

# 自旋轨道转矩\*

王天宇<sup>1</sup> 宋琪<sup>1</sup> 韩伟<sup>1,2,†</sup>

(1 北京大学物理学院量子材料科学中心 北京 100871)

(2 量子物质科学协同创新中心 北京 100871)

## Spin-orbit torque

WANG Tian-Yu<sup>1</sup> SONG Qi<sup>1</sup> HAN Wei<sup>1,2,†</sup>

(1 International Center for Quantum Materials, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Beijing 100871, China)

2017-01-06收到

† email: weihan@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20170503

**摘要** 信息磁存储技术在日常生活中,特别是目前的“大数据”时代,扮演着极其重要的角色。随着物理学的深入研究和发 展,磁存储技术也发生着翻天覆地的变化。磁性随机存储器被视为未来磁存储技术的一颗新星,低功耗、读写快的特点使其拥有着巨大并且广泛的应用前景。磁存储技术很大程度上依赖于写入和读取磁存储单元信息的效率。近年来,基于自旋轨道耦合这一基本物理原理发展而来的自旋轨道转矩,由于能够有效地控制磁存储单元的磁矩,而受到了凝聚态物理和电子信息领域的广泛关注。涉及自旋轨道转矩的物理效应,如自旋轨道耦合、自旋霍尔效应、Edelstein效应等,都正在被全世界科学家深入地研究中。文章涵盖了近年来自旋轨道转矩领域的最新研究进展,重点介绍了重金属、二维材料体系、拓扑绝缘体以及反铁磁体系中的自旋轨道转矩。文章最后展望了自旋轨道转矩未来的发展方向及其潜在的工业应用价值。

**关键词** 自旋轨道转矩, 自旋电子学, 磁性, 自旋轨道耦合, 自旋霍尔效应, Edelstein效应, 自旋和电荷转换

**Abstract** Information storage technology plays a very important role in our daily lives, especially in the current “big data” age. Due to developments in physics, information storage technologies are in a golden era. As the new star of future information storage technology, magnetic random access memories have attracted much attention due to their low power consumption and fast operation speed, thus they are believed to have a bright future. The central challenge is to read and write the information in a basic magnetic unit. Recently it has been shown that the spin-orbit torque, a result of the spin-orbit coupling, can manipulate the magnetization effectively, so this has generated great interest in the fields of both condensed matter physics and electronics. The basic physics is being investigated worldwide, including the phenomena of spin-orbit coupling, the spin Hall effect, and the Edelstein effect. This paper reviews recent important results regarding the spin orbit torque, focusing on heavy metals, two dimensional materials/interfaces, topological insulators, and antiferromagnetic materials. At the end, future prospects and potential industrial applications are discussed.

**Keywords** spin-orbit torque, spintronics, magnetism, spin-orbit coupling, spin Hall effect, Edelstein effect, spin and charge conversion

\* 国家重点研发计划(批准号: 2015CB921104, 2014CB920902)、国家自然科学基金(批准号: 11574006)资助项目

# 1 引言:磁存储技术和自旋轨道转矩

## 1.1 磁存储技术的革新:磁物理学的发展

每天我们都会通过电脑、手机接触到大量的信息,电子办公、新闻娱乐等等已经成为了我们生活中必不可少的一部分。庞大的信息网络让我们的生活更加丰富多彩,也促进了社会的创新与发展。显然,信息量爆炸式的增长也让信息的存储技术面临诸多挑战,因此如何更高效更稳定地存储、读取信息显得尤为重要,这也是科学家不断研究的核心方向。回顾历史,不难发现,在磁学应用于科学技术后,磁存储技术一直是信息存储技术的热门研究方向。磁存储技术是指利用材料的磁学性质,创造出可以识别的两种物理状态,即实现了数字化存储的基本单元“0”和“1”,并通过读取和控制磁性性质对信息进行读、写的技术。日常生活中,无论是数码相机中存储的照片,还是手机保存的歌曲、视频,抑或是电脑中的会议记录、文献论文,它们大多都以二进制的数字信号存储于电子设备中。

磁存储技术最早可以追溯到19世纪的录音技术。1898年,丹麦工程师Valdemar Poulsen论证了磁记录的可行性,并发明了世界上第一台磁带记录录音机<sup>[1]</sup>。1928年德国工程师Fritz Pfleumer发表了利用氧化铁粉末来实现磁带录音机的专利<sup>[2]</sup>。1947年,以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 材料为首的现代磁带存储技术步入人们的生活,磁带被广泛应用。归功于20世纪80年代巨磁阻效应及其物理机制的发现<sup>[3-9]</sup>,磁技术在磁存储和磁逻辑器件得到进一步发展。磁盘,如图1(a)所示,作为电子信息存储设备逐渐普及。正是由于很多物理科学家的杰出贡献,现如今,尺寸只有手掌大小但容量却超过1TB的商用硬盘在市场上已是屡见不鲜。其中Albert Fert和Peter Grünberg两位教授分享了2007年的诺贝尔物理学奖,Stuart Parkin教授获得了2014年

Millennium科技重大突破奖。

与硬盘的信息存储技术相比,随机存储技术则可以提供更多的存储空间和更高的运行效率。在固态存储领域广泛应用的今天,相较于传统的3类固态存储(静态RAM、动态RAM和闪存(Flash)),磁性随机存储(Magnetic Random Accessory Memory, MRAM)被视为最具发展前景的存储技术。MRAM可谓是“集各家之大成”:拥有高密度非易失性数据存储性质的同时,又具有更快的读写速度和超长的耐久性<sup>[10]</sup>。另外由于它可以很好地集成在硅片上,这也为之后的工业化应用创造了良好的条件。采用MRAM的另一大优势是,计算机将不再需要传统的3类固态存储技术的分工合作,省去了信息在不同模块之间的传递,降低了系统整体的功耗,增强了系统的流畅性和稳定性。然而,随着器件尺寸设计的微型化,电流密度随着导体截面减小而增加、电子隧穿效应增强等问题在第一代MRAM中变得愈加显著。为了解决此问题,第二代MRAM,自旋转移力矩磁性随机存储技术(STT-MRAM, STT代表Spin Transfer Torque)应运而生<sup>[11, 12]</sup>。如图1(b)所示,STT-MRAM利用自旋极化的自旋流,在自旋转移力矩的作用下实现数据存储单元的读写。值得一提的是,赛道内存(Racetrack Memory)(图1(c))是目前基于磁畴壁开发的一项新兴磁存储技术<sup>[13, 14]</sup>。

自旋轨道转矩(Spin-Orbit Torque, SOT)指基于自旋轨道耦合(Spin-Orbit Coupling, SOC),利用电荷流诱导的自旋流来产生自旋转移力矩,进而达到调控磁性存储单元的目的<sup>[15-17]</sup>(图2(a))。基

