

磁子转矩翻转磁矩研究*

王 译[†]

(大连理工大学 三束材料改性教育部重点实验室 大连 116024)

2019-12-26收到

[†] email: yiwang@dlut.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200105

Magnetization switching by magnon torque

Wang Yi[†]

(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘 要 磁子是自旋波量子化的准粒子。磁子具有在绝缘磁性材料中无热耗散、低阻尼、长距离传输自旋的优势，避免了因电荷流动而产生焦耳热，可以克服日益显著的器件发热问题，因此磁子器件在低功耗信息存储与计算领域具有潜在应用前景。文章首先介绍了自旋波和磁子的概念，磁子具有的优势和研究价值；然后总结了磁子在铁磁和反铁磁绝缘体中输运以及新型磁子器件方面的最新研究结果；最后详细介绍了室温下实现磁子转矩驱动磁矩翻转的最新研究工作。这些工作对发展磁子学，实现低功耗、高速磁子型器件及应用具有较为重要的现实意义。

关键词 自旋波，磁子，磁子转矩，磁子器件，信息存储与逻辑计算

Abstract Magnons are the quanta of spin waves, which exhibit the advantages of heat-dissipation-free and low-damping transfer of spin information over micrometer or even millimeter long distances in magnetic insulators, so that Joule heating due to charge flow can be avoided. This can overcome the increasingly significant issue of heat dissipation in electronic devices, so magnon-based devices have great potential in low-power, high-efficiency information storage and computing applications. In this review we first introduce the concepts of spin waves and magnons, and the advantages of magnons for research, then review recent studies of magnon transport in ferromagnetic and antiferromagnetic insulators, as well as new designs of magnonic devices. Finally, we present in detail our recent work on magnon torque induced magnetization switching at room temperature. This work is of significance for the development of magnonics and low-power, high-speed magnonic devices.

Keywords spin wave, magnon, magnon torque, magnonic device, information storage and computation

1 引言

1922年，著名的施特恩—格拉赫实验表明电子除了带一个负电荷还具有自旋这一量子属性。

20世纪以来，人类不断探索对电子电荷的调控，促使微电子技术得到蓬勃发展，奠定了第三次产业革命的基础。遵循摩尔定律飞速发展的现代电子器件越来越小，在尺寸上逐渐逼近物理极限，芯片将面临高功耗、发热量大等挑战。利用电子的自旋属性，通过对自旋的调控，来实现信

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助(批准号: 82232016)和大连理工大学星海青千计划资助项目

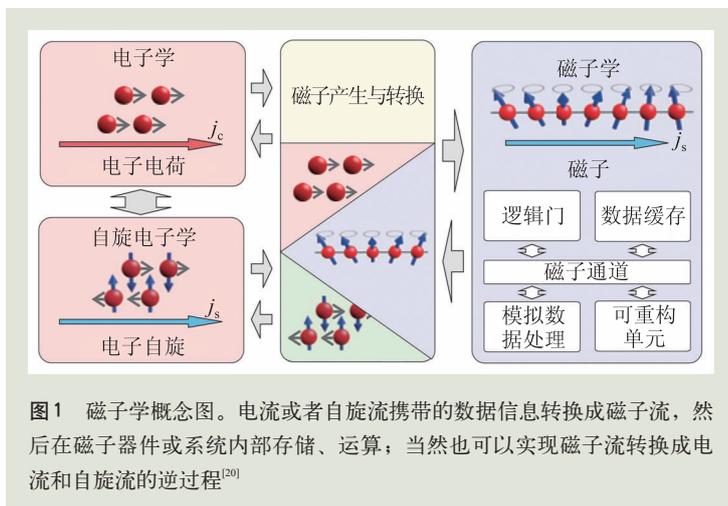


图1 磁子学概念图。电流或者自旋流携带的数据信息转换成磁子流，然后在磁子器件或系统内部存储、运算；当然也可以实现磁子流转换成电流和自旋流的逆过程^[20]

