家科学研究中心、格勒诺布尔国立综合理工学院、SPINTEC，法国格勒诺布尔 38000；电子邮箱：kevin.garello@cea.fr

致谢

本研究得到 imec 的 MRAM器件工业合作计划、ECSEL联合事业计划（项目编号 876925——ANDANTE 项目）以及瑞士国家科学基金会（资助编号 200020_200465）的支持。

贡献

K.G. 负责规划并监督该项目。Va.Ka. 对由 K.G. 设计的器件进行了测量。F.Y. 负责器件集成工艺。Va.Ka.、S.R.、K.C. 和 K.G. 分析了实验数据。微磁学模拟由

Vi.Kr. 和 M.G.M.；M.G. 完成了设计—技术协同优化分析。Va.Ka.、S.R. 和 K.G. 撰写了稿件。所有作者均讨论了数据，并对稿件提出了意见。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性

本文图表及本研究其他发现所依据的数据，可在合理请求后向通讯作者获取。

参考文献

(1) Molas, G.; Nowak, E. 新兴存储器技术的进展：从数据存储到人工智能。应用科学 **2021年**, *11* (23), 11254. https://doi.org/10.3390/app112311254. (2) Manchon, A.; Železný, J.; Miron, I. M.; Jungwirth, T.; Sinova, J.; Thiaville, A.; Garello, K.; Gambardella, P. 铁磁系统和反铁磁系统中的电流诱导自旋轨道力矩。《现代物理评论》 **2019年**，*91* (3), 035004. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.035004. (3) Liu, L.; Lee, O. J.; Gudmundsen, T. J.; Ralph, D. C.; Buhrman, R. A. 利用自旋霍尔效应产生的自旋力矩翻转垂直磁化的磁性层。《物理评论快报》 **2012年**，*109* (9), 096602. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.096602. (4) Cubukcu, M.; Boulle, O.; Drouard, M.; Garello, K.; Onur Avci, C.; Mihai Miron, I.; Langer, J.; Ocker, B.; Gambardella, P.; Gaudin, G. 自旋轨道力矩翻转三端垂直磁性隧道结的磁化。《应用物理快报》 **2014年**，*104* (4), 042406. https://doi.org/10.1063/1.4863407. (5) Garello, K.; Avci, C. O.; Miron, I. M.; Baumgartner, M.; Ghosh, A.; Auffret, S.; Boulle, O.; Gaudin, G.; Gambardella, P. 自旋轨道力矩驱动的超快磁化翻转。《应用物理快报》 **2014年**, *105* (21), 212402. https://doi.org/10.1063/1.4902443. (6) Garello, K.; Yasin, F.; Couet, S.; Souriau, L.; Swerts, J.; Rao, S.; Van Beek, S.; Kim, W.; Liu, E.; Kundu, S.; Tsvetanova, D.; Croes, K.; Jossart, N.; Grimaldi, E.; Baumgartner, M.; Crotti, D.; Fumemont, A.; Gambardella, P.; Kar, G. S. 用于低功耗和超快嵌入式存储器的自旋轨道力矩磁性随机存取存储器300毫米集成。载于*2018*年*IEEE* 超大规模集成电路研讨会；IEEE：檀香山，夏威夷，2018年；第81–82页。https://doi.org/10.1109/VLSIC.2018.8502269。

