

量子钻石原子力显微镜在斯格明子研究中的应用

你能想象米粒大小的笔记本电脑硬盘吗？

一种磁性领域的神秘准粒子结构——斯格明子（Skyrmion）可以让这个看似不可思议的想法成为现实，而且这颗“米粒”存储空间更大、数据传输速率更快。那么科学家是如何观测这种奇特的粒子结构呢？基于 NV 色心和 AFM 扫描成像技术的量子钻石原子力显微镜将告诉你答案。

什么是斯格明子？

随着大规模集成电路快速发展，芯片制程工艺进入纳米尺度，量子效应逐渐凸显，“摩尔定律”遇到了物理极限。同时，在芯片上如此高密度的集成电子元器件，让热耗散问题成为巨大挑战。人们亟需一种全新的技术突破瓶颈，推动集成电路的持续发展。

自旋电子学器件利用电子的自旋属性可实现更高效的信息存储、传递和处理，是突破上述困境的重要方法。近年来，磁结构中的拓扑属性及其相关应用有望成为下一代自旋电子器件的信息载体，是目前该领域的研究热点之一。

斯格明子（后文均指磁斯格明子）是一种具有准粒子特性并且受拓扑保护的自旋结构，作为一种特殊的磁畴壁，其结构是一种具有涡旋的磁化分布。与磁畴壁类似，斯格明子也存在磁矩的翻转，而与畴壁不同的地方在于，斯格明子是涡旋结构，它的磁矩翻转是由中心向外，常见的有布洛赫型斯格明子和奈尔型斯格明子。

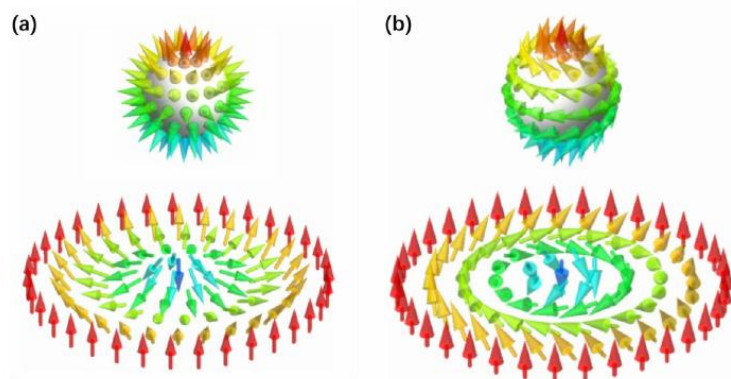


图1 斯格明子结构示意图。(a) 奈尔型斯格明子 (b) 布洛赫型斯格明子

斯格明子是一种天然的信息载体，它具有易操控、易稳定、尺寸小、驱动速度快等优越的性质，所以基于斯格明子的电子学器件有望满足人们对未来器件非易失、高容量、高速度、低功耗等方面的性能要求。

斯格明子有哪些应用？

斯格明子赛道存储

最初赛道存储以纳米线作为存储赛道，磁畴壁充当信息载体，通过电流来驱动磁畴壁的运动。2013年，研究者提出了斯格明子赛道存储器，用斯格明子取代磁畴壁充当信息载体的赛道存储具有更大的发展前景。相较于磁畴壁的驱动电流密度，斯格明子要小5-6个数量级，这可以带来更低的能耗和发热量。通过将斯格明子进行压缩，相邻斯格明子间的距离和斯格明子直径可以处于同一数量级，这可以带来更高的存储密度。

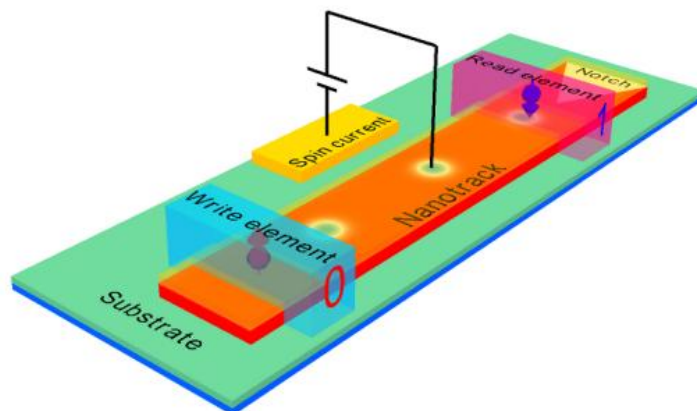


图 2 基于斯格明子的存储器

斯格明子晶体管

斯格明子也可以用于晶体管方向，开拓半导体发展新思路。如图 3 所示，在器件的一端利用 MTJ (磁隧道结) 产生斯格明子，随后使用自旋极化电流来驱动斯格明子向器件另一端运动。为实现晶体管的开关状态切换，在器件的中间安装一个门极。通过向门极施加电压，产生电场，可以改变材料的垂直磁各向异性，从而控制斯格明子的通断。当不施加电压的情况下，斯格明子可以通过门极，来到器件的另一端，这种状态定义为开态；当施加外电场时，斯格明子不通过门极，这种状态定义为关态。