息的存储、输运、处理，有望突破常规微电子器件上述局限，因此对于自旋的操控是发展新型自旋电子器件的核心研究内容。

1988年巨磁电阻效应(GMR)的发现^[1, 2]开启了人们广泛研发自旋电子材料和器件的时代，在短短不到十年后的1997年，GMR材料已经正式取代早期的各向异性磁电阻材料用于磁存储工业上高密度磁硬盘(HDD)的磁读头，极大地推动了信息和技术的发展。GMR效应的发明人——法国科学家A. Fert和德国科学家P. Grünberg因此项科学发现荣获了2007年诺贝尔物理学奖。其后，1996年美国科学家J. C. Slonczewski和L. Berger提出利用电流来操控自旋^[3, 4]，当自旋极化的电子与局域磁矩相互作用，就有可能产生自旋转矩效应，从而改变局域磁矩方向，就如同我们给一个物体施加一个线性的力，可以翻转这个物体一样。根据电子极化的物理机制不同，自旋转矩效应可以分为自旋转移力矩(spin transfer torque, STT)和自旋轨道力矩(spin-orbit torque, SOT)效应。1999年，E. Myers等人^[5]首次实验实现了STT翻转Co薄膜磁矩，极大推动了利用电流操控自旋的研究和新型自旋器件的探索。当前，基于STT效应的磁随机存储器(STT-MRAM)已经量产并得到商业应用。2009年学术界开始采用SOT效应来设计SOT磁随机存储器(SOT-MRAM)、SOT自旋逻辑和SOT自旋纳米振荡器^[6]，并从2011年开始实验上陆续报道了利用

SOT效应实现自旋操控和磁矩翻转^[7-12]，其电子自旋极化物理机制可以是重金属自旋霍尔效应^[7]或者界面Edelstein效应^[8]。因为基于SOT效应的自旋器件可突破STT器件在速度和寿命方面的物理限制，所以近些年，研究人员对SOT的研究不断深入。提高自旋流产生效率，从而降低SOT器件驱动电流密度是实现上述目的的一个有效途径。因此科研人员广泛研究重金属之外其他新型强自旋轨道耦合材料中的SOT效应，比如拓扑绝缘体^[13-17]、氧化物二维电子气^[18]及外尔

半金属^[19]等。虽然目前相对于重金属材料，SOT驱动磁矩翻转的电流密度明显降低，但是基于SOT效应的自旋调控手段仍然需要移动电子参与，因此依旧存在电子运动和碰撞引发的焦耳热问题，导致器件高能耗，同时也限制了自旋电子器件速度与集成密度的进一步提高。

那么，我们能否找到一种全新的操控自旋的方法，从根本上避免传统电子器件发热的问题呢？文章将回答这个问题并详细介绍关于这个方面的一些最新研究进展。

2 自旋波和磁子

早在1930年，著名物理学家布洛赫(Felix Bloch, 1952年诺贝尔物理学奖获得者)就提出了磁子的概念，用来解释铁磁体自发磁化强度随温度变化的重要规律。自旋波是磁性系统中自旋进动的集体激发态(图1，右上角示意图)^[20]，其量子化的准粒子称为磁子，每一个磁子携带一个普朗克常量(\hbar)的自旋角动量，因此磁子也可以类似电子那样承载和传递自旋信息。自旋波和磁子的关系可类比于物质中晶格振动产生的声波和声子(准粒子)，也可以类比于光纤等光介质中传输的光波和光子。

有别于传统导电电子自旋，首先磁子(自旋波)传输自旋角动量不局限于电子导体，换句话说，对于一个磁性绝缘材料，电子无法穿过，但

是磁子却可以通过交换耦合相互作用把自旋信息传递过去^[20]。由于这个过程不需要导电电荷参与,可以避免电流产生的焦耳热问题,从而可以极大地降低自旋器件的功耗;同时,磁子可以低阻尼、长距离传播自旋信息,其传输距离可以达微米甚至毫米量级^[21-24],而导电电子自旋在铁磁薄膜中传输距离一般仅仅是2—3 nm左右^[25];磁子的本征频率可以在GHz~THz波段^[20],远高于当前常规电子器件的GHz工作频率,有望实现快速的信息传输和运算器件^[26];磁子的波动属性同时具备振幅和相位两个特性^[20, 27],基于自旋波的相干特性和非线性相互作用,可以产生新奇的物理现象和器件应用;此外,磁子的量子特性也可以产生其他宏观量子现象,例如自旋超流体^[22]和玻色—爱因斯坦凝聚^[28]等。所以,对磁子激发、传输、探测及如何利用磁子构建新型器件等方面的研究正在成为自旋电子学领域的一个前沿研究方向,一个新兴学科—磁子学(Magnonics)应运而生(图1)^[20]。