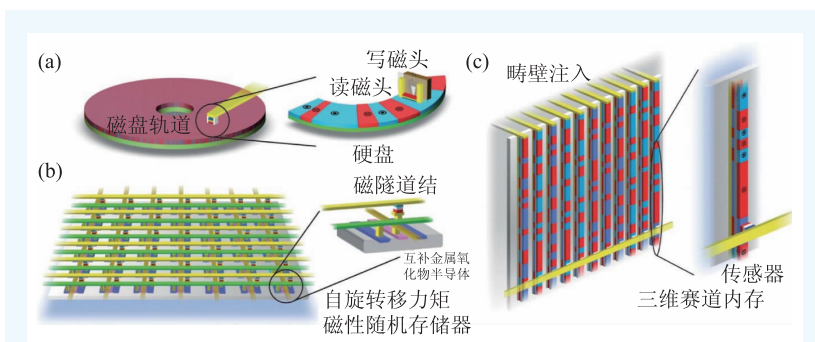


图1 磁信息存储技术 (a)硬盘; (b)磁性随机存储器; (c)赛道内存。来自引文[14]

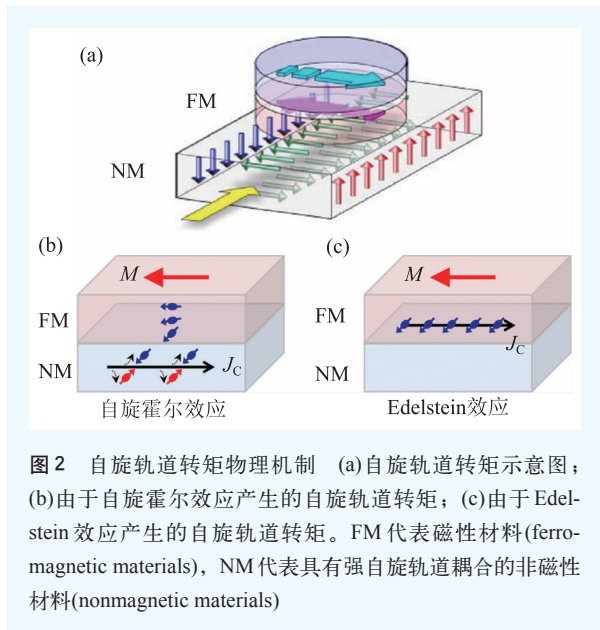


图2 自旋轨道转矩物理机制 (a)自旋轨道转矩示意图；(b)由于自旋霍尔效应产生的自旋轨道转矩；(c)由于Edelstein效应产生的自旋轨道转矩。FM代表磁性材料(ferromagnetic materials), NM代表具有强自旋轨道耦合的非磁性材料(nonmagnetic materials)

于SOT的MRAM(SOT-MRAM)克服了STT-MRAM的缺点，特别是SOT-MRAM将读写路径分开，因此有着比STT-MRAM更快的读写速度和更低的功耗<sup>[18, 19]</sup>。SOT-MRAM采用三端式磁性隧道结(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)结构，将读取和写入路径分开，写入电流大幅降低，写入速度更快；更重要的是，这不但保护了MTJ的隧穿绝缘层而且增强了读取数据的稳定性，并且由于将写入路径独立出来，可以被进一步优化。在赛道内存领域，SOT可以大大提高磁畴壁的运动速度<sup>[14, 20–23]</sup>。此外，SOT对于斯格明子(Skyrmion)也可以起到调控作用<sup>[24, 25]</sup>。总之，鉴于其对未来磁信息存储技术巨大的应用价值，SOT一直受到科学界和技术界的广泛关注。

## 1.2 最新磁存储技术的物理核心：自旋轨道转矩

要谈SOT，显然离不开我们故事的主人公——自旋(spín)。它和质量、电荷属性一样都是电子的内禀属性。就像人生下来就有男女之分一样，在外磁场的作用下，电子也会展现出两种不同的“性别”——自旋朝上(spín up)、自旋朝下(spín down)<sup>[26]</sup>。当电子展现出朝某一方向的自旋

属性时，我们称之为自旋极化(spín polarization)。电子的自旋极化实际上就是磁性材料展现出磁性的本质，例如铁、钴、镍磁化就是其微观上电子自旋极化的宏观表现。既然电子可以凭借电荷的属性，在集体运动时表现为电流；不难想象，自旋极化的电子也会由于自旋的属性，在集体运动中表现为自旋流。既然自旋极化的电子们在材料中会以自旋流的形式集体运动，由于实际的材料是有边界的，所以自旋极化的电子们“跑”到边上只好“静静地”待着了，这就形成了自旋积累(spín accumulation)。也正是这种非平衡态的自旋积累，s轨道和d轨道电子之间的自旋传递，产生了影响磁化强度的力矩，这些堆积的自旋极化的电子们会像磁铁一样产生等效的磁场，进而影响界面材料的磁化方向。上世纪80年代，John Slonczewski和Luc Berger提出了自旋转移力矩的概念：自旋极化的电子流可以将角动量从一个磁体中传到另一个上，激发自旋波甚至可以转变磁化方向<sup>[27–29]</sup>。基于强SOC产生的自旋流也会以力矩的方式来影响近邻的磁性材料，即SOT<sup>[15–17]</sup>。当SOT应用于技术领域的时候，人们最关心的问题便是电荷流与自旋流之间的转换效率，转换效率越高就意味着器件的工作能耗越小。因此，物理学家不断探究不同材料中自旋流和电荷流之间的转换效率，希望发现影响转换效率的物理机制，并找到转换效率更高的材料。其中电荷流和自旋流之间转换的两个物理机制是自旋霍尔效应(Spin Hall Effect, SHE)<sup>[30–34]</sup>和Edelstein效应<sup>[33, 35]</sup>。

一般材料中，电子是自旋简并的，而在这些材料中，由于SOC的影响，电子运动过程中会受到SOC产生的等效磁场的作用。不同自旋方向的电子受到等效磁场方向不同进而产生分流——当电流流过时，部分电流会转化为横向的净自旋流，自旋流自旋极化方向、电流方向和自旋流方向互为 $90^\circ$ 。这种现象如图2(b)所示：流动的电荷电流会产生垂直于电荷流动方向的自旋流，被称为自旋霍尔效应<sup>[30–34]</sup>。而在某些对称性破缺的二维体系中(特别是异质结的二维界面体系中，界面

中的电子们周围的环境上下不一样), 电子不再自旋简并, 该体系的等效哈密顿量出现跟SOC相关的额外项, 和自旋霍尔效应类似, 同样涉及电流和自旋流的转换, 称之为Edelstein效应<sup>[33, 35]</sup>。这种效应也会产生SOT, 如图2(c)所示。下面, 我们将详细介绍SOT领域的最新研究进展, 包括重金属中的自旋霍尔效应和SOT、金属体系中的Edelstein效应、二维材料体系、拓扑绝缘体中的Edelstein效应和SOT、反铁磁体系中的SOT以及SOT的研究展望。