(7) Krizakova, V.; Perumkunnil, M.; Couet, S.; Gambardella, P.; Garello, K. 面向存储器应用的磁性隧道结自旋轨道力矩翻转。《磁学与磁性材料》 **2022年**，*562*，169692. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169692. (8) Miron, I. M.; Garello, K.; Gaudin, G.; Zermatten, P.-J.; Costache, M. V.; Auffret, S.; Bandiera, S.; Rodmacq, B.; Schuhl, A.; Gambardella, P. 面内电流注入诱导的单铁磁层垂直翻转。《自然》 **2011年**，*476* (7359), 189–193. https://doi.org/10.1038/nature10309. (9) Shao, Q.; Li, P.; Liu, L.; Yang, H.; Fukami, S.; Razavi, A.; Wu, H.; Wang, K.; Freimuth, F.; Mokrousov, Y.; Stiles, M. D.; Emori, S.; Hoffmann, A.; Akerman, J.; Roy, K.; Wang, J.-P.; Yang, S.-H.; Garello, K.; Zhang, W. 自旋轨道力矩路线图。《*IEEE*磁学汇刊》 **2021年**，*57* (7), 1–39. https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3078583. (10) Oh, Y.-W.; Chris Baek, S.; Kim, Y. M.; Lee, H. Y.; Lee, K.-D.; Yang, C.-G.; Park, E.-S.; Lee, K.-S.; Kim, K.-W.; Go, G.; Jeong, J.-R.; Min, B.-C.; Lee, H.-W.; Lee, K.-J.; Park, B.- G. 反铁磁体/铁磁体/氧化物结构中通过自旋轨道力矩实现垂直磁化无场翻转。*Nature Nanotechnology* **2016年**，*11* (10), 878–884. https://doi.org/10.1038/nnano.2016.109. (11) Garello, K.; Yasin, F.; Hody, H.; Couet, S.; Souriau, L.; Sharifi, S. H.; Swerts, J.; Carpenter, R.; Rao, S.; Kim, W.; Wu, J.; Sethu, K. K. V.; Pak, M.; Jossart, N.; Crotti, D.; Furnemont, A.; Kar, G. S. 用于自旋轨道力矩磁性随机存取存储器无场翻转的可制造300毫米平台解决方案。载于*2019*年超大规模集成电路技术研讨会；IEEE：日本京都，2019年；第T194–T195页。https://doi.org/10.23919/VLSIT.2019.8776537. (12) Lau, Y.-C.; Betto, D.; Rode, K.; Coey, J. M. D.; Stamenov, P. 利用层间交换耦合实现无外场的自旋轨道力矩翻转。*Nature Nanotechnology* **2016年**，*11* (9), 758–762. https://doi.org/10.1038/nnano.2016.84. (13) Krizakova, V.; Garello, K.; Grimaldi, E.; Kar, G. S.; Gambardella, P. 亚纳秒时间尺度下自旋轨道力矩驱动的磁性隧道结无场翻转。《应用物理快报》 **2020**，*116* (23), 232406. https://doi.org/10.1063/5.0011433. (14) Liu, L.; Zhou, C.; Shu, X.; Li, C.; Zhao, T.; Lin, W.; Deng, J.; Xie, Q.; Chen, S.; Zhou, J.; Guo, R.; Wang, H.; Yu, J.; Shi, S.; Yang, P.; Pennycook, S.; Manchon, A.; Chen, J. 依赖对称性的垂直磁化无场翻转。*Nature Nanotechnology* **2021年**，*16* (3), 277–282. https://doi.org/10.1038/s41565-020-00826-8. (15) Lee, S.; Ryu, J.; Park, B.-G. 通过对称性实现磁化翻转。*Nature Nanotechnology* **2021年**，*16* (3), 227–228. https://doi.org/10.1038/s41565-021-00850-2. (16) Xie, X.; Zhao, X.; Dong, Y.; Qu, X.; Zheng, K.; Han, X.; Han, X.; Fan, Y.; Bai, L.; Chen, Y.; Dai, Y.; Tian, Y.; Yan, S. 对称性破缺铁磁薄膜中通过体自旋轨道力矩实现可控的垂直磁化无场翻转。《自然·通讯》 **2021年**，*12* (1), 2473. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22819-4. (17) MacNeill, D.; Stiehl, G. M.; Guimaraes, M. H. D.; Buhrman, R. A.; Park, J.; Ralph, D. C. 通过WTe_2/铁磁体双层中的晶体对称性调控自旋轨道力矩。《自然·物理》 **2017年**，*13* (3), 300–305. https://doi.org/10.1038/nphys3933. (18) Kao, I.-H.; Muzzio, R.; Zhang, H.; Zhu, M.; Gobbo, J.; Yuan, S.; Weber, D.; Rao, R.; Li, J.; Edgar, J. H.; Goldberger, J. E.; Yan, J.; Mandrus, D. G.; Hwang, J.; Cheng, R.; Katoch, J.; Singh, S. 利用WTe_2中的非常规自旋轨道力矩确定性翻转垂直极化磁体。《自然·材料》 **2022年**，*21* (9), 1029–1034. https://doi.org/10.1038/s41563-022-01275-5。