3 磁子输运

目前,磁子的输运研究主要基于铁磁绝缘体和反铁磁绝缘体两大材料体系。在2010年,日本学者Y. Kajiwara等人^[21]在铁磁绝缘体 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)单晶块材中成功激发了磁子,并且研究发现室温下磁子可以实现长距离的自旋信息传输,该研究掀起了绝缘磁性材料中磁子输运的研究热潮。2012年,S. S. L. Zhang等人^[29]在重金属/磁性绝缘体/重金属三明治结构中预言了热磁子辅助的电流拖拽效应。通过一侧重金属中的电荷流及其自旋霍尔效应可以产生垂直薄膜输运的自旋流。当自旋流极化方向与磁性绝缘体磁矩方向平行或反平行时,自旋流可转化成磁子流,并经由磁性绝缘体传导出去,然后在第二层重金

属与磁性绝缘体界面发生磁子流到自旋流转化的逆过程,最终在第二层重金属中转化而来的自旋流通过逆自旋霍尔效应产生电压信号。这就是理论预测的磁子中介电荷拖拽(magnon-mediated electric current drag)效应。随后L. J. Cornelissen等人^[30]在Pt/YIG/Pt平面结构中、H. Wu等人^[31]和J. X. Li等人^[32]在Pt/YIG/Pt垂直结构中分别在实验上证明了磁子中介电流拖拽效应的存在。该效应的理论预测和随后的实验观测证明了通过自旋霍尔效应激励和探测热磁子流的可行性以及磁子流到电子自旋流相互转化的有效性,为开发基于热磁子的磁子器件提供了理论和实验基础。

由于反铁磁绝缘体具有两套磁格子 m_1 和 m_2 ,相比铁磁材料表现出更加丰富的自旋动力学和磁子输运过程^[33],同时反铁磁材料具有抗外磁场干扰、无杂散磁场、本征频率高(THz)等特点^[33, 34],反铁磁绝缘体中磁子输运成为当前磁子研究的一个重要方向^[33]。2014年,H. Wang等人在YIG/NiO(111)/Pt复合多层膜结构中发现室温下多晶NiO薄膜中磁子的最长传输距离大于100 nm^[35],该工作激发了国际上对多种反铁磁绝缘体中磁子输运的研究,目前研究人员在NiO薄膜、CoO薄膜、 Cr_2O_3 薄膜和 $\alpha-Fe_2O_3$ 单晶中都探测到高效的