## 2 重金属中的自旋霍尔效应和SOT

自旋霍尔效应首先由理论物理学家Mikhail Dyakonov和Vladimir Perel于1971年提出, 后来在2000年左右由Jorge Hirsch和张曙丰两位理论物理学家重新定义<sup>[30-32]</sup>。实验上由Awschalom课题组在2004年首次证明自旋霍尔效应的存在, 他们利用磁光克尔效应(Magneto-optic Kerr effect)观测到了在GaAs二维电子气边界有自旋的积累, 并证明是由于自旋霍尔效应引起的<sup>[36]</sup>。之后的研究中, 半导体GaAs、Ge、Si和金属体系Al、Au、Pt、Ta等被证明存在着自旋霍尔效应<sup>[16, 34, 37-50]</sup>, 并且重金属中的自旋霍尔效应更加显著<sup>[16, 33, 34, 47-49]</sup>。

既然重金属中存在着自旋霍尔效应, 那是否也存在由于此效应产生的SOT呢? 2011年左右, Ralph课题组研究了重金属Pt、Ta和Beta-W中的SOC产生的自旋流施加力矩作用于相邻的铁磁层<sup>[16, 49, 51]</sup>。如图3(a)所示, 在铁磁CoFeB和Ta双层膜结构中, 由于Ta中的强SOC和自旋霍尔效应, 流动于Ta中的电流会产生垂直方向的自旋

流, 自旋流造成界面自旋积聚, 积聚的自旋对相邻铁磁层产生力矩作用。如图3(b)所示, 当电流密度达到一定阈值后, CoFeB磁化方向发生反转, 从而观测到了CoFeB—MgO—CoFeB这一MTJ低电阻态和高电阻态之间的转化。这一技术相对于传统的使用磁场控制磁性材料磁化方向的手段, 效率更高、局域性更强。

除了以上提到的重金属中具有很大的自旋霍尔效应和SOT外, 研究发现, 杂质散射也可以大大增强本征SOC很低的材料中的自旋霍尔效应。比如, Ir和Bi掺杂的Cu材料, 就具有较强的自旋霍尔效应<sup>[47, 48]</sup>。

研究还表明界面效应对有效SOT有很大影响<sup>[50, 52, 53]</sup>。比如Parkin课题组及其合作者证明在不同的磁性金属和Pt界面, 由于自旋通过率不同, 造成的有效SOT也不同, 如图3(c)和(d)所示。自旋通过率——可以理解为界面积累的自旋转移到界面另一端的百分比, 跟界面的spin-mixing电导

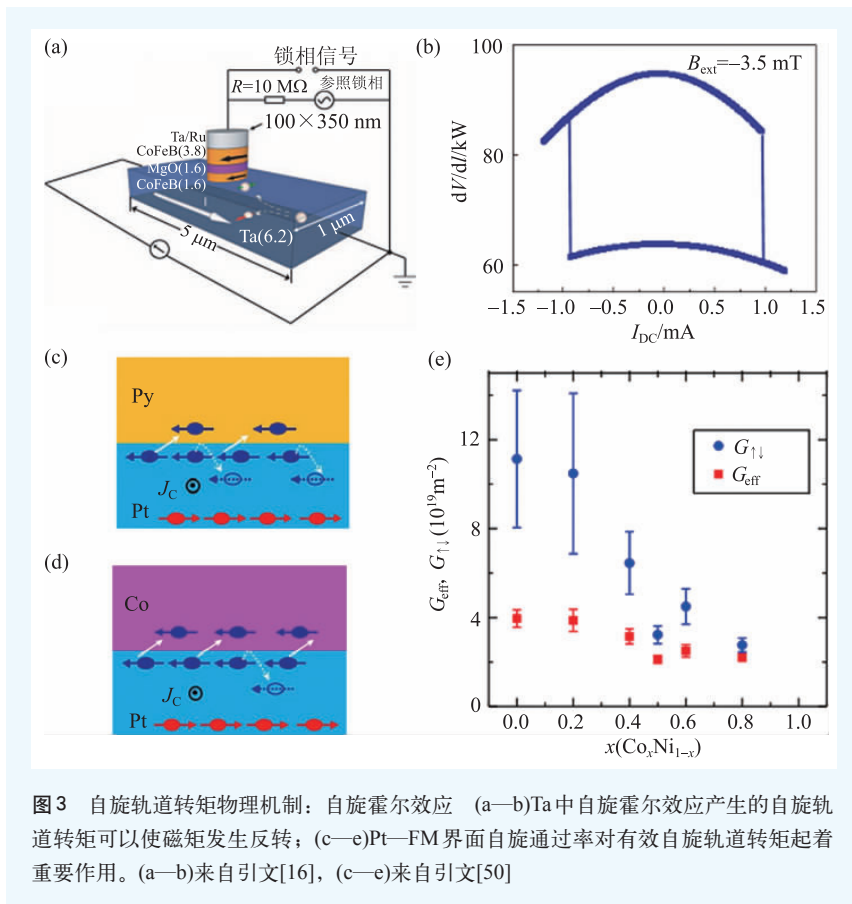


图3 自旋轨道转矩物理机制: 自旋霍尔效应 (a—b)Ta中自旋霍尔效应产生的自旋轨道转矩可以使磁矩发生反转; (c—e)Pt—FM界面自旋通过率对有效自旋轨道转矩起着重要作用。(a—b)来自引文[16], (c—e)来自引文[50]

非常相关(界面自旋和磁矩角动量的转化效率),如图 3(e)所示。在界面上插入其他的金属层,可以影响界面的 spin-mixing 电导,从而可以操控有效轨道转矩<sup>[50, 53]</sup>。

### 3 界面 Edelstein 效应

除了自旋霍尔效应以外,界面 Rashba SOC 效应同样可以实现自旋和电荷之间的转换<sup>[33, 35]</sup>。尽管表现形式上稍有不同,但它们本质上都是源于 SOC。Rashba SOC 根源上是电子所处环境的空间反转对称性破缺的相对论表现:无外磁场的情况下,一个在电场中运动的电子会在自己的本征坐标系内感受到一个等效磁场作用,等效磁场的方向和电子的动量方向相关,由此导致的能带结构就如图 4(a)所示,这种能带意味着一定方向的动量对应着一定方向的自旋极化。基于这种能带结构,当有电子流动时,界面上电子的动量将在某个方向产生不平衡,由于动量方向和自旋极化方向高度相关,动量的不平衡必然导致自旋极化的不平衡,从而产生自旋积累,这种效应称作 Rashba—Edelstein 效应,或 Edelstein 效应<sup>[33, 35]</sup>,

整个过程如图 4(b)所示。该过程与自旋霍尔效应有很多相似之处,比如,都是从电荷流转化成自旋流,都具有其相对的逆效应等。逆 Edelstein 效应如图 4(c)所示,自旋积聚(电子自旋极化方向的不平衡)同样会导致电流(电子动量的不平衡)的出现。不过,它们之间也具有很大的不同,如图 2(b)和(c)所示,自旋霍尔效应是体效应,而 Edelstein 效应发生在二维平面/界面内。并且,由于 Edelstein 效应根源上来自于界面电子感受到的外电场,所以人们可以通过外加电压调节“外电场”的大小,进而人为调控 Rashba 场的大小,实现调控 Rashba 自旋轨道耦合的强度。这种自旋轨道耦合的可调控性,在自旋电子学和量子计算领域有着巨大的潜在应用价值,同时也为自旋器件的实现提供了更多的可能性。最近几年的研究主要集中在金属体系、复杂氧化物界面、二维材料以及拓扑绝缘体表面态中,在下文我们将会逐一介绍。