(19) Kang, M.-G.; Choi, J.-G.; Jeong, J.; Park, J. Y.; Park, H.-J.; Kim, T.; Lee, T.; Kim, K.-J.; Kim, K.-W.; Oh, J. H.; Viet, D. D.; Jeong, J.-R.; Yuk, J. M.; Park, J.; Lee, K.-J.; Park, B.- G. Pt/Co/AlOx 结构中通过横向调制 Rashba 效应实现的无场自旋轨道力矩切换的电场控制。《自然·通讯》 **2021年**, *12* (1), 7111. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27459-2. (20) Cai, K.; Yang, M.; Ju, H.; Wang, S.; Ji, Y.; Li, B.; Edmonds, K. W.; Sheng, Y.; Zhang, B.; Zhang, N.; Liu, S.; Zheng, H.; Wang, K. 混合铁磁/铁电结构中确定性电流诱导磁化翻转的电场控制。*Nature Materials* **2017年**, *16* (7), 712–716. https://doi.org/10.1038/nmat4886. (21) Ma, Q.; Li, Y.; Gopman, D. B.; Kabanov, Yu. P.; Shull, R. D.; Chien, C. L. 通过竞争自旋流切换垂直铁磁层。*Phys. Rev. Lett.* **2018**, *120* 11 117703 101103 120117703 ( ), . https://doi.org/ . / PhysRevLett. . . (22) Lee, J. M.; Cai, K.; Yang, G.; Liu, Y.; Ramaswamy, R.; He, P.; Yang, H. 通过几何畴壁钉扎实现无场自旋轨道转矩切换。*Nano Lett.* **2018**, *18* (8), 4669–4674. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b00773. (23) Wang, M.; Cai, W.; Zhu, D.; Wang, Z.; Kan, J.; Zhao, Z.; Cao, K.; Wang, Z.; Zhang, Y.; Zhang, T.; Park, C.; Wang, J.-P.; Fert, A.; Zhao, W. 通过自旋轨道力矩与自旋转移力矩的相互作用实现垂直磁性隧道结的无场切换。*Nat Electron* **2018年**, *1* (11), 582–588. https://doi.org/10.1038/s41928-018- 0160-7. (24) Zheng, Z.; Zhang, Y.; Lopez-Dominguez, V.; Sánchez-Tejerina, L.; Shi, J.; Feng, X.; Chen, L.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Zhang, K.; Hong, B.; Xu, Y.; Zhang, Y.; Carpentieri, M.; Fert, A.; Finocchio, G.; Zhao, W.; Khalili Amiri, P. 在具有垂直成分梯度的亚铁磁层中，通过自旋轨道力矩诱导的垂直磁化翻转实现无场切换。《自然·通讯》 **2021年**, *12* (1), 4555. https://doi.org/10.1038/s41467- 021-24854-7. (25) Baek, S. C.; Amin, V. P.; Oh, Y.-W.; Go, G.; Lee, S.-J.; Lee, G.-H.; Kim, K.-J.; Stiles, M. D.; Park, B.-G.; Lee, K.-J. 铁磁三层结构中的自旋流与自旋轨道转矩。*Nature Materials* **2018年**, *17* (6), 509–513. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0041-5. (26) Luo, Z.; Dao, T. P.; Hrabec, A.; Vijayakumar, J.; Kleibert, A.; Baumgartner, M.; Kirk, E.; Cui, J.; Savchenko, T.; Krishnaswamy, G.; Heyderman, L. J.; Gambardella, P. 手性耦合纳米磁体。*Science* **2019**, *363* (6434), 1435–1439. https://doi.org/10.1126/science.aau7913. (27) Yu, G.; Upadhyaya, P.; Fan, Y.; Alzate, J. G.; Jiang, W.; Wong, K. L.; Takei, S.; Bender, S. A.; Chang, L.-T.; Jiang, Y.; Lang, M.; Tang, J.; Wang, Y.; Tserkovnyak, Y.; Amiri, P. K.; Wang, K. L. 在无外部磁场条件下通过自旋轨道转矩实现垂直磁化翻转。*Nature Nanotechnology* **2014**, *9* (7), 548–554. https://doi.org/10.1038/nnano.2014.94. (28) Yu, G.; Chang, L.-T.; Akyol, M.; Upadhyaya, P.; He, C.; Li, X.; Wong, K. L.; Amiri, P. K.; Wang, K. L. Ta/CoFeB/[TaO_x 或 MgO/TaO_x] 薄膜中具有横向结构不对称性的电流驱动垂直磁化翻转。《应用物理快报》 **2014年**, *105* (10), 102411. https://doi.org/10.1063/1.4895735. (29) Chen, S.; Yu, J.; Xie, Q.; Zhang, X.; Lin, W.; Liu, L.; Zhou, J.; Shu, X.; Guo, R.; Zhang, Z.; Chen, J. 通过自旋电流梯度实现垂直磁化薄膜的无外场电切换。*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11* (33), 30446–30452. https://doi.org/10.1021/acsami.9b09146.