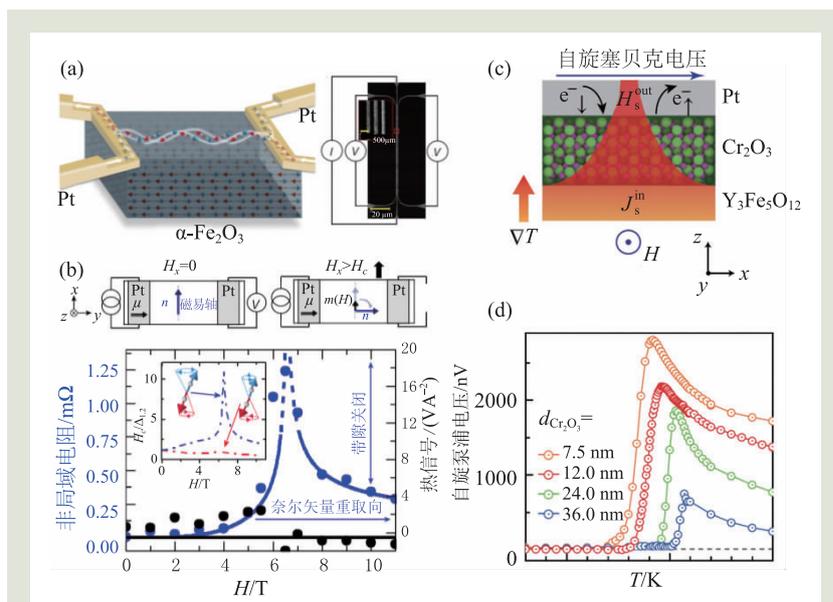


图2 磁子在反铁磁绝缘体(a, b) $\alpha-Fe_2O_3$ 单晶^[21]和(c, d) Cr_2O_3 薄膜^[37]中传输特性

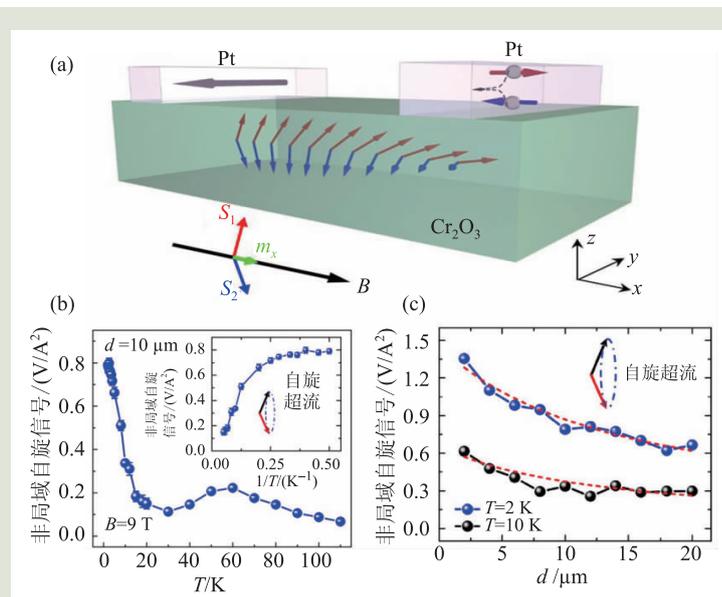


图3 自旋超流的重要实验证据^[22] (a)非局域自旋输运测量示意图; (b)不同温度下非局域自旋输运信号; (c)非局域自旋输运信号与运输距离的关系, 与自旋超流态输运理论预言一致

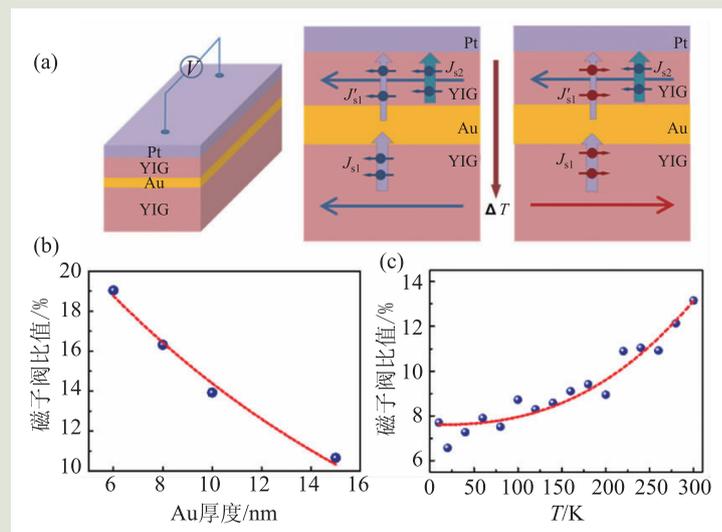


图4 磁子阀效应^[39] (a)磁子阀器件结构示意图; 磁子阀比值随(b)中间Au层厚度和(c)温度的依赖关系

磁子输运特性^[23, 36-38]。2018年, 日本和德国的研究人员在反铁磁绝缘体 Cr_2O_3 薄膜^[37]和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 单晶^[23]中分别发现当反铁磁绝缘体的奈尔矢量与注入自旋方向共线可以获得最有效的磁子输运, 当两者相互垂直时, 则几乎观测不到磁子输运(图2)。

同年, 我国学者韩伟和谢心澄教授组成的研究团队首次在反铁磁绝缘体 Cr_2O_3 中观测

到磁子自旋超流现象(图3)^[22], 这为研究玻色—爱因斯坦凝聚提供了平台, 为新型量子计算研究奠定了一定的实验基础。

特别是2018年, 我国学者韩秀峰研究员团队采用磁性绝缘体/间隔层/磁性绝缘体(MI/Spacer/MI)作为核心层的磁异质结构, 率先在国际上设计和实验实现了YIG/Au/YIG新型磁子阀^[39-41](图4(a))和全电绝缘的YIG/NiO/YIG磁子结两类器件^[42, 43](图5)。通过人工调控的热梯度产生磁子流, 并通过外磁场驱动使器件中两层YIG的磁矩形成平行或反平行态, 实现了对磁子输运的有效调控(图4)。而且该团队C. Y. Guo等人^[42]研制出的YIG/NiO/YIG磁子结器件, 其三明治结构核心区只允许磁子流的存在和传输而不支持电子自旋流的运输, 因此是一种纯粹的磁子型核心元器件, 初步实现了纯磁子流的产生、注入和有效调控。上述器件也是磁子晶体管的一种基本架构^[39, 42, 44-46], 为今后磁子型电路甚至磁子型芯片的出现奠定了元器件和物理基础。

4 磁子转矩驱动磁矩翻转

实际自旋电子芯片通常需要通过磁矩的翻转来实现“0”和“1”信息存储和逻辑运算, 能否利用磁子驱动磁性

层翻转是实现低功耗、高速度磁子器件的关键前提之一。当磁子把自旋角动量传递给局域磁矩, 磁子与局域磁矩相互作用会产生磁子转矩作用, 改变局域磁矩取向。图6(a)展示了磁子传输及磁子转矩驱动磁矩翻转^[38], 这不同于传统导电电子自旋转矩驱动磁矩翻转(图6(b))^[7-9]。

