光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024051702

电流驱动 RKKY 耦合作用下 Skyrmion 的动力学特性研究

贾帅璠*，陆文魁，陈　琳，陶志阔

（南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子（未来技术）学院，南京 210023）

摘　要： 研究了不同 RKKY 铁磁耦合强度对 Skyrmion 振荡及进动特性的调控。研究结果表明，T 层和 B 层的 Skyrmion 都可以在一定条件下达到稳定振荡，即 Skyrmion 进动呈现圆形轨迹；同一时刻，T 层 Skyrmion 进动位置要超前 B 层，且耦合强度的大小会改变上下两层 Skyrmion 进动半径差值。此外，文章还研究了不同驱动电流对 Skyrmion 动力学特性的影响，研究结果表明驱动电流可以对起始振荡时间、稳定振荡半径等动力学特性进行有效调控。

关键词： Skyrmion；RKKY 耦合作用；电流驱动；自旋转移矩；自旋电子学

中图分类号： O482.5　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0786－06

Dynamic Properties of Current-driven RKKY-coupled Skyrmion

JIA Shuaifan, LU Wenkui, CHEN Lin, TAO Zhikuo

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, CHN)

Abstract: In this study, the dynamic properties of current-driven RKKY-coupled Skyrmion are analyzed. In particular, the manipulation of Skyrmion oscillation and precession by different RKKY ferromagnetic coupling intensities is explored. The results show that the Skyrmion of the Top and Bottom layers can achieve stable oscillation under certain conditions, and the precession of the Skyrmion presents a circular trajectory. Furthermore, the precession position of the Top layer is ahead of that of the Bottom layer, and the coupling strength changes the difference of the Skyrmion precession radius between the upper and lower layers. In addition, the effects of different driving currents on the dynamic characteristics of Skyrmion are analyzed, and the results show that the driving currents can effectively manipulate the dynamic properties such as the initial oscillation time and stable oscillation radius.

Key words: Skyrmion; RKKY coupling; current-driven; spin transfer torque; spintronics

0　引言

Skyrmion 具备稳定的拓扑磁有序结构，并且具有体积小、驱动所需电流小等特性，在磁电子学器件设计领域逐渐受到关注[1-3]，其中，基于 Skyrmion 的自旋转移力矩纳米振荡器（STNO）的研究也不断深入[4-6]。基于 Skyrmion 的 STNO 有望实现纳米级尺寸，并具备工作频率宽、谱线宽输出功率高、功耗低等优点[7-9]。2015 年，Zhang 等提出了一种新型基于 Skyrmion 的 STNO，该器件的工作频率在 0～1 000 MHz 之间。对于单 Skyrmion 基的 STNO 而言，工作频率可以通过电流密度、点接触电极半径和纳米盘半径来调节[10]。对于具有多 Skyrmion 的 STNO，其工作频率范围得到了极大的扩展；最小工

收稿日期：2024－05－17.

* 通信作者：贾帅璠

作频率可接近 0 Hz，最大工作频率为 1.07 GHz，比纳米圆盘为 50 nm 的单 Skyrmion 的工作频率高 4.46 倍。此外，该 STNO 器件可以在 10^8 Am^{-2} 的电流密度量级下工作，并且振荡的开始时间显著缩短。2022 年，Zhu 等对呼吸模式 Skyrmion 基 STNO 中的应变调制磁化进动进行了研究[11]。提出了一种很有前景的数字二进制移频键和移幅键调制技术，该技术可以利用电流脉冲和应变脉冲的共同作用来调谐磁化进动频率和幅值。

相较于 Skyrmion 而言，基于一些更加复杂的 Skyrmion 相关磁有序结构 STNO 也同样值得深入研究。本文提出并构建了电流驱动 RKKY 耦合作用下 Skyrmion 的模型，并利用该模型研究了不同耦合强度及驱动电流对 RKKY 耦合作用下 Skyrmion 动力学特性的影响。