(30) You, L.; Lee, O.; Bhowmik, D.; Labanowski, D.; Hong, J.; Bokor, J.; Salahuddin, S. 通过设计倾斜各向异性，在无外部磁场的情况下利用自旋轨道转矩翻转垂直极化纳米磁体。《美国国家科学院院刊》 美国国家科学院院刊 **2015年**, *112* (33), 10310–10315. https://doi.org/10.1073/pnas.1507474112. (31) Safeer, C. K.; Jué, E.; Lopez, A.; Buda-Prejbeanu, L.; Auffret, S.; Pizzini, S.; Boulle, O.; Miron, I. M.; Gaudin, G. 由几何形状控制的自旋轨道转矩磁化翻转。《Nature Nanotechnology》 *Nature Nanotechnology* **2016年**, *11* (2), 143–146. https://doi.org/10.1038/nnano.2015.252. (32) Vudya Sethu, K. K.; Ghosh, S.; Couet, S.; Swerts, J.; Sorée, B.; De Boeck, J.; Kar, G. S.; Garello, K. 优化用于自旋轨道转矩磁随机存取存储器的钨 β 相窗口。《Physical Review Applied》 *Physical Review Applied* **2021年**, *16* (6), 064009. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.064009. (33) Garello, K.; Miron, I. M.; Avci, C. O.; Freimuth, F.; Mokrousov, Y.; Blügel, S.; Auffret, S.; Boulle, O.; Gaudin, G.; Gambardella, P. 铁磁异质结构中自旋轨道转矩的对称性和幅值。《Nature Nanotechnology》 *Nature Nanotechnology* **2013年**, *8* (8), 587–593. https://doi.org/10.1038/nnano.2013.145. (34) Garello, K.; Miron, I. M.; Avci, C. O.; Freimuth, F.; Mokrousov, Y.; Blügel, S.; Auffret, S.; Boulle, O.; Gaudin, G.; Gambardella, P. 铁磁异质结构中自旋轨道转矩的对称性和幅值。《Nature Nanotechnology》 *Nature Nanotechnology* **2013年**, *8* (8), 587–593. https://doi.org/10.1038/nnano.2013.145. (35) Baumgartner, M.; Garello, K.; Mendil, J.; Avci, C. O.; Grimaldi, E.; Murer, C.; Feng, J.; Gabureac, M.; Stamm, C.; Acremann, Y.; Finizio, S.; Wintz, S.; Raabe, J.; Gambardella, P. 自旋轨道转矩驱动的空间和时间分辨磁化动力学。《Nature Nanotechnology》 *Nature Nanotechnology* **2017年**, *12* (10), 980–986. https://doi.org/10.1038/nnano.2017.151. (36) Krizakova, V.; Hoffmann, M.; Kateel, V.; Rao, S.; Couet, S.; Kar, G. S.; Garello, K.; Gambardella. 通过场型自旋轨道转矩调控磁性隧道结的翻转效率。**2022年**. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2206.14587. (37) Grimaldi, E.; Krizakova, V.; Sala, G.; Yasin, F.; Couet, S.; Sankar Kar, G.; Garello, K.; Gambardella. 三端磁性隧道结中自旋轨道转矩和自旋转移转矩翻转的单次动态。《Nature Nanotechnology》 *Nature Nanotechnology* **2020年**, *15* (2), 111–117. https://doi.org/10.1038/s41565-019-0607-7. (38) Emori, S.; Bauer, U.; Ahn, S.-M.; Martinez, E.; Beach, G. S. D. 手性铁磁畴壁的电流驱动动力学。《Nature Materials》 *Nature Materials* **2013年**, *12* (7), 611–616. https://doi.org/10.1038/nmat3675. (39) Wu, Y. C.; Garello, K.; Kim, W.; Gupta, M.; Perumkunnil, M.; Kateel, V.; Couet, S.; Carpenter, R.; Rao, S.; Van Beek, S.; Vudya Sethu, K. K.; Yasin, F.; Crotti, D.; Kar, G. S. 面向高密度和低功耗嵌入式应用的电压栅极辅助自旋轨道转矩磁随机存取存储器。《Physical Review Applied》 *Physical Review Applied* **2021年**, *15* (6), 064015. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.064015.