目前, 大部分磁子相关实验研究集中在铁磁绝缘体或者反铁磁绝缘体中磁子长距离传输

特性^[21-23, 30]。科学家理论预言磁子转矩效应可以驱动磁畴^[47-50]，但是实验上仅有少数磁子激发磁扰动或者自旋塞贝克效应产生的磁子驱动磁畴运动的报道^[51-53]，至今尚未实现磁子转矩效应完全翻转器件磁性层磁矩。为此，我们设计了基于拓扑绝缘体/反铁磁绝缘体/铁磁薄膜($\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}(\text{Py})$ 和 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$)异质结器件，在室温下实现了磁子转矩效应驱动 $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 和Py铁磁薄膜磁矩能发生 180° 翻转^[38]。

首先，利用自旋转矩铁磁共振(ST-FMR)技术^[13-15, 54, 55]测量并确定该体系的磁子转矩强度(图7(a))，通过对ST-FMR测量信号(图7(b))分析，可以获得对应体系的磁子转矩效率(强度)。在该器件中，拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 作为高质量自旋产生源，在 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}$ 界面激发出更多的磁子，反铁磁绝缘体NiO作为磁子高效传输通道。研究表明，当NiO层厚度为25 nm附近时，磁子转矩效率最大，达到 ~ 0.3 ，这个数值可比拟拓扑绝缘体中导电电子自旋转矩效率^[13, 15, 56]。

当没有NiO薄膜层时， $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Py}$ 器件中导电电子自旋转矩效率为0.67，与之前报道一致^[15]。随着NiO层厚度增加，自旋转矩效率快速下降到最小值，但当NiO厚度继续增加，自旋转矩效率开始增加，最终出现峰值($t_{\text{NiO}} \sim 25$ nm)，而后开始逐渐降低(图7(c)，实心圆)。较厚的NiO薄膜，体现绝缘特性，磁子将是自旋传输的载体，所以该实验结果表明测量得到的自旋转矩其本质应该是起源于磁子。上述实验结果又通过独立的THz发射谱测量^[57, 58]得到进一步确认(图7(c)，空心圆)，该技术表征的是异质结中自旋到电荷的转换过程，相当于ST-FMR测量的逆过程。再次，通过变温ST-FMR测量具有三种不同NiO厚度($t_{\text{NiO}} = 2, 5$ 和25 nm)的器件，发现自旋转矩强度都在某一个特定温度出现增强现象(图7(d))，并且这个特定温度与NiO磁转变温度接近，该现象与之前报道的磁子传输研究结果一致^[36, 59-61]。此外，当在 Bi_2Se_3 层和NiO层之间插入一个厚

度为6 nm的MgO非磁绝缘层，几乎观察不到磁子转矩，这是由于MgO插层阻碍了NiO中磁子激发，因此探测不到磁子转矩效应(图7(c)，星号)。综上，通过4个不同的对比实验，充分证明了磁子转矩效应的贡献及其可重复性。

基于磁子转矩效应，我们设计并制备如图8(a, b)所示的磁子器件，同时避免了Py层中的分流不利影响，最终实现了室温下磁子转矩驱动Py薄膜磁矩翻转(图8(c-n))^[38]。首先当向 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(25\text{ nm})/\text{Py}$ 器件通入正向脉冲电流后，利用磁光克尔显微镜只能观察到Py磁性单元的磁矩

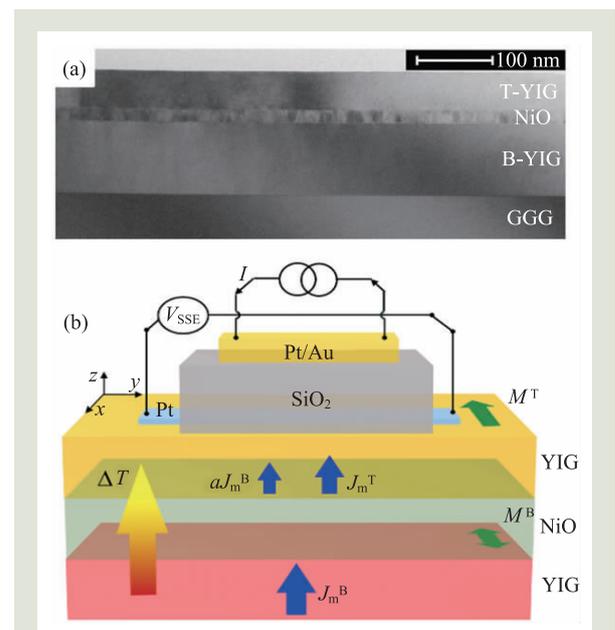


图5 全绝缘磁子结^[42] (a)GGG/YIG(100 nm)/NiO(15 nm)/YIG(60 nm)磁子结的微观结构和器件TEM截面图；(b)磁子结的自旋塞贝克信号测量示意图