#### 3.1 金属体系

前面我们提到在空间反转对称性破缺的体系中,可以产生 Edelstein 效应。该效应也可以用来实现对磁体磁化方向的电调控,并且已经在 Pt|Co|AlO<sub>x</sub> 体系中被实验证明<sup>[15, 20]</sup>。如图 4(d)所示,Co 层为铁磁层,其上表面的 AlO<sub>x</sub> 层和下表面的 Pt 层可以为 Co 薄膜提供 z 方向的较强电势差(提供了 Rashba 场所要求的空间反转对称性破缺)。当有电流在 Co 层流动时, k 空间中的电子分布将发生位移,变得关于原点不对称。由于自旋和轨道的耦合,动量分布的不平衡自然会导致自旋积累的不平衡,其净自旋极化方向垂直于电流方向。由于 Co 中的 s—d 交换相互作用,Co 中的传导电子和表现磁性的局域电子耦合在一起,从而传导电子的自旋积累间接地会对局域

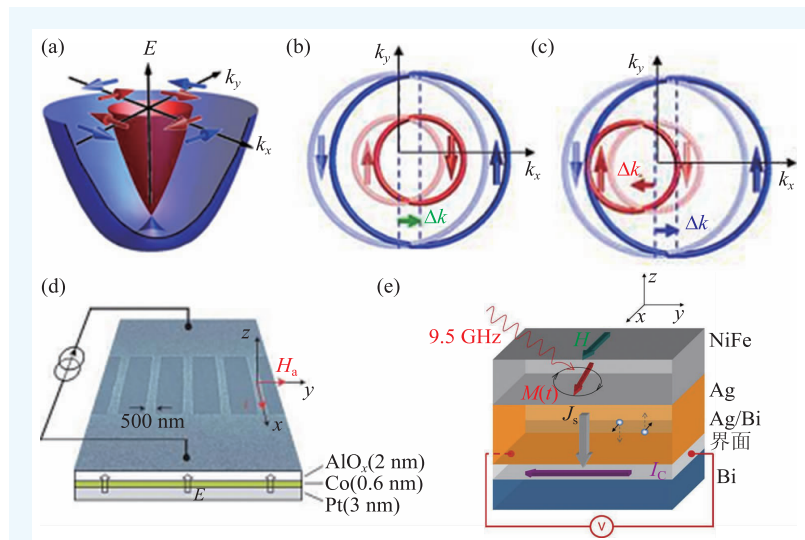


图 4 自旋轨道转矩物理机制: Edelstein 效应 (a)具有强 Rashba 自旋轨道耦合体系的能量色散关系; (b)Edelstein 效应示意图: 由于电荷电流产生自旋积累; (c)逆 Edelstein 效应示意图: 由于自旋注入产生电荷电流; (d)Pt|Co|AlO<sub>x</sub> 界面的 Edelstein 效应; (e)金属 Ag|Bi 界面的自旋泵浦和逆 Edelstein 效应。(a—c)来自引文[85]; (d)来自引文[20]; (e)来自引文[54]

电子的磁矩有转矩作用，实现Co磁性反转。

2013年，Fert课题组在Ag|Bi界面中发现逆Edelstein效应<sup>[54]</sup>。实验中的自旋流注入手段是自旋泵浦效应，指当NiFe合金处于铁磁共振状态时，由于界面的角动量转换，在NiFe合金中不断进动的磁矩使自旋流源源不断地注入Ag|Bi界面。其器件示意图如图4(e)所示，由于Ag|Bi界面处存在Rashba SOC，自旋和动量是锁定在一起的。注入的自旋流使界面发生自旋

积累，造成原本关于原点对称的自旋能带结构发生位移，自旋分布不再关于原点对称，如图4(c)所示，自旋分布上的不对称必然在电荷动量的层面上也展现出不对称。而动量分布上的不平衡等价于电子的集体运动表现出方向性，便产生了电流(自旋信号转化为了电信号，可以用常规的电学测量手段测得)。在Ag|Bi界面测量得到的相比于Ag和Bi中明显增强的电压信号，正是界面Rashba SOC所引起。该效应也通过其他方法或在其他类似体系(如Cu|Bi界面)中观测到<sup>[55-57]</sup>。

### 3.2 复杂氧化物界面

另一个引起科学家们浓厚兴趣的具有Rashba效应的体系是LaAlO<sub>3</sub>|SrTiO<sub>3</sub>(LAO|STO)界面的二维电子气。LAO和STO分别是很好的绝缘体，然而当把LAO薄膜利用分子束外延技术生长在STO衬底上时，如图5(a)所示，它们的界面出现了导电的且高迁移率的二维电子气<sup>[58-61]</sup>。二维电子气的Rashba SOC起源于LAO|STO界面上的电场的对称性破缺。2016年，Fert课题组利用自旋泵浦效应展示了LAO|STO二维电子气中自旋流到电流

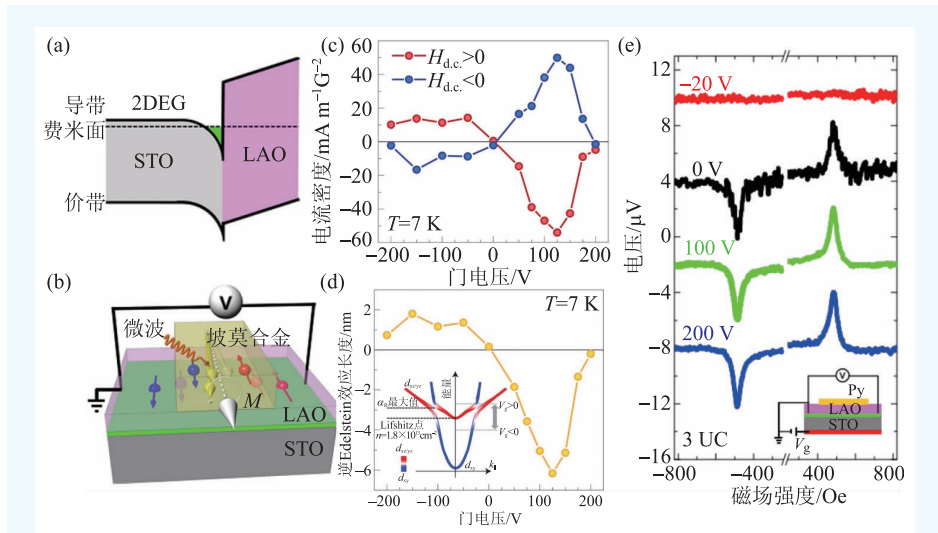


图5 复杂氧化物界面态的Edelstein效应 (a)LaAlO<sub>3</sub>|SrTiO<sub>3</sub>界面能带示意图，2DEG指的是界面具有很强Rashba自旋轨道耦合的二维电子气；(b)自旋泵浦和逆Edelstein效应测量示意图；(c)和(d)低温下(T=7 K)2UC LaAlO<sub>3</sub>|SrTiO<sub>3</sub>界面的自旋泵浦和逆Edelstein效应，门电压调控电子浓度和Rashba自旋轨道耦合强度；(e)室温下门电压对自旋—电荷转换效率的调控，样品是3UC LaAlO<sub>3</sub>|SrTiO<sub>3</sub>界面。(c)和(d)来自引文[62]；(e)来自引文[63]

