

基于磁性斯格明子的神经突触器件

磁性斯格明子由于其小尺寸，拓扑稳定和超低功耗驱动特性，被认为有希望应用于下一代信息载体。近年来，研究人员提出了各种各样的基于磁性斯格明子的信息处理及存储器件概念和原型，突显了它们的潜在应用价值[1]，将可能实现传统电子设备无法实现的新功能。在以往研究的基础上，我们提出了一种基于磁性斯格明子的神经元系统人造突触器件[2]。所提出的装置的神经传导率可以通过正向/反向刺激加强/减弱，模拟生物突触的增强/抑制过程，应用微磁学模拟实现了短期可塑性（STP）和长期可塑性（LTP）功能，具有自适应学习能力。

该人工突触器件由重金属层（HM，例如 Pt），铁磁（FM）层（例如 Co）以及位于铁磁层中心位置的能量势垒组成。FM 层具有垂直磁各向异性（PMA），并且在 FM 层和 HM 之间的界面处产生 Dzyaloshinskii-Moriya（DM）相互作用，如图 1 所示。

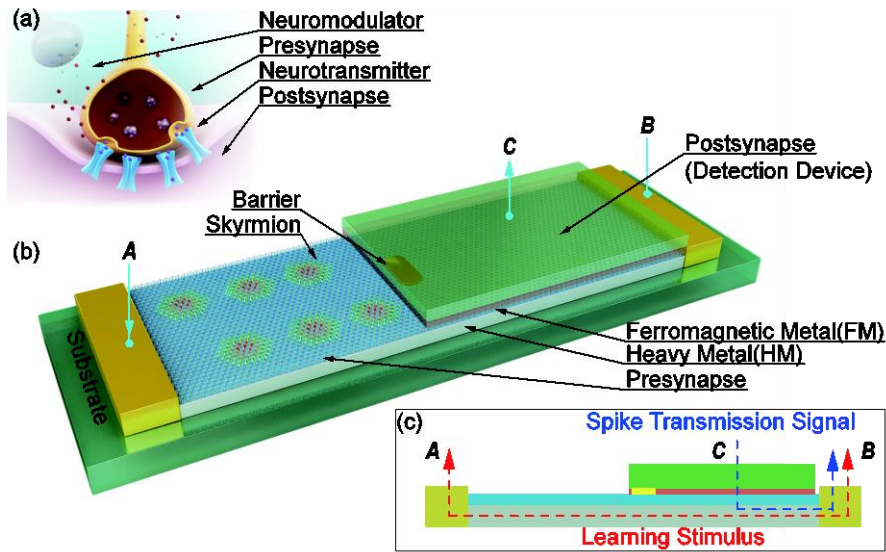


图 1 (a) 生物突触的示意图和 (b) 基于斯格明子的人工突触。为了模拟神经调节器，从终端 A 到终端 B 流动的双向学习电流将驱动跳跃进入(或离开)突触后区域以增加(或减少)该突触的神经传导率，模仿生物突触的增强/抑制过程，如 (c) 所示。

我们利用基于 Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) 方程的微磁学数值模拟方法对该器件进行研究[3]，具体方程如下：

$$\frac{dm}{dt} = -|\gamma| \mathbf{m} \times \mathbf{h}_{eff} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} + \frac{u}{t} \mathbf{m} \times (\mathbf{m}_p \times \mathbf{m})$$

其中， $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$ 是归一化后的磁矩， $M_s = 580 \text{ kA/m}$ 是饱和磁化强度， $\gamma = -2.211 \times 10^5 \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 是旋磁比， $\mathbf{h}_{eff} = \mathbf{H}_{eff}/M_s$ 为归一化后的有效磁场， $\alpha = 0.3$ 是吉尔伯特阻尼系数， t 是铁磁层厚度， $u = \gamma(\hbar j P / 2eM_s)$ 中 j 是自旋电流密度， $P=0.4$

是自旋极化率。

该器件主要分为三种工作模式：初始化，神经传导率增强及抑制模式。在说明所提供的突触装置的操作模式之前，我们定义两个术语：(a) 正激励，其表示从端子 A 流到端子 B 的幅度为 $5\text{MA}/\text{cm}^2$ 的脉冲电流；和 (b) 负激励，其表示从端子 B 流向端子 A 的幅度为 $5\text{MA}/\text{cm}^2$ 的脉冲电流，其脉冲宽度可调节。在初始化 (0 至 35ns) 期间，在器件的突触前区域中利用磁畴壁转化等方法产生磁性斯格明子。由于斯格明子互相之间及其和纳米线边缘之间的排斥，将达到设备的突触前区域中总数的阈值 (在如图所示设计中为 11 个，120 纳米宽的纳米管)。该阈值确定设备的神经传导率变化的分辨率。在增强模式 (35 至 65ns; 参见图 2(b)) 中，我们使用 30ns 的脉冲电流，正刺激驱动斯格明子从突触前区域到突触后区域移动，增加了装置的突触权重。类似地，在抑制模式 (从 87 到 117ns; 参见图 2(c)) 中，负刺激驱动斯格明子从突触后区域到突触前区域转移，从而降低装置的神经传导率。图 2(d) 中的红色曲线显示出装置的后期区域的归一化的磁矩 (m_z ，即 z 方向上的平均磁化分量)。 m_z 的移动对应于 skyrmion 数量和大小