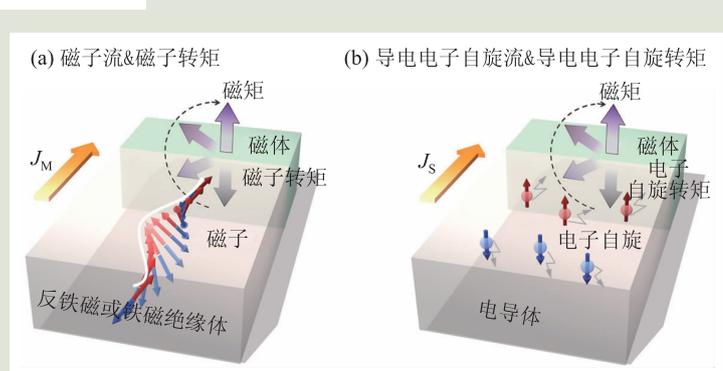


图6 两种类型的自旋转矩^[38] (a)磁子流及磁子转矩翻转磁矩；(b)导电电子自旋流及导电电子自旋转矩翻转磁矩

由向上翻转到向下(图8(c, d)), 中间黄色方框区域黑色变为灰色), 当通入反向电流后, Py的磁矩又可以恢复到初始状态(图8(e, f)), Py单元磁矩的翻转与电流极性的关系排除了热效应的贡献。而且, 也成功实现了室温下磁子转矩翻转 $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 磁矩^[38], 这种材料在磁随机存储器中广泛使用。然而在同样的实验条件下, 即使

通入更大的电流, 也无法在 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(5\text{ nm})/\text{Py}$ 器件中实现磁子转矩翻转Py磁矩(图8(g—j)), 这是由于当NiO为5 nm的时候, 磁子转矩效应比较小, 不足以翻转Py磁矩, 该对比实验排除了奥斯特磁场导致Py磁矩翻转的原因。此外, 在 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(25\text{ nm})/\text{Cu}(6\text{ nm})/\text{Py}$ 器件中同样能够观察到Py磁矩翻转(图8(k—n)), 该结果表明, 虽然Cu层打破了NiO和Py

界面处的直接交换耦合相互作用, 但是仍然可以通过磁子流—电子自旋流转换来实现自旋角动量传输和自旋转矩效应, 这可以极大丰富未来磁子器件的结构设计。图8中的实验都已被多次重复。

5 结束语

磁子转矩可以用来翻转磁性单元, 实现低功耗信息存储和逻辑运算功能。通过对材料和器件的进一步优化, 磁子转矩效率有望得到大幅度提升, 在上述磁子转矩驱动磁矩翻转原理性实验中, 是通过电学方法激发反铁磁绝缘体磁子流, 希望该工作能够激发全磁子转矩器件的研究。当然要实现上述目标, 仍然有很多问题需要我们去探讨和解决, 比如, 如何获得大的磁子转矩强度, 深入阐明磁子激发、输运以及界面等物理特性; 此外, 设计新型磁子转矩器件, 开发新功能也是非常值得探索的一个