的转化，如图5(b)所示<sup>[62]</sup>。同时通过在低温下施加门电压，极大地调控了二维电子气的SOC，进而实现了自旋流电流转换效率的电调控和极大提高<sup>[62]</sup>，如图6(c)和(d)所示。与此同时，北京大学量子材料中心韩伟课题组和中国科学院物理研究所孙继荣课题组合作，利用自旋泵浦技术，展示了这个体系的逆Edelstein效应：自旋流到电流的转换<sup>[63]</sup>，并实现了在室温下通过门电压调控LAO|STO界面二维电子气的自旋流电荷流之间的转换效率，如图5(e)所示。

此外，低温磁场下的弱反局域化效应也可用于研究LAO|STO界面SOC强度<sup>[64]</sup>。

### 3.3 二维材料体系

石墨烯由于具有非常弱的自旋SOC和较高的电子迁移率，一直被认为很有希望作为自旋通道应用在自旋电子学中<sup>[65-69]</sup>。然而，随着研究的不断深入，人们发现石墨烯中的SOC可以通过近邻效应来提高。比如实验证明铁磁绝缘体(Yttrium Iron Garnet, YIG)与石墨烯接触可以大大提高其自旋轨道耦合<sup>[70-72]</sup>。如图6(a)和(b)所示，使用自

旋泵浦效应向石墨烯中进行自旋注入，并直接观测到由自旋流转化成的电流。作者认为这可能是由于石墨烯所处环境的不对称性导致的Rashba效应产生，增强了自旋轨道耦合。由于石墨烯的门电压可控性，研究发现可以通过门电压来调控改变SOC的强度<sup>[72]</sup>。

除了石墨烯之外，人们相继在具有强SOC的二维材料(MoS<sub>2</sub>和WTe<sub>2</sub>)中发现了Edelstein效应<sup>[73-75]</sup>。

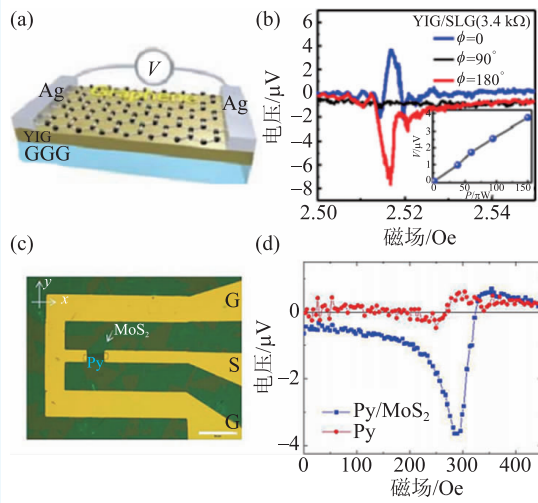


图6 二维材料中的(逆)Edelstein效应 (a)和(b)石墨烯中的自旋泵浦和逆 Edelstein 效应；(c)和(d)利用 SOT 铁磁共振技术研究二维材料 MoS<sub>2</sub>中的 Edelstein 效应。(a), (b)来自引文[71]；(c), (d)来自引文[73]

如图 7(c)和(d)所示，Hoffmann 课题组发现 MoS<sub>2</sub>和 Py 界面有着很强的 Edelstein 效应并且可以产生 SOT。这种新型材料中自旋轨道耦合的研究，将会对新型的自旋电子器件研发提供更为便利的基础。

### 3.4 拓扑绝缘体中的表面态

拓扑绝缘体是一种新型的量子材料，其体态是绝缘的，而其表面/边缘态具有导电的金属性质<sup>[76-78]</sup>。从图 7(a)的能带图中可以发现，就像具有 Rashba 自旋轨道耦合的二维电子气，拓扑绝缘体表面态中的传导电子的动量和自旋的方向也是被锁定在一起。并且和 Rashba 二维电子气相比有很大的优势，其 Fermi 面上只存在一个圈，因此在费米面上，向右移动的电子只能具有指向面外的自旋，而向左移动的只具有面内的自旋。当在拓扑绝缘体两端施加电压，由于体态的绝缘性，大部分电流从呈现金属性的表面态中流过，电流的存在导致电子分布在 *k* 空间中发生位移，*k* 空间中的分布不平衡会导致电子在自旋自由度上的分布同样表现出不平衡，因此拓扑绝缘体的表面将会产生自旋积累，积累的自旋对磁性层的磁矩有力矩作用，可以改变磁性层的磁化方向。2014

年，Ralph 课题组首先演示了利用拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 表面态中的 Edelstein 效应施加力矩于近邻的铁磁磁矩的实验<sup>[79]</sup>，如图 7(b)所示。

与此同时，其他拓扑绝缘体体系中的(逆)Edelstein 效应也受到了极大关注<sup>[80-88]</sup>。比如，Saitoh 课题组首先在 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 类的拓扑绝缘体上使用自旋泵浦手段进行了尝试<sup>[80]</sup>。他们利用坡莫合金作为自旋注入层，施加微波于坡莫合金，当微波频率和磁矩进动的本征频率相等时，坡莫合

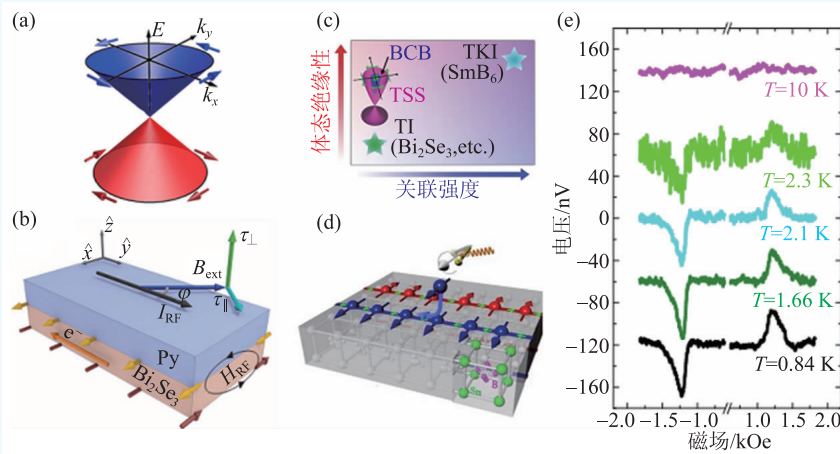


图7 拓扑绝缘体表面态中的(逆)Edelstein 效应 (a)三维拓扑绝缘体表面态能量-动量示意图；(b)Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>拓扑绝缘体表面态的 Edelstein 效应；(c)拓扑近藤绝缘体(TKI)与 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>类拓扑绝缘体的对比；(d)自旋注入到 SmB<sub>6</sub>表面态示意图；(e)不同温度下 SmB<sub>6</sub>中自旋-电荷转换。(b)来自引文[79]；(e)来自引文[87]