的变化。

应该注意的是，在增强和抑制两种模式中，最后两个斯格明子都不能通过屏障。这可以解释为总驱动力不足的结果，该驱动力由电流的驱动力和悬架的排斥力组成。以增强模式为例，当斯格明子进入突触后区域时，势垒所产生的排斥力将有利于从突触前区域到突触后区域的滑动运动，阻碍从突触前区域到突触后区域的跳跃运动的突触后区域将增加。同时，电流的驱动力 (这里我们认为直流电流，DC) 和屏障的排斥力保持不变。最后，所有这些力量进入平衡状态。装置的突触后区域的神经传导率可以通过测量通过端子 C 处的检测装置的磁阻来确定。图 2(d) 中所示的神经传导率变化揭示出了所提出的刺激诱导的突触可塑性。值得注意的是，斯格明子的尺寸也取决于驱动力和排斥力，如图 2 中的快照所示。一旦激励被关闭，被压缩的斯格明子就会开始扩展到平衡状态，导致突发性地区的 m_z 明显变化。为了说明增强/抑制动力学，不考虑斯格明子体积变化的影响，突触后区域的斯格明子数 (N_{sk}) 的变化也被描绘为图 2(d) 中的蓝线。

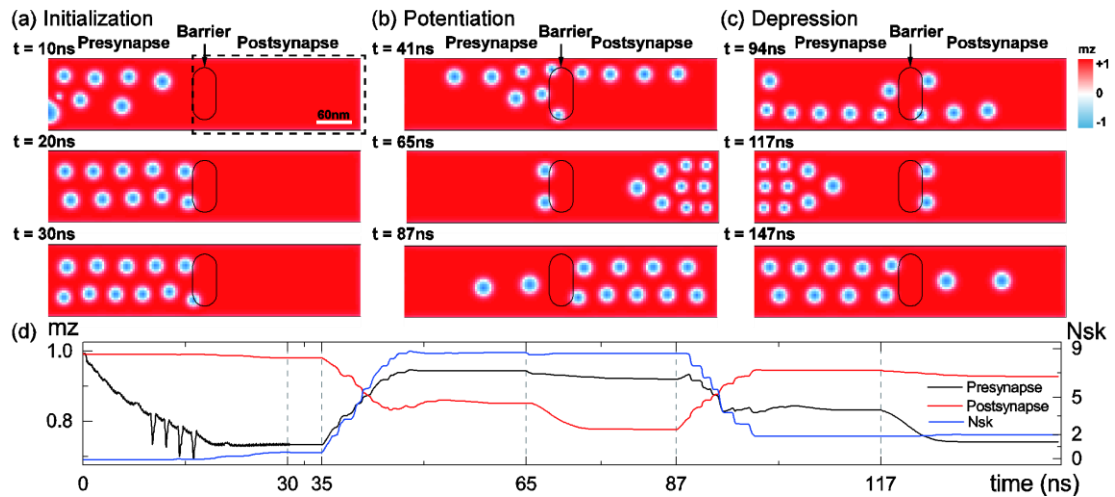


图 2 基于磁性斯格明子的工作模式的微磁学模拟。(a) 初始化 (从 0 到 35ns): 在突触前区域产生斯格明子; (b) 增强模式 (35 至 87ns): 正刺激 (35 至 65ns) 驱动斯格明子从突触前区域到突触后区域迁移, 增加装置的神经传导率; 和 (c) 抑制模式 (87 至 147ns): 负刺激 (从 87 到 117ns) 驱动斯格明子从突触后区域到突触前区域迁移, 从而降低装置的神经传导率。在每个工作模式下, 器件最终恢复到平衡状态。(a), (b) 和 (c) 显示出纳米线中的磁矩分布。(d) 表示突触前区和突触后区的归一化的 m_z (z 方向的平均磁化成分) 随时间变化。(d) 中显示了突触后区中斯格明子数 N_{sk} 的变化。

我们还进一步研究了该器件在刺激特征方面的突触可塑性的动力学。具体来说, 我们考虑了三种激励情况: 情况 1, 以 5ns 间隔的持续时间为 1.5ns 的激励, 如图 3 (b) 所示; 情况 2, 以 2ns 间隔的持续时间为 1ns 的激励, 如图 3 (c) 所示; 和情况 3, 以 5ns 间隔的持续时间为 1ns 的激励, 如图 3 (d) 所示。