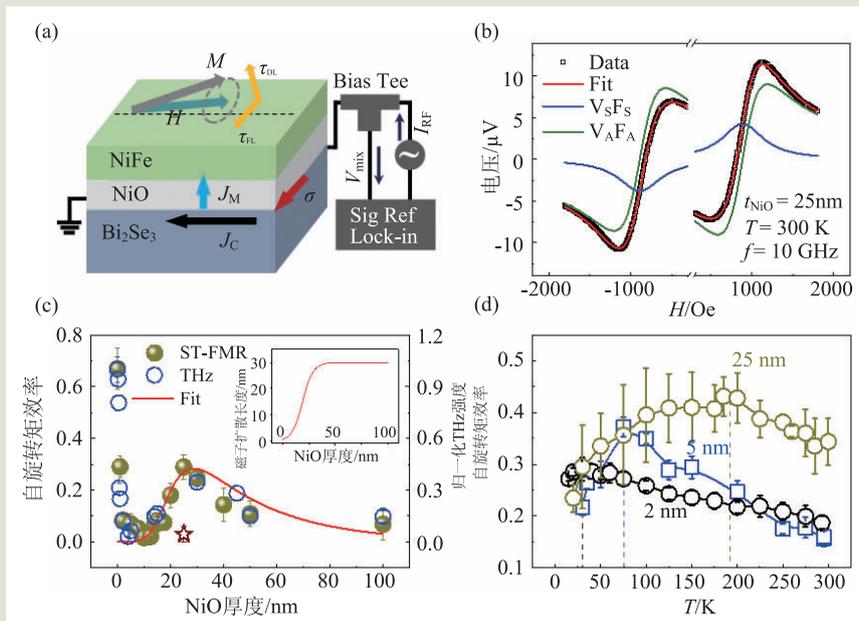


图7 自旋转矩铁磁共振(ST-FMR)技术测量磁子转矩^[38] (a)ST-FMR测量示意图; (b)一个典型ST-FMR测量曲线及拟合; (c)分别利用ST-FMR, THz发射谱测量技术获得的室温下自旋转矩效率随反铁磁绝缘体NiO厚度的变化关系; (d) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(t_{\text{NiO}} = 2, 5 \text{ 和 } 25\text{ nm})/\text{Py}(6\text{ nm})$ 器件中不同温度下磁子转矩

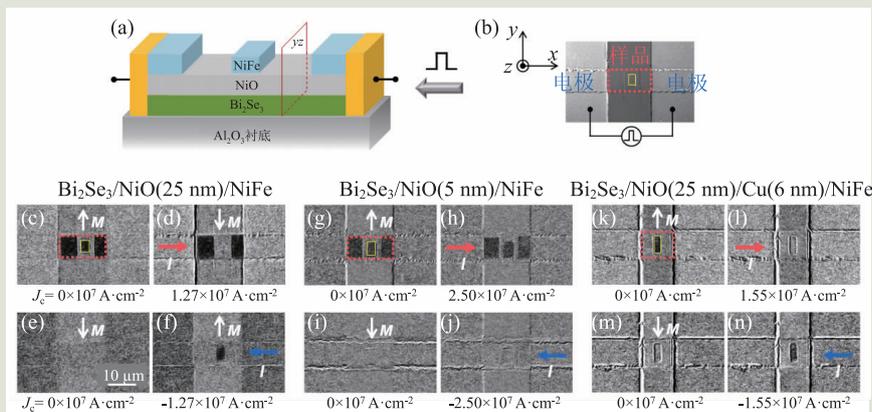


图8 室温下 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}/\text{Py}$ 异质结器件中磁子转矩驱动磁矩翻转^[38] (a)磁子转矩器件示意图; (b)磁子转矩器件光学照片; (c—f) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(25\text{ nm})/\text{Py}$ 器件中磁子转矩驱动磁矩翻转磁光克尔显微镜照片; (g—j) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(5\text{ nm})/\text{Py}$ 器件中磁子转矩驱动磁矩翻转磁光克尔显微镜照片; (k—n) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{NiO}(25\text{ nm})/\text{Cu}(6\text{ nm})/\text{Py}$ 器件中磁子转矩驱动磁矩翻转磁光克尔显微镜照片