1　理论模型

本实验主要对恒定磁场和直流电场作用下 Skyrmion 的动力学特性的模拟研究，采用的微磁学模拟软件为集成 OOMMF 软件包的 Ubermag[12-13]。磁性材料的动力学过程可以用 LLG 方程来描述[14-16]，可表示为：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t}=-\gamma\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}-\alpha\frac{\gamma}{\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}}\boldsymbol{M}\times(\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 是磁矩矢量，γ 是旋磁比，α 是阻尼因子，有效磁场 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$ 包括静磁场及各向异性场等。

为了研究在外加极化电流作用下的自旋转移力矩效应，在自旋转移力矩效应体系中，LLG 方程添加了一项，形成 LLGS 方程[17-18]，可表示为：

$$\frac{\partial\boldsymbol{M}}{\partial t}=-\frac{\gamma_0}{1+\alpha^2}\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}-\frac{\gamma_0\alpha}{(1+\alpha^2)\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}}\boldsymbol{M}\times(\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}) \tag{2}$$

根据 Slonczewski 理论，自旋极化电流所引起的自旋转移力矩的表达式为[19-21]：

$$\tau_{\mathrm{STT}}=\gamma_0\beta\epsilon(\boldsymbol{m}\times\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}\times\boldsymbol{m})-\gamma_0\beta\epsilon'(\boldsymbol{m}\times\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}) \tag{3}$$

式中，单位磁矢 $\boldsymbol{m}=\dfrac{\boldsymbol{M}}{\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}}$，$\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}$ 为电子自旋极化矢量，β 与驱动电流密度及饱和磁化强度有关。此外 $\epsilon=\dfrac{P\Lambda^2}{(\Lambda^2+1)+(\Lambda^2-1)(\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}})}$，$\Lambda$ 为 Slonczewski 参数。

RKKY 相互作用是一种在磁性材料中发生的间接交换相互作用。在这种相互作用下自旋磁矩通过导电电子间接耦合，具体来说，一个自旋磁矩会通过其周围的传导电子影响到另一个自旋磁矩，从而实现两个自旋磁矩间的相互作用[22-25]。RKKY 耦合强度受多种因素影响，其中材料的晶格结构与电子自旋排列起着关键作用。在某些特殊材料中，外加电压或电流能够调控其电子结构和自旋排列，从而有效改变 RKKY 耦合强度。

如图 1 所示，当自旋磁矩距离变化时，其耦合系数可以是正也可以是负，从而导致耦合为反铁磁 AFM 和铁磁 FM 耦合。本文主要研究了铁磁 FM 耦合条件下的调控特性。

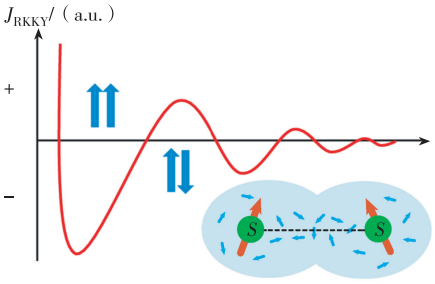
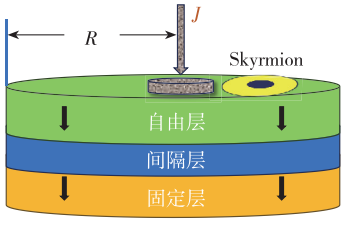


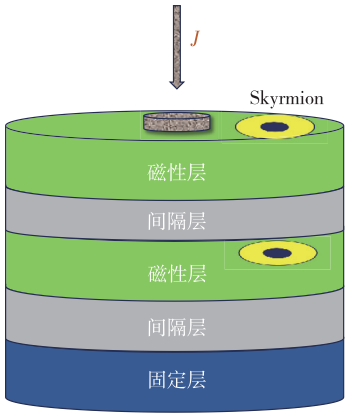
图 1　RKKY 耦合示意图

图 2(a)是 Skyrmion 基 STNO 器件结构示意图。当自旋极化电流沿垂直膜面方向流经 STNO 时，穿过中间非磁性层时保持其自旋极化方向，进而极化的自旋电子流入到自由磁性层与局域磁矩相互作用，自身自旋角动量发生改变，因而自由层局域磁矩因总角动量守恒原则获得相当方向的等量变化，受到自旋力矩作用的自由层磁矩将以某固定频率围绕着中心发生旋进。当 Skyrmion 稳定旋进时，会导致层间磁电阻以同样的频率发生周期性变化，从而产生周期性电压振荡，即产生了频率可调控的微波信号。