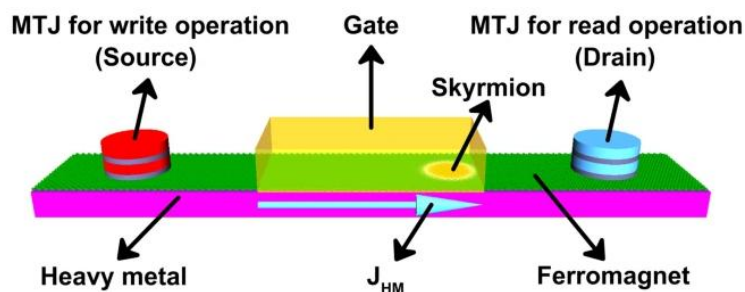


图 3 基于斯格明子的晶体管

斯格明子的非常规计算器件

相比传统的计算单元，神经形态计算单元在神经网络方面，具有低功耗、规模大的运算优势。想要制造神经形态计算单元需满足：纳米级尺寸、非易失性、低功耗等要求。斯格明子为这样的器件带来了新的可能，斯格明子具有可控的机动性，可以很好地模拟生物神经，同时，斯格明子可以更轻易地摆脱杂质的钉扎效应，这使得它具有更好的稳健性。

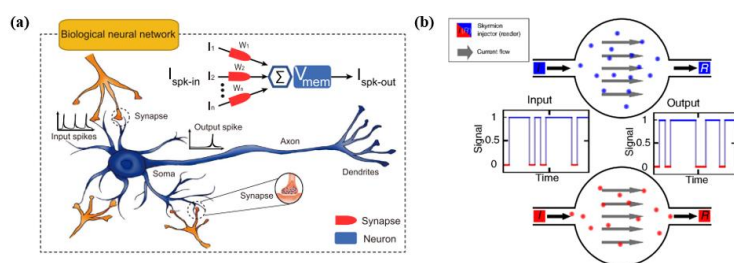


图 4 (a) 基于斯格明子的神经计算器件 (b) 基于斯格明子的随机计算器件

斯格明子也可以用于随机计算器件。主流计算技术编码为常规二进制格式的数值，而随机计算可以连续地处理随机的比特流。常规的半导体电路利用伪随机数字生成器和移位寄存器相结合生成信号，存在硬件成本高、能效低的缺点。研究人员最近在理论和实验上发现了热诱导产生的斯格明子，这为基于斯格明子的随机计算设备提供了基础。

量子钻石原子力显微镜在斯格明子研究中的应用案例

斯格明子的研究离不开合适的观测技术，实空间中观测斯格明子通常使用一下技术手段：洛伦兹透射电子显微镜（LTEM），原理是利用电子束穿透样品，记录电子受到的洛伦兹力；磁力显微镜（MFM），使用磁性针尖，利用原子力显微镜技术记录样品

表面磁场作用力；X射线显微镜，原理是X射线的吸收率能够反映样品的磁场；磁光克尔显微镜（Moke），利用磁光克尔效应测量磁化分布。这些观测手段都存在自己的局限性，例如 LTEM 对样品尺寸要求苛刻，Moke 空间分辨率不高，MFM 针尖的磁性会影响斯格明子的成像。

近年来金刚石中存在一种特殊的缺陷结构—氮空位(Nitrogen-Vacancy, NV)色心吸引了广大研究人员的关注。通过微波与激光对 NV 色心电子自旋所处量子态实行操纵与读出，可以获得对应 NV 轴向上磁场分量的强度。

NV 扫描探针显微镜就是将金刚石中的 NV 色心集成到 AFM 探针尖端，结合 AFM 扫描技术，可以获得样品表面的磁畴结果，**其优点在于拥有极高的灵敏度($1 \text{ uT/Hz}^{1/2}$)、空间分辨率 (10 nm) 和非侵入性**。NV 扫描探针显微镜被用于研究各种感兴趣的磁性结构，例如扫描磁涡旋杂散场，能够确定磁涡旋核心的极性和手性；测量磁畴壁的构型并且观察调控下的磁畴壁动力学。