研究方向。总之,对磁子的研究方兴未艾,磁子学为我们开辟了实现低功耗、高速度信息存储和逻辑运算器件的新途径,磁子型器件必将在未来新型自旋芯片中发挥重要作用。

致谢 感谢来自新加坡国立大学 Hyunsoo Yang 教授合作研究以及大连理工大学赵纪军教授、张庆瑜教授的有益讨论。

参考文献

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61: 2472
- [2] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F *et al.* Phys. Rev. B, 1989, 39: 4828
- [3] Slonczewski J C. J. Magn. Magn. Mater., 1996, 159: L1
- [4] Berger L. Phys. Rev. B, 1996, 54: 9353
- [5] Myers E, Ralph D, Katine J *et al.* Science, 1999, 285: 867
- [6] 陈军养, 刘东屏, 温振超等。一种磁性随机存储器、磁性逻辑器件和自旋微波振荡器。中国发明专利授权号: ZL200910076048.X
- [7] Liu L, Pai C F, Li Y *et al.* Science, 2012, 336: 555
- [8] Miron I M, Garello K, Gaudin G *et al.* Nature, 2011, 476: 189
- [9] Brataas A, Kent A D, Ohno H. Nat. Mater., 2012, 11: 372
- [10] Zhang X, Wan C, Yuan Z *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2017, 428: 401
- [11] Kong W, Wan C, Wang X *et al.* Nat. Commun., 2019, 10: 233
- [12] 王天宇, 宋琪, 韩伟. 物理, 2017, 46: 288
- [13] Mellnik A, Lee J, Richardella A *et al.* Nature, 2014, 511: 449
- [14] Wang Y, Deorani P, Banerjee K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 257202
- [15] Wang Y, Zhu D, Wu Y *et al.* Nat. Commun., 2017, 8: 1364
- [16] De M, Grassi R, Chen J Y *et al.* Nat. Mater., 2018, 17: 800
- [17] Khang N H D, Ueda Y, Hai P N. Nat. Mater., 2018, 17: 808
- [18] Wang Y, Ramaswamy R, Motapothula M *et al.* Nano Lett., 2017, 17: 7659
- [19] Shi S, Liang S, Zhu Z *et al.* Nat. Nanotech., 2019, 14: 945
- [20] Chumak A, Vasyuchka V, Serga A *et al.* Nat. Phys., 2015, 11: 453
- [21] Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S *et al.* Nature, 2010, 464: 262
- [22] Yuan W, Zhu Q, Su T *et al.* Sci. Adv., 2018, 4: eaat1098
- [23] Lebrun R, Ross A, Bender S *et al.* Nature, 2018, 561: 222
- [24] Liu C, Chen J, Liu T *et al.* Nat. Commun., 2018, 9: 738
- [25] Bass J, Pratt Jr W P. J. Phys. Condens. Matter, 2007, 19: 183201
- [26] Cheng R, Xiao D, Brataas A. Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 207603
- [27] Han J, Zhang P, Hou J T *et al.* Science, 2019, 366: 1121
- [28] Demokritov S, Demidov V, Dzyapko O *et al.* Nature, 2006, 443: 430
- [29] Zhang S S L, Zhang S. Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 096603
- [30] Cornelissen L, Liu J, Duine R *et al.* Nat. Phys., 2015, 11: 1022
- [31] Wu H, Wan C, Zhang X *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 93: 060403
- [32] Li J, Xu Y, Aldosary M *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 10858
- [33] Baltz V, Manchon A, Tsoi M *et al.* Rev. Mod. Phys., 2018, 90: 015005
- [34] Jungwirth T, Marti X, Wadley P *et al.* Nat. Nanotech., 2016, 11: 231
- [35] Wang H, Du C, Hammel P C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 097202
- [36] Lin W, Chen K, Zhang S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 186601
- [37] Qiu Z, Hou D, Barker J *et al.* Nat. Mater., 2018, 17: 577
- [38] Wang Y, Zhu D, Yang Y *et al.* Science, 2019, 366: 1125
- [39] Wu H, Huang L, Fang C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 097205
- [40] 都有为, 刘忠范. 科学通报, 2018, 63: 787
- [41] 吴昊, 韩秀峰. 物理, 2018, 47: 247
- [42] Guo C Y, Wan C H, Wang X *et al.* Phys. Rev. B, 2018, 98: 134426
- [43] 郝跃, 刘忠范. 科学通报, 2019, 64: 371
- [44] Cornelissen L, Liu J, Van Wees B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 097702
- [45] Chumak A V, Serga A A, Hillebrands B. Nat. Commun., 2014, 5: 4700
- [46] Wright K. Physics, 2018, 11: 23
- [47] Slonczewski J C. Phys. Rev. B, 2010, 82: 054403
- [48] Yan P, Wang X, Wang X. Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 177207
- [49] Hinzke D, Nowak U. Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 027205
- [50] Kovalev A A, Tserkovnyak Y. Europhysics Letters, 2012, 97: 67002
- [51] Jiang W, Upadhyaya P, Fan Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 177202
- [52] Moriyama T, Takei S, Nagata M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2015, 106: 162406
- [53] Woo S, Delaney T, Beach G S. Nat. Phys., 2017, 13: 448
- [54] Wang Y, Deorani P, Qiu X *et al.* Appl. Phys. Lett., 2014, 105: 152412
- [55] Wang Y, Ramaswamy R, Yang H. J. Phys. D: Appl. Phys., 2018, 51: 273002
- [56] Han J, Richardella A, Siddiqui S A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 077702
- [57] Wu Y, Elyasi M, Qiu X *et al.* Adv. Mater., 2017, 29: 1603031
- [58] Cheng L, Wang X, Yang W *et al.* Nat. Phys., 2019, 15: 347
- [59] Qiu Z, Li J, Hou D *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 12670
- [60] Prakash A, Brangham J, Yang F *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 94: 014427
- [61] Hou D, Qiu Z, Barker J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 147202