将自由层改为磁性层/间隔层/磁性层的三层结构，如图 2(b)所示。定义上下两层磁性层分别为 Top 层和 Bottom 层，并在 Top 层和 Bottom 层中生成 Skyrmion，最上层及最下层中心为电极，通过电流驱动 Skyrmion。



(a) Skyrmion 基 STNO 结构



(b) RKKY 作用下 Skyrmion 基 STNO 仿真结构

图 2 Skyrmion 基 STNO 结构示意图

由于磁性材料中的微观磁矩分布与众多因素有关，当材料的相关参数及外加磁场、外加电流等改变时，众多能量的竞争会使得微观磁矩分布随之改变。本实验中，饱和磁化强度为 5.8×10^5 A/m，交换作用常数 $A=1.5\times10^{-11}$ J/m，阻尼因子为 0.01，自旋极化率取值 30%，静磁场强度 $H=6\times10^5$ A/m，磁晶各向异性常数 $K=0.6\times10^6$ J/m^3，DMI 系数 $D=3\times10^{-3}$ J/m^2。选取仿真网格大小为 1 nm×1 nm×0.6 nm，圆盘半径 $R=50$ nm，电极半径 $r_e=4$ nm，Top 层、Bottom 层和间隔层皆为 0.6 nm[10]。

2 结果分析

图 3 展示了 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2，$\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 时 Top 层部分 150 ns 内的磁矩分布演化。可以看到 Skyrmion 在前 30 ns 内基本不动，而后从中心慢慢开始顺时针转动。

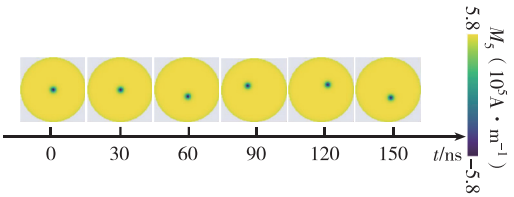
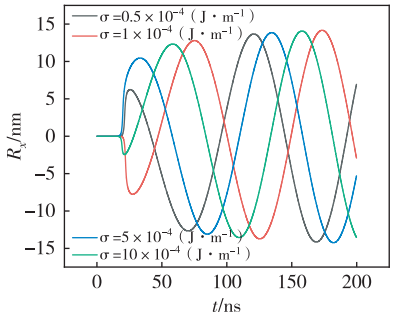


图 3 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2，$\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 时 Top 层 150 ns 内的磁矩分布演化

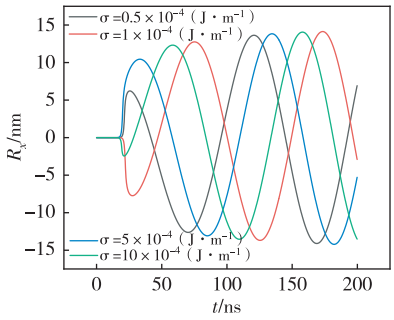
为深入研究 RKKY 相互作用下 Skyrmion 的动力学特性，本文通过分析 Skyrmion 引导中心轨迹进而研究其动力学特性。引导中心(R_x,R_y)可以通过式(4)计算，即：

$$R_x=\frac{\iint xq\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}{\iint q\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y},R_y=\frac{\iint xq\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}{\iint q\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y} \tag{4}$$

首先分析了 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2 时不同耦合强度下 Top 层和 Bottom 层 Skyrmion 引导中心 R_x 分量随时间变化的关系，如图 4 所示。



(a) Top 层



(b) Bottom 层

图 4 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2 时不同耦合强度下 Top 层和 Bottom 层引导中心 R_x 分量随时间变化情况