研究新材料，制备室温下零场稳定存在、体积小且易操控的斯格明子是科研人员的目标。而 NV 扫描探针显微镜很适合在室温下对斯格明子高分辨定量磁成像。

目前，NV 扫描探针显微镜在研究斯格明子的磁化结构和相关的物理过程已颇有建树。

例如：

1) 根据斯格明子的杂散场分布，重构磁化结构。

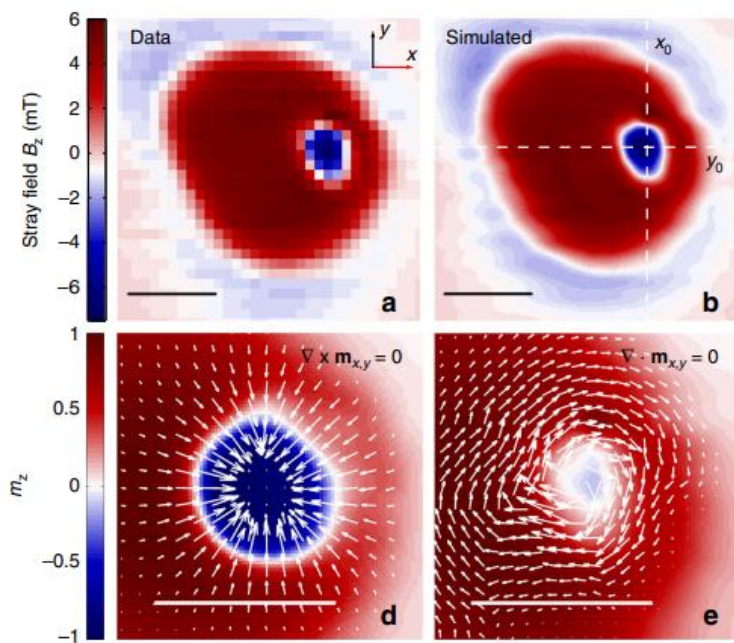


图 5 NV 扫描探针显微镜解析斯格明子磁结构 (Scale bar : 500 nm)