每种情况由八个激励脉冲组成。我们计算出器件的突触后区域的磁阻变化, 用与无斯格明子情况的磁阻 (G_0) 的比值表示。如图所示, 情况 1 和 2 显示了 LTP 属性, 而情况 3 则演示了 STP 属性。与第 1 和第 3 例相比, 间隔相同, 需要适当的刺激持续时间才能将 STP 转移到 LTP。情况 2 和 3 表明, 刺激的间隔在装置的可塑性中也起着至关重要的作用。为了消除由于空间尺寸振荡引起的电导变化的影响, 如图 3 (e) 所示, 也计算出了数值 (N_{sk}), 这对应于上述分析。

所提出的突触装置的 STP 和 LTP 可以通过由电流提供的驱动力与滑轨通过屏障时由屏障提供的排斥力之间的竞争来解释。当斯格明子接近屏障时, 屏障的排斥力增加, 如图 3 (a) 的能量分布所示。在接收到输入刺激时, 电流的驱动力沿着力能量曲线 (从点 1 到点 2) 上升到上坡。然而, 如果输入刺激不是足够的持续时间和频率, 则对应于 STP, 斯格明子回到点 1。否则, 如果刺激具有足够的

持续时间和/或频率，则斯格明子将没有足够的时间到达点 1，并且最终将能够通过屏障直到对应于 LTP 的点 3。一旦爬行通过障碍物，就很难回到初始位置。这种行为与生物突触中的可塑性模型一致。

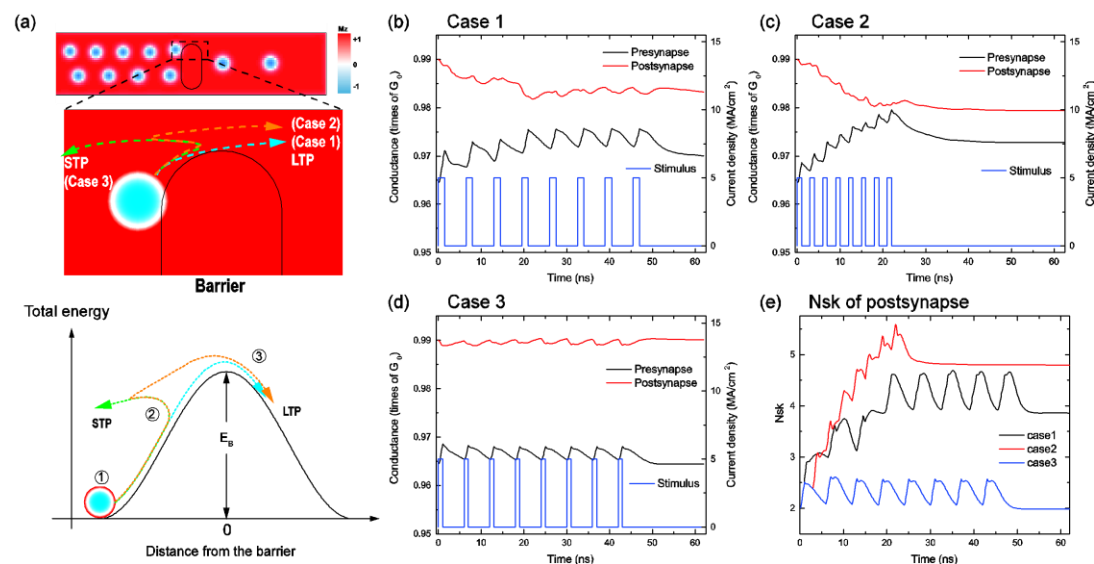


图 3 (a) 斯格明子人工突触器件的 STP 和 LTP 的图示。(b)，(c) 和 (d) 不同刺激脉冲下的突触后电导变化：(b) 情况 1，持续时间为 1.5ns，间隔为 5ns；(c) 情况 2，持续时间为 1ns，间隔 2ns；和 (d) 情况 3，持续时间为 1ns，间隔为 5ns。(e) 三种情况下斯格明子数 Nsk 随时间变化的比较。

赵巍胜，电子信息工程学院，教授，青年千人，E-mail: weisheng.zhao@buaa.edu.cn

参考文献

- [1]Kang, W., Huang, Y., Zhang, X., Zhou, Y. & Zhao, W. Skyrmion-Electronics: An Overview and Outlook. Proc. IEEE 104, 2040–2061 (2016).
- [2]Huang, Y., Kang, W., Zhang, X., Zhou, Y. & Zhao, W. Magnetic skyrmion-based synaptic devices. Nanotechnology 28, 08LT02 (2017).
- [3]Sampaio, J., Cros, V., Rohart, S., Thiaville, A. & Fert, A. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures. Nat. Nanotechnol. 8, 839–44 (2013).