从图中可以看到，无论是在 Top 层还是 Bottom 层，Skyrmion 在 20 ns 左右开始逐步达到稳定振荡。随着耦合强度大小的变化，Skyrmion 的振荡周期也发生改变，振幅几乎与耦合强度的大小变化没有太大关系。此外，虽然 Top 层和 Bottom 层的磁矩随时间变化几乎一样，但二者之间是有根本差别的，后续会进一步分析。

图 5 展示了不同耦合强度下 Skyrmion 在 Bottom 层的运动轨迹。如图 5 所示，200 ns 内 Skyrmion 在 RKKY 相互作用下的运动轨迹和单层的 Skyrmion 的运动轨迹相似，都是从圆盘中心开始顺时针慢慢旋转。但和单层 Skyrmion 相比，Skyrmion 在 RKKY 作用下达到稳定振荡所需时间更长，同时进动半径的递增速度逐步递减。从图 4 可知 Bottom 层和 Top 层的轨迹差距并不大，因此，当 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2 时，在不同耦合强度下的 RKKY 相互作用中，Skyrmion 在 Top 层的运动轨迹并没有赘述。

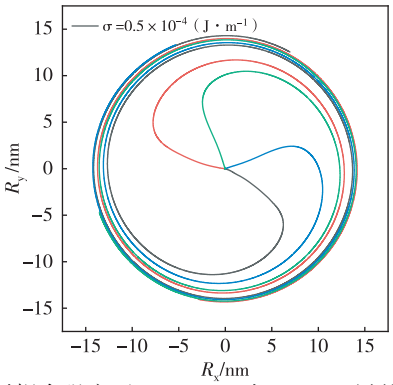
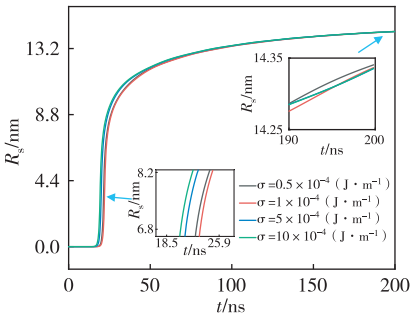
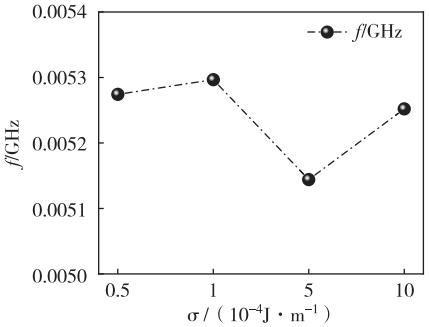


图 5　不同耦合强度下 Skyrmion 在 Bottom 层的运动轨迹

当 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2 时，在 RKKY 作用下 Skyrmion 在 200 ns 接近达到稳定振荡，本文对其振荡半径和振荡频率展开分析，如图 6 所示。图 6(a)展示了 Skyrmion 在 Bottom 层进动半径 R_s 随时间的变化关系。图 6(b)展示了稳定振荡频率随耦合强度的变化关系。