2) 研究斯格明子的结构形态。例如，Jacques 组研究了 Pt/FM/Au/FM/Pt 铁磁多层膜中斯格明子形态。

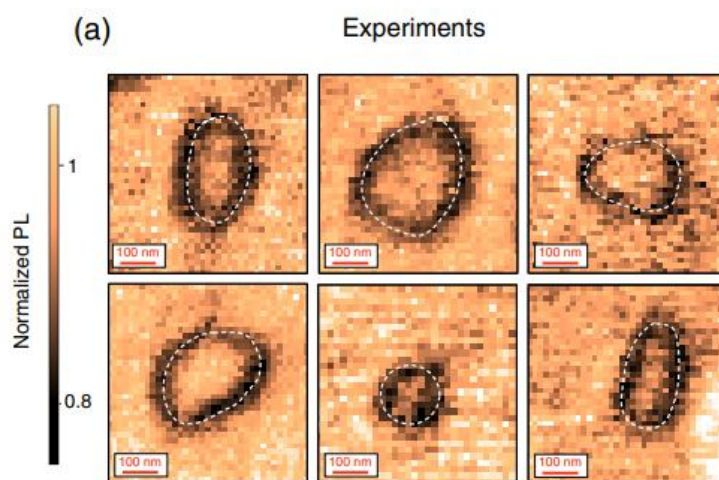


图 6 NV 扫描探针显微镜用于研究斯格明子形态

3) 观察斯格明子的本征动力学演化。例如，Ania 组研究了在外磁场变化下 Ta/CoFeB/MgO 体系中斯格明子的演化。

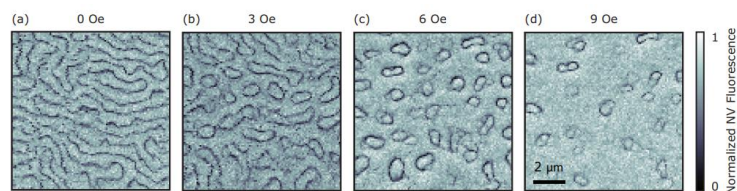


图 7 NV 扫描探针显微镜用于研究外磁场下的斯格明子

4) 研究电流驱动斯格明子的动力学过程。

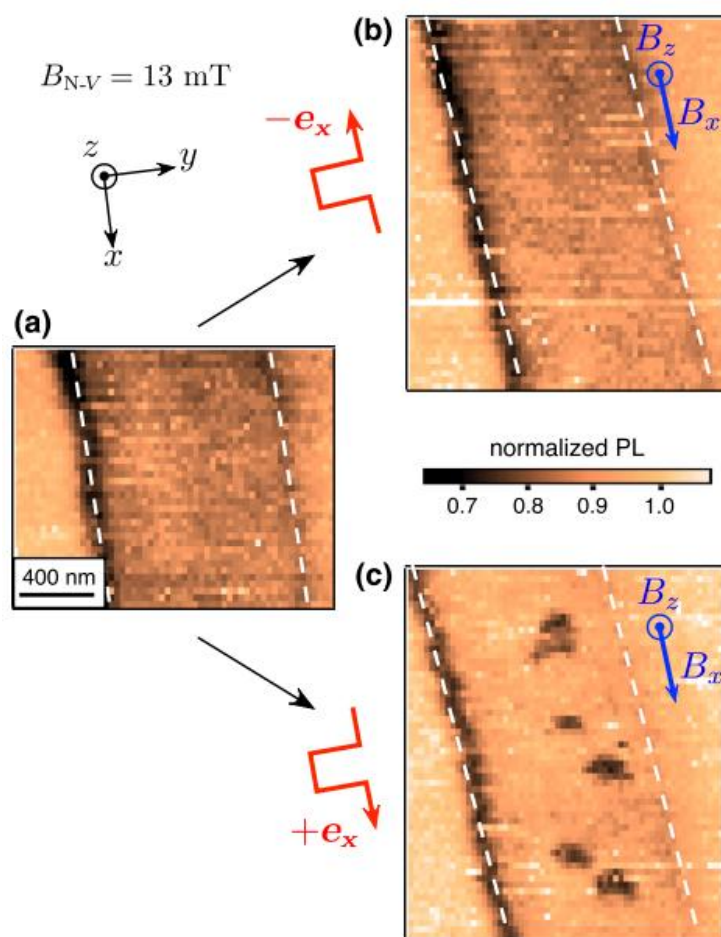


图 8 NV 扫描探针显微镜用于研究电流驱动斯格明子的动力学

目前，国仪量子已推出商用 NV 扫描探针显微镜—量子钻石原子力显微镜（Quantum diamond atomic force microscope, QDAFM），具有非侵入性、可覆盖宽温区、大磁场测量范围等独到优势。可应用于二维材料磁成像、纳米电流成像、超导涡旋磁成像、细胞磁成像，在量子科学、化学与材料科学以及生物和医疗等研究领域有着广泛的应用前景。



国仪量子推出的量子钻石原子力显微镜

参考资料：

[1]<https://kjt.hebei.gov.cn/www/kxpj22/kxbl56/170016/index.html>

[2]K. Everschor Current-Induced Dynamics of Chiral Magnetic Structures: Skyrmions, Emergent Electrodynamics and Spin-Transfer Torques,2012

[3]X.C. Zhang et al. Skyrmion-skyrmion and skyrmion-edge repulsions in skyrmion-based racetrack memory, Scientific Reports,5:7643(2015)

- [4]X.C. Zhang et al. Magnetic skyrmion transistor: skyrmion motion in a voltage-gated nanotrack, Scientific Reports, 5:11369(2015)
- [5]S. Li, et al. Magnetic skyrmion-based artificial neuron device, Nanotechnology,28: 31LT01(2017)
- [6]D. Pinna, et al. Skyrmion Gas Manipulation for Probabilistic Computing Physical Review Applied,9:064018(2018)
- [7]Y. Dovzhenko et al., Magnetostatic twists in room-temperature skyrmions explored by nitrogen-vacancy center spin texture reconstruction, Nature Communications 9:2712(2018)
- [8]Gross I, Akhtar W, Hrabec A, et al. Skyrmion morphology in ultrathin magnetic films,Physical Review Materials, 2:2024406(2018)
- [9]Jenkins A, Pelliccione M, Yu G, et al. Single-spin sensing of domain wall structure and dynamics in a thin film skyrmion host. Physical Review Materials, 3: 083801(2017)
- [10]Akhtar W, Hrabec A, Chouaieb S, et al. Current induced nucleation and dynamics of skyrmions in a cobased heusler alloy. Physical Review Applied, 11:034066(2019)