金便处于铁磁共振状态，其中的磁矩不断地进动，从而向其下方的拓扑绝缘体的表面态中注入自旋流。不断向下的自旋流引起拓扑绝缘体表面的自旋积聚，由于自旋轨道锁定，这种自旋积累不平衡会在垂直于自旋和自旋流的方向上产生电荷流。此后，Samarth课题组在室温条件下，实现了从磁性绝缘体 YIG 自旋泵浦到  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  类的拓扑绝缘体表面态<sup>[84]</sup>。Otani 课题组利用门电压来调控拓扑绝缘体费米面，实现了对其有效 SOT 的调控<sup>[88]</sup>。

然而，实验上探测  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  类拓扑绝缘体表面态上的逆 Edelstein 效应的时候，很难避免拓扑绝缘体体态的干扰(并不完全绝缘)。因此，一个体态完全绝缘，仅有表面态起作用的体系是更为理想的实验对象，这样就可以更为干净地展现来自拓扑绝缘体表面态的逆 Edelstein 效应。最近，大量的运输和角分辨光电子谱研究表明，Kondo 绝缘体  $\text{SmB}_6$  是一种新型的拓扑绝缘体<sup>[89-95]</sup>。当温度低于 3 K 时，它的体态完全绝缘，仅有表面态中的载流子对导电有贡献，也就是说在低温下，这种材料的电导是更为纯净的来自于表面态的电导，如图 7(c) 所示。2016 年，北京大学量子材料中心韩伟课题组和合作者成功地在 0.8 K 到 2.3 K 的低温下，利用自旋泵浦效应，在  $\text{SmB}_6$  这种材料上观测到来自于表面态的逆 Edelstein 效应<sup>[87]</sup>。图 7(d) 为实验原理图，图 7(e) 中自旋信号的温度依赖关系则展示出当温度逐渐降低，表面态逐渐主宰电导性质的时候，自旋信号逐渐增大。

## 4 反铁磁中的 SOT

1970 年，Neel 在诺贝尔物理学奖颁奖演讲中非常简洁地表达了当时科学界对反铁磁的普遍理解——“很有趣，但是没用”<sup>[96]</sup>。反铁磁对外并不展现磁性，看上去其磁性无法利用，也因此一直以来被认为应用价值不大。然而，“天生我材必有用”，由于反铁磁对外界不显示磁性，不为外界磁场所动，恰恰也意味着反铁磁在信息存储上有着很强的抗干扰性。不管反铁磁器件如何紧

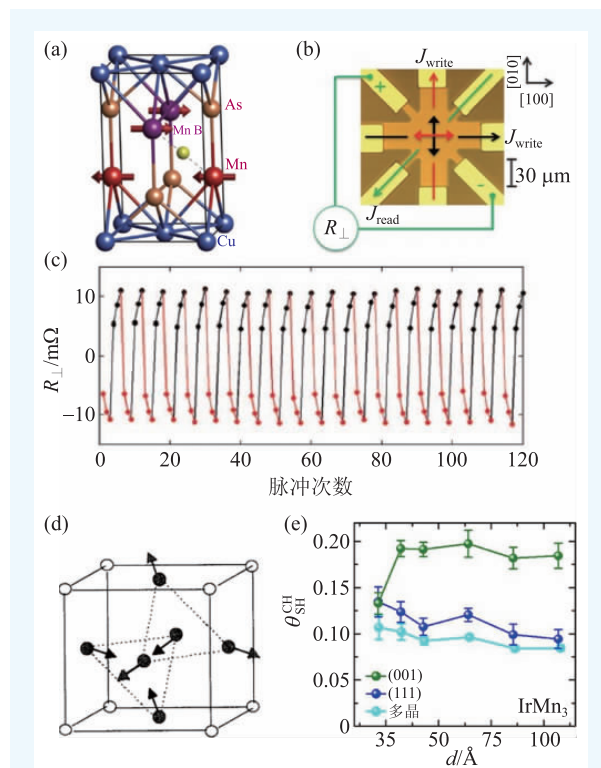


图8 反铁磁体系中的自旋轨道转矩 (a)CuMnAs 晶格和自旋结构图；(b)通过写入电流的自旋轨道转矩改变 CuMnAs 中的磁结构；(c)读出信号随着写入电流的变化，黑色/红色标明图(b)中不同方向的写入电流；(d)反铁磁  $\text{IrMn}_3$  中的晶格和自旋结构；(e)不同晶向  $\text{IrMn}_3$  薄膜中的自旋轨道转矩。(a—c)来自引文[98]；(e)来自引文[104]

密排列，相邻之间的反铁磁个体都不存在相互干扰。此外，由于反铁磁中磁矩相互作用的本征频率远远高于铁磁体，这意味着以反铁磁为基础的信息处理技术的处理速度更快，当初不被看好的反铁磁，现在反而展现出更大的应用前景。

谈到反铁磁存储技术，如何有效地探测并操控反铁磁中磁矩的状态，成为了首先需要解决的问题<sup>[97]</sup>。最近，基于反铁磁材料的信息读写的新想法被提出——基于反铁磁中的 SOT：利用电流产生的自旋流来调控反铁磁的磁化方向<sup>[98]</sup>。如图 8(a) 所示，以实验中的反铁磁  $\text{CuMnAs}$  为例， $\text{CuMnAs}$  两个极化方向相反的磁晶格分别对应着处于晶胞不同位置处的两个 Mn 原子。位于不同磁晶格的 Mn 原子 Mn-A 和 Mn-B 不仅自旋取向相反，而且其所处的局部环境的中心反演对称性的破缺也恰好相反。Mn-A、Mn-B 的中心反演对称