(a)不同耦合强度下进动半径 R_s 随时间变化关系



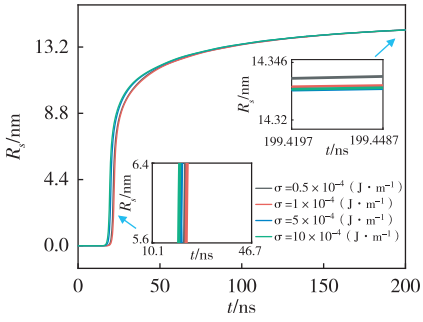
(b) 稳定振荡频率随耦合强度变化关系

图 6　Skyrmion 在 Bottom 层进动半径 R_s 随 t 变化关系和稳定振荡频率随耦合强度变化关系

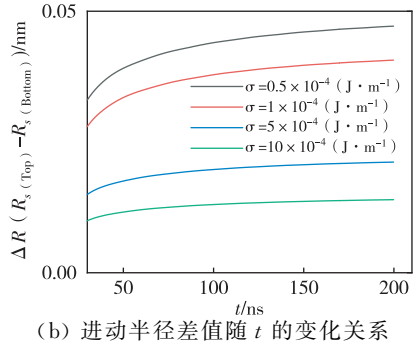
从图 6(a)中可以看出，当外加电流大小固定时，RKKY 相互作用下耦合强度取不同值时，Skyrmion 的进动半径的变化趋势基本相同：在 20 ns 之前 R_s 约为 0，Skyrmion 几乎没有进动；在 20～65 ns 内，R_s 迅速增高；在 65～200 ns 内，R_s 缓慢变大。不同耦合强度取值下 R_s 的变化趋势虽然相同，但对应时刻的进动半径大小有所差异，图 6(a)的两张插图分别是 19～24 ns 和 190～200 ns 时段的放大图：在进动半径迅速增大阶段，可发现 $\sigma=10\times10^{-4}$ J/m 时 R_s 变化最快，其次是 $\sigma=5\times10^{-4}$ J/m 和 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m，当 $\sigma=1\times10^{-4}$ J/m 时 R_s 变化最慢；这种变速关系一直持续到 $t=98$ ns 左右，$\sigma=1\times10^{-4}$ J/m 时的进动半径反超 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 时的情况，此时 R_s 的增长速率趋于平缓。

当电流取 0.1×10^{11} A/m^2 时，Skyrmion 在 Bottom 层不同耦合强度取值 RKKY 相互作用下的振荡频率也能达到吉赫兹量级。随着 σ 的递增，稳定振荡频率并没有随之线性变化：当 $\sigma=1\times10^{-4}$ J/m 时，f 最大，其次是 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 和 $\sigma=10\times10^{-4}$ J/m；当 $\sigma=5\times10^{-4}$ J/m 时，稳定振荡频率最小。因此，耦合强度大小的变化对稳定振荡的变化影响并不大，本文耦合强度最大取值是最小取值的 20 倍，而稳定振荡频率变化却很小。

对 Skyrmion 在 Top 层进动半径随时间的变化关系进行分析。图 7(a)为不同耦合强度下 Top 层 R_s 随 t 变化关系；图 7(b)为 40 ns 后 Top 层与 Bottom 层 R_s 差值随 t 变化曲线。



(a) 在不同耦合强度下进动半径 R_s 随 t 变化关系



(b) 进动半径差值随 t 的变化关系

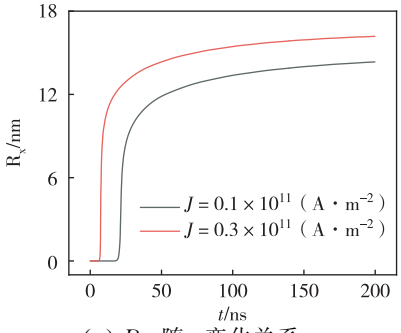
图 7　Top 层 Skyrmion 在不同耦合强度下 R_s 随 t 变化关系和进动半径差值随 t 的变化关系

研究结果表明，无论 Skyrmion 在 Top 层或是 Bottom 层，200 ns 内其进动半径随时间的变化规律

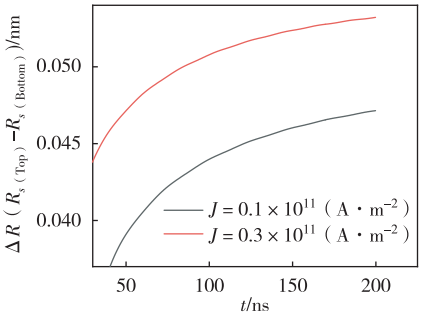
完全一样：20 ns 内的静止后急速增加，在 65 ns 后缓慢增加并趋于平稳。研究其急速增加和平缓增加阶段的放大图可以发现：在进动半径迅速增大阶段，当 $\sigma=10\times10^{-4}$ J/m 时，R_x 变化最快，其次是 $\sigma=5\times10^{-4}$ J/m 和 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m，当 $\sigma=1\times10^{-4}$ J/m 时 R_x 变化最慢；在进动平缓增加阶段，同一时刻 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 拥有最大的进动半径，其次是 $\sigma=1\times10^{-4}$ J/m 和 $\sigma=10\times10^{-4}$ J/m，而当 $\sigma=5\times10^{-4}$ J/m 时 R_x 最小。

因此，无论耦合强度取值大小如何，40 ns 后 Skyrmion 在 Top 层的进动半径始终大于在 Bottom 层的进动半径，并且随着耦合强度取值越大，差值 ΔR 越小。当 $\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 时 Top 层与 Bottom 层的差值最大值仍不到 0.05 nm，这也解释了为什么图 4(a)和(b)看起来几乎一样。

另外，本文还对 $D=3\times10^{-3}$ J/m^2 时，$J=0.3\times10^{11}$ A/m^2，$\sigma=0.5\times10^{-4}$ J/m 的情况进行对比研究，如图 8 所示。图 8 中耦合强度大小皆为 0.5×10^{-4} J/m，图 8(a)为不同外加电流下 Skyrmion 在 Bottom 层 R_x 随时间变化关系图，图 8(b)为不同电流取值 Top 层进动半径与 Bottom 层进动半径差值随时间的变化关系图。



(a) R_x 随 t 变化关系



(b) $\Delta R(R_{s(Top)}-R_{s(Bottom)})$ 随 t 变化关系

图 8 不同外加电流下，Skyrmion 在 Bottom 层 R_x 随时间变化关系和 Top 层进动半径与 Bottom 层进动半径差值随 t 的变化关系

从图 8(a)中得到：当 Skyrmion 开始进动后，$J=0.3\times10^{11}$ A/m^2 时的 R_x 要大于 $J=0.1\times10^{11}$ A/m^2 的情况，并且当电流取值较大时，Skyrmion 在 Bottom 层越早开始振动，有更大的振荡半径。从图 8(b)中可知：与 $J=0.1\times10^{1}$ A/m^2 一样，当电流取 0.3×10^{11} A/m^2 时，30 ns 后 Top 层进动半径大于 Bottom 层，且电流取值越大，对应差值也越大。

3 结论

本文研究了不同 RKKY 铁磁耦合强度对 Skyrmion 振荡及进动特性得调控。研究结果表明，在电流驱动 RKKY 耦合作用下，Skyrmion 从纳米盘中心开始顺时针旋转，最终达到稳定振荡。Skyrmion 在 Top 层进动略微快于在 Bottom 层的进动，并且随着耦合强度的增加 Skyrmion 在 Top 层和 Bottom 层稳定振荡半径差值明显递减。同时，RKKY 作用下 Skyrmion 基 STNO 的工作频率也可以达到吉赫兹级，耦合强度的改变也可以调控振荡频率。本文还研究了驱动电流大小对 RKKY 耦合作用下 Skyrmion 动力学特性的影响。经研究发现，电流越大，Skyrmion 起始振荡时间越小，进动半径越大，Top 层和 Bottom 层稳定振荡半径差值也越大。本文研究内容对 RKKY 耦合作用下 Skyrmion 基 STNO 器件的实现提供了理论基础，同时，为更加复杂的 Skyrmion 相关磁有序结构 STNO 的研究提供新思路。

参考文献：

[1] Fert A, Cros V, Sampaio J. Skyrmions on the track[J]. Nat. Nanotechnol., 2013, 8(3): 030152.

[2] Finocchio G, Büttner F, Tomasello R, et al. Magnetic Skyrmions: From fundamental to applications[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2016, 49(4): 040023.

[3] Fert A, Reyren N, Cros V. Magnetic Skyrmions: Advances in physics and potential applications[J]. Nat. Rev. Mater., 2017, 2(7): 17031.

[4] Sampaio J, Cros V, Rohart S, et al. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic Skyrmions in nanostructures[J]. Nat. Nanotechnol., 2013, 8(11): 839-844.

[5] Jiang W, Zhang X, Yu G, et al. Direct observation of the Skyrmion Hall effect[J]. Nat. Phys., 2017, 13(2): 162-169.