性破缺导致的自旋轨道锁定和在施加电流时的 Edelstein 效应也分别在图 8(a) 中画出。由于对称性破缺的方向相反, Rashba 自旋轨道耦合和 Edelstein 效应导致的自旋积累也是方向相反的。因此, 从整个晶胞的角度上来看, 尽管总的自旋积累相消为零, 但自旋积累对反铁磁晶格的 SOT 却叠加。这是因为 Mn-A 原子处积聚的自旋所施加的力矩主要作用在 Mn-A 原子上, Mn-B 原子处积聚的自旋所施加的力矩主要作用在 Mn-B 原子上, 而且 Mn-A 与 Mn-B 原子的自旋取向和自旋积累都满足符号相反, 所以自旋转矩的效果不是相消为 0, 而是相互叠加。此外, 由于磁电阻的各向异性, 当反铁磁中的磁晶格磁化取向在力矩的作用下发生变化时, 将会导致电阻的变化。通过测量电阻的变化, 便可探测电流导致的施加于反铁磁晶格的 SOT。以图 8(b) 为例, 在  $J_{\text{write}}$  方向上通入“写电流”, 在  $J_{\text{read}}$  方向上通入“读电流”并测量电阻以获取反铁磁磁晶格的磁化状态。图 8(c) 则记录了“写电流”脉冲对电阻变化的影响。该实验解决了如何有效地探测并操控反铁磁中的磁矩的状态, 为反铁磁存储技术奠定了基础。

此外, 反铁磁体系中的 SOC 也可以产生自旋流, 进而调控相邻的磁性层磁矩<sup>[99-104]</sup>。同前文提到的重金属一样, 在反铁磁  $\text{IrMn}_3$  中同样存在比较强的 SOT。值得强调的是, 在非线性反铁磁材料中, 如图 8(d) 和 (e) 所示的  $\text{IrMn}_3$ , 其非线性自旋结构也被证明可以产生有效的自旋流<sup>[104]</sup>。

## 5 SOT 研究展望

相较于现有的基于对电子电荷操控的信息存

储和处理技术, 磁性器件的“无电压”存储数据方式在低能耗方面有着巨大的优势。随着物理学在磁学领域的深入研究, 自旋电子器件(特别是 SOT-MRAM 的“写入”操作)不再需要外磁场, SOT 和 SOT-MRAM 成为了当前热门研究方向之一。SOT-MRAM 相较于 STT-MRAM 来说更具有灵活性, 已有大量的商业研究正在聚焦于这种新型器件。SOT-MRAM 也很好的规避了 STT-MRAM 器件中使用很大的电流穿过隧道结产生翻转磁矩而带来的耐久性问题: 在 SOT-MRAM 中, 人们可以使用较强的 SOT 来写入信息, 另外再使用巨磁阻效应来读取信息。这种方式极大地提高了器件的耐用性。特别是最近几年, 仅仅使用 SOT 而不使用外磁场来实现翻转垂直磁化的设想<sup>[105, 106]</sup>、具有基本的读、写操作功能的 SOT-MRAMs 相继在实验上得以实现。这种简单的层状结构, 却具有很强的磁性可翻转性、外加电场可调控性, 在磁记忆和存储等应用方面具有不可估量的工业价值。

SOT 的概念已在磁记忆、运算、存储器件等领域展现出巨大的前景。此外, SOT 在低能耗的微波振荡器<sup>[107]</sup>和自旋逻辑器件<sup>[108]</sup>中也具有很大的应用价值。SOT 为实现微波振荡电路提供了一种新的方式<sup>[107]</sup>。由于其发射频率可以由电流调控, 基于 SOT 的微波振荡器通常会拥有超宽的频率范围。因此, SOT 在无线通信和感应器件领域也有着巨大的应用潜力, 比如, 空间通信、高速射频广播、车辆雷达应用和健康安全领域等等。所有这些全新的技术发展都不断地在证明一个事实: SOT 为低能耗存储、记忆、逻辑运算和新型振荡器提供了一条全新的、令人兴奋的途径。

## 参考文献

- [1] Poulsen V. Inventor of the Week, 2003
- [2] Daniel E D, Mee C D, Clark M H. Magnetic Recording: The First 100 Years. Hoboken: Wiley-IEEE, 1998
- [3] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61: 2472
- [4] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F *et al.* Phys. Rev. B, 1989, 39: 4828
- [5] Parkin S S P, More N, Roche K P. Phys. Rev. Lett., 1990, 64: 2304
- [6] Fert A. Rev. Mod. Phys., 2008, 80: 1517
- [7] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* Science, 2001, 294: 1488

- [8] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76:323
- [9] Bader S D, Parkin S S P. *Annu. Rev. Cond. Mat.*, 2010, 1:71
- [10] Åkerman J. *Science*, 2005, 308:508
- [11] Huai Y. *AAPPS Bulletin*, 2008, 18:38
- [12] Apalkov D, Khvalkovskiy A, Watts S *et al.* *J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, 2013, 9:1
- [13] Parkin S S P, Hyayshi M, Thomas L. *Science*, 2008, 320:190
- [14] Parkin S, Yang S H. *Nat. Nanotech.*, 2015, 10:195
- [15] Miron I M, Garello K, Gaudin G *et al.* *Nature*, 2011, 476:189
- [16] Liu L, Pai C F, Li Y *et al.* *Science*, 2012, 336:555
- [17] Brataas A, Hals K M D. *Nat. Nanotech.*, 2014, 9:86
- [18] Oboril F, Bishnoi R, Ebrahimi M *et al.* *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2015, 34:367
- [19] Prenat G, Jabeur K, Di Pendina G *et al.* *Spintronics-based Computing*, Berlin: Springer, 2015, 145
- [20] Miron I M, Moore T, Szabolcs H *et al.* *Nat. Mater.*, 2011, 10:419
- [21] Ryu K S, Thomas L, Yang S H *et al.* *Nat. Nanotech.*, 2013, 8:527
- [22] Emori S, Bauer U, Ahn S M *et al.* *Nat. Mater.*, 2013, 12:611
- [23] Yang S H, Ryu K S, Parkin S. *Nat. Mater.*, 2015, 10:221
- [24] Nagaosa N, Tokura Y. *Nat. Nanotech.*, 2013, 8:899
- [25] Yu G, Upadhyaya P, Li X *et al.* *Nano Letters*, 2016, 16:1981
- [26] Maekawa S, Valenzuela S O, Saitoh E *et al.* *Spin Current*. Oxford University Press, 2012, 179
- [27] Slonczewski J. *J. Magn. Magn. Mat.*, 1996, 159:L1
- [28] Berger L. *Phys. Rev. B*, 1996, 54:9353
- [29] Ralph D C, Stiles M D. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2008, 320:1190
- [30] Dyakonov M I, Perel V I. *Phys. Lett. A*, 1971, 35:459
- [31] Hirsch J E. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83:1834
- [32] Zhang S. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85:393
- [33] Manchon A, Koo H C, Nitta J *et al.* *Nat. Mater.*, 2015, 14:871
- [34] Sinova J, Valenzuela S O, Wunderlich J *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2015, 87:1213
- [35] Edelstein V M. *Solid State Commun.*, 1990, 73:233
- [36] Kato Y, Myers R, Gossard A *et al.* *Science*, 2004, 306:1910
- [37] Wunderlich J, Kaestner B, Sinova J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94:047204
- [38] Sinova J, Culcer D, Niu Q *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92:126603
- [39] Garlid E S, Hu Q O, Chan M K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105:156602
- [40] Ando K, Takahashi S, Ieda J *et al.* *Nat. Mater.*, 2011, 10:655
- [41] Ando K, Saitoh E. *Nat. Commun.*, 2012, 3:629
- [42] Rojas-Sánchez J C, Cubukcu M, Jain A *et al.* *Phys. Rev. B*, 2013, 88:064403
- [43] Valenzuela S O, Tinkham M. *Nature*, 2006, 442:176
- [44] Saitoh E, Ueda M, Miyajima H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:182509
- [45] Ando K, Takahashi S, Ieda J *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2011, 109:103913
- [46] Mosendz O, Pearson J E, Fradin F Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104:046601
- [47] Niimi Y, Morota M, Wei D H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:126601
- [48] Niimi Y, Kawanishi Y, Wei D H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109:156602
- [49] Pai C F, Liu L, Li Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101:122404
- [50] Zhang W, Han W, Jiang X *et al.* *Nat. Phys.*, 2015, 11:496
- [51] Liu L, Moriyama T, Ralph D C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:036601
- [52] Rojas-Sánchez J C, Reyren N, Laczkowski P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:106602
- [53] Pai C F, Nguyen M H, Belvin C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104:082407
- [54] Sánchez J C R, Vila L, Desfonds G *et al.* *Nat. Commun.*, 2013, 4:2944
- [55] Zhang H J, Yamamoto S, Gu B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114:166602
- [56] Zhang W, Jungfleisch M B, Jiang W *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2015, 117:17C727
- [57] Isasa M, Martínez-Velarte M C, Villamor E *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 93:014420
- [58] Ohtomo A, Hwang H Y. *Nature*, 2004, 427:423
- [59] Hwang H Y, Iwasa Y, Kawasaki M *et al.* *Nat. Mater.*, 2012, 11:103
- [60] Mannhart J, Schlom D G. *Science*, 2010, 327:1607
- [61] Stemmer S, James Allen S. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2014, 44:151
- [62] Lesne E, Fu Y, Oyarzun S *et al.* *Nat. Mater.*, 2016, 15:1261
- [63] Song Q, Zhang H, Su T *et al.* *Science Advances*, 2017, 3:e1602312
- [64] Caviglia A D, Gabay M, Gariglio S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104:126803
- [65] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81:109
- [66] Tombros N, Jozsa C, Popinciuc M *et al.* *Nature*, 2007, 448:571
- [67] Han W, Kawakami R K, Gmitra M *et al.* *Nat. Nanotech.*, 2014, 9:794
- [68] Stephan R, Johan Å, Bernd B *et al.* *2D Materials*, 2015, 2:030202
- [69] Han W. *APL Mater.*, 2016, 4:032401
- [70] Wang Z, Tang C, Sachs R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114:

## HySpex



- 机载、地面两用  
高光谱成像光谱仪
- 在中国唯一有实际飞行测试数据的国际品牌

## SIGMAKOKI

### 西格玛相机



- 应用系统
- 纳米位移台
- 光学镜片\*镜架
- 手动电动位移台

## Lambert Instruments

- 增强型高速  
CCD/CMOS相机



- 灵敏度可达单光子水平，最小2ns选通时间并具有最高5000Hz的帧频

## SPECTROGON

- 滤光片波长可至12微米
- 平面衍射光栅  
激光调谐光栅  
脉冲压缩光栅  
Rowland凹面光栅



### 努美（北京）科技有限公司

电话：010-6202 9100  
 传真：010-8011 5555-522977  
 邮箱：info@nmerry.com  
 网址：www.nmerry.com

016603

- [71] Mendes J B S, Alves Santos O, Meireles L M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 226601
- [72] Dushenko S, Ago H, Kawahara K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 166102
- [73] Zhang W, Sklenar J, Hsu B *et al.* APL Mater., 2016, 4: 032302
- [74] MacNeill D, Stiehl G M, Guimaraes M H D *et al.* Nat. Phys., advance online publication, 2016
- [75] Cheng C, Collet M, Sánchez J C R *et al.* arXiv: 1510.03451, 2016
- [76] Moore J E. Nature, 2010, 464: 194
- [77] Hasan M Z, Kane C L. Rev. Mod. Phys., 2010, 82: 3045
- [78] Qi X L, Zhang S C. Rev. Mod. Phys., 2011, 83: 1057
- [79] Mellnik A R, Lee J S, Richardella A *et al.* Nature, 2014, 511: 449
- [80] Shiomi Y, Nomura K, Kajiwara Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 196601
- [81] Jamali M, Lee J S, Jeong J S *et al.* Nano Letters, 2015, 15: 7126
- [82] Wang Y, Deorani P, Banerjee K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 257202
- [83] Yamamoto K T, Shiomi Y, Segawa K *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 94: 024404
- [84] Wang H, Kally J, Lee J S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 076601
- [85] Rojas-Sánchez J C, Oyarzún S, Fu Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 096602
- [86] Jiang Z, Chang C Z, Masir M R *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 11458
- [87] Song Q, Mi J, Zhao D *et al.* Nat. Commun., 2016, 7: 13485
- [88] Kondou K, Yoshimi R, Tsukazaki A *et al.* Nat. Phys., 2016, 12: 1027
- [89] Dzero M, Sun K, Galitski V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 106408
- [90] Lu F, Zhao J, Weng H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 096401
- [91] Jiang J, Li S, Zhang T *et al.* Nat. Commun., 2013, 4: 148
- [92] Kim D J, Thomas S, Grant T *et al.* Scientific Reports, 2013, 3: 3150
- [93] Li G, Xiang Z, Yu F *et al.* Science, 2014, 346: 1208
- [94] Xu N, Biswas P K, Dil J H *et al.* Nat. Commun., 2014, 5: 4566
- [95] Dzero M, Xia J, Galitski V *et al.* Annu. Rev. Condens. Matter Phys., 2016, 7: 249
- [96] Néel L. www.nobelprize.org/nobel\_prizes/physics/laureates/1970/neel-lecture.pdf
- [97] Marti X, Fina I, Frontera C *et al.* Nat. Mater., 2014, 13: 367
- [98] Wadley P, Howells B, Železný J *et al.* Science, 2016, 351: 587
- [99] Mendes J B S, Cunha R O, Alves Santos O *et al.* Phys. Rev. B, 2014, 89: 140406
- [100] Zhang W, Jungfleisch M B, Jiang W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 196602
- [101] Zhang W, Jungfleisch M B, Freimuth F *et al.* Phys. Rev. B, 2015, 92: 144405
- [102] Seki S, Ideue T, Kubota M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 266601
- [103] Frangou L, Oyarzún S, Auffret S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 077203
- [104] Zhang W, Han W, Yang S H *et al.* Science Advances, 2016, 2: e1600759
- [105] Lau Y C, Betto D, Rode K *et al.* Nat. Nanotech., 2016, 11: 758
- [106] Yu G, Upadhyaya P, Fan Y *et al.* Nat. Nanotech., 2014, 9: 548
- [107] Yu X W, Pribrig V S, Acremann Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 167202
- [108] Wan C, Zhang X, Yuan Z *et al.* Adv. Electron. Mater., 2017, 3: 1600282