[6] Barker J, Tretiakov O A. Static and dynamical properties of antiferromagnetic Skyrmions in the presence of applied current and temperature[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 116(14): 147203.

[7] Castro M A, Allende S. Skyrmion core size dependence as a function of the perpendicular anisotropy and radius in magnetic nanodots[J]. J. Magn. Magn. Mater., 2016, 417: 344-348.

[8] Garcia-Sanchez F, Sampaio J, Reyren N, et al. A Skyrmion-based spin-torque nano-oscillator[J]. New J. Phys., 2016, 18(7): 075011.

[9] Sutcliffe P. Skyrmions, instantons and holography[J]. J. High Energy Phys., 2010, 2010(8): 1-25.

[10] Zhang Senfu, Wang Jianbo, Zheng Qiyuan, et al. Current-induced magnetic Skyrmions oscillator[J]. New J. Phys., 2015, 17(2): 023061.

[11] Zhu Mingmin, Cui Shuting, Xu Xiaofei, et al. Voltage-controllable magnetic Skyrmion dynamics for spiking neuron device applications[J]. Chin. Phys. B, 2022, 31(1): 018503.

[12] Thiele A A. Steady-state motion of magnetic domains[J]. Phys. Rev. Lett., 1973, 30(6): 230-233.

[13] Castro S J. Current-driven excitation of magnetic multilayers[J]. J. Magn. Magn. Mater., 1996, 159(1): 1-7.

[14] Brown W F, Labonte A E. Structure and energy of one-dimensional domain walls in ferromagnetic thin films[J]. J. Appl. Phys., 1965, 36(4): 1380-1386.

[15] Landau L D, Lifshitz E M. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies[J]. Phys. Zeitsch. der Sow., 1935, 8(2): 153-164.

[16] 杨洪新. 磁斯格明子研究现状综述[J]. 四川师范大学学报：自然科学版, 2021, 44(3): 285-306.
Yang Hongxin. Research progress of magnetic Skyrmions[J]. J. of Sichuan Normal University: Natural Science, 2021, 44(3): 285-306.

[17] Thonig D, Henk J. Gilbert damping tensor within the breathing Fermi surface model: anisotropy and non-locality[J]. New J. Phys., 2014, 16(1): 013032.

[18] Mcmichael R D, Stiles M D. Magnetic normal modes of nanoelements[J]. J. Appl. Phys., 2005, 97(10): 100901.

[19] Tejo F, Velozo F, Elias R G, et al. Oscillations of Skyrmion clusters in Co/Pt multilayer nanodots[J]. Sci. Rep., 2020, 10(1): 016517.

[20] Chakrabartty D, Jamaluddin S, Manna S K, et al. Tunable room temperature magnetic Skyrmions in centrosymmetric kagome magnet Mn_4Ga_2Sn[J]. Commun. Phys., 2022, 5(1): 010189.

[21] Chauwin M, Hu X, Garcia-Sanchez F, et al. Skyrmion logic system for large-scale reversible computation[J]. Phys. Rev. Appl., 2019, 12(6): 064053.

[22] Siracusano G, Tomasello R, Giordano A, et al. Magnetic radial vortex stabilization and efficient manipulation driven by the Dzyaloshinskii-Moriya interaction and spin-transfer torque[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 117(8): 087204.

[23] Power S R, Ferreira M S. Indirect exchange and Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) interactions in magnetically-doped graphene[J]. Crystals, 2013, 3(1): 49-78.

[24] Fritz L, Vojta M. The physics of Kondo impurities in graphene[J]. Rep. Prog. Phys., 2013, 76(3): 032501.

[25] Klinovaja J, Loss D. RKKY interaction in carbon nanotubes and graphene nanoribbons[J]. Phys. Rev. B, 2013, 87(4): 045422.

作者简介：

贾帅璠(1999—)，男，江苏省盐城市人，硕士研究生，主要研究方向为自旋电子学；

陶志阔(1981—)，男，江苏省徐州市人，博士，教授，主要从事自旋电子学材料与器件。