



走向自旋的未来信息时代

韩伟¹, 吴镒², 罗锋³, 武晓君⁴, 肖江⁵, 刘恩克⁶, 程智刚^{6,7}, 戴亚飞^{7*}

1. 北京大学物理学院量子材料科学中心, 北京 100871;
2. 南京大学物理学院, 南京 210093;
3. 南开大学材料科学与工程学院, 天津 300350;
4. 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026;
5. 复旦大学物理学系, 上海 200438;
6. 中国科学院物理研究所, 北京 100190;
7. 国家自然科学基金委员会交叉科学部, 北京 100085

*联系人, E-mail: daiyf@nsfc.gov.cn

收稿日期: 2022-01-03; 接受日期: 2022-01-11; 网络出版日期: 2022-03-14

摘要 随着电子器件的微型化不断接近物理极限, 后摩尔时代的新原理器件成为研究热点. 自旋电子学器件利用电子的自旋属性实现更高效的信息存储、传递和处理, 有望打破或者规避传统器件的热壁垒和量子壁垒, 因此自旋电子学是未来信息技术发展的重要方向之一. 在这样的大背景下, 国家自然科学基金委员会召开了“走向自旋的未来信息时代”的第285期双清论坛. 本文基于本次论坛所讨论的内容, 回顾了近年来自旋电子学研究所取得的主要进展和成就, 总结了未来信息时代我国自旋电子学研究所面临的重大机遇与挑战, 凝炼了该领域未来5–10年的重大关键科学问题, 为国家自然科学基金委员会对于自旋电子学领域的资助战略提出了建议.

关键词 自旋电子学, 自旋信息技术, 自旋材料, 自旋探测, 基础研究

PACS: 85.75.-d, 85.75.Hh, 85.75.Mm, 71.70.Ej, 75.70.Tj

1 引言

电荷与自旋是电子所具有的两个独立内禀物理属性. 电荷属性最先被人类认识并利用. 从19世纪开始人类就已经开始调控电子的电荷属性, 到20世纪后半叶发展出了以半导体为基础的微电子学, 奠定了第三次产业革命的基础. 随着电子器件的微型化不断接近物理极限, 后摩尔时代的新型电子器件成为研究热点, 但其发展遇到两个壁垒: 一是器件功耗增大所带来的

热壁垒; 二是随着尺寸减小导致的量子壁垒. 自旋电子学器件利用电子的自旋属性实现更高效的信息存储、传递和处理, 是打破或者规避上述壁垒的重要方式和途径. 因此自旋电子学越来越受到学术界、技术界和工业界的高度关注.

历史上, 自旋电子学对信息高密度存储的快速发展起到了决定性作用. 1988年由德国和法国科学家率先发现了巨磁电阻效应(Giant Magnetoresistance, GMR)^[1–3], 在之后的10年间被全面应用到计算机硬盘

引用格式: 韩伟, 吴镒, 罗锋, 等. 走向自旋的未来信息时代. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 267501

Han W, Wu D, Luo F, et al. Coming of the age with spintronics-based future information (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 267501, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0002

中,有效地提高了硬盘的信息存储密度,并直接促进了基于海量数据的大数据及人工智能领域的发展.这也成为现代前沿科学发现转化为生产力的经典案例,带动了每年大于千亿美元的市场规模.巨磁电阻效应的发现和应用仅仅是自旋电子学的冰山一角.此后,一系列新型的自旋效应,例如隧穿磁电阻效应(Tunneling Magnetoresistance, TMR)^[4,5]、自旋转移力矩效应(Spin-transfer Torque, STT)^[6]、自旋霍尔效应(Spin Hall Effect, SHE)^[7]等陆续被发现,并很快应用于自旋电子器件.如基于TMR效应和STT效应的非易失磁随机存储器(STT-MRAM),具有非常高的鲁棒性以及低能耗,已被广泛应用于航空航天领域,并从2019年起逐步取代嵌入式闪存存储器被物联网数据终端使用.尽管科学家们在自旋电子学领域取得了巨大的进步,我们仍然不完全了解如何设计出能够实现超小型、超高速、低功率器件的自旋电子学材料,以满足未来智能技术与智能时代的先进需求.

鉴于近年来在基础研究和应用研究方面掀起了新一轮的发展热潮,自旋电子学有望成为下一代信息技术发展的重要方向,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)交叉科学部、数理科学部、化学科学部、信息科学部、工程与材料科学部和政策局于2021年5月10日–11日在北京联合主办了主题为“走向自旋的未来信息时代”的第285期双清论坛,邀请逾50位来自物理、化学、信息和材料等学科领域的国内知名专家学者参加,对自旋电子学的发展现状与趋势、未来重要研究方向和科学问题进行了梳理和展望,提出了国家自然科学基金对相关领域资助战略的建议.

2 自旋电子学的研究内容

自旋电子学的基本内容是基于对电子或准粒子的自旋角动量的调控,实现自旋信息的存储、传输和处理.近年来该领域发展迅速,其研究内涵主要包括新型自旋材料、自旋电子器件和自旋探测技术三方面(见图1).

为了实现未来信息科技的突破,自旋电子学离不开对新型自旋材料和新物理效应的研究,以及新型器件的构建.已被广泛使用的磁性隧道结器件依赖于传统的磁性材料,主要利用材料中磁矩方向在外场调控下的反转来控制通过隧道结的电流大小.随着基础物

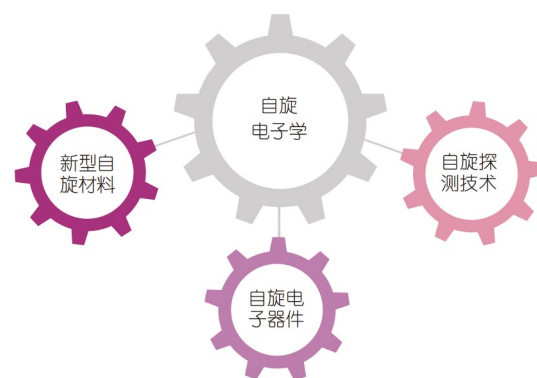


图 1 (网络版彩图)自旋电子学的学科内涵

Figure 1 (Color online) Contents of spintronics.

理和材料研究的迅猛进展,磁矩方向不仅仅可以通过外加磁场来控制,还可以利用包括自旋流、自旋-轨道耦合、自旋-晶体场耦合在内的多种方式进行调控.此外,磁性半导体、磁性绝缘体、磁性拓扑材料、二维磁性材料、自旋超导材料等新型材料的出现,大大拓展了自旋电子学在实际应用中的覆盖范围.

以应用为导向,新型自旋电子器件有望在未来信息领域取得重大变革.与传统电子器件相比,新型自旋电子器件在调控对象、调控材料、调控目的和调控体系各个方面都做了全面的拓展,在对自旋调控多样化、信息的稳定性和非易失性、状态读写速度、信息单元密度和功耗等方面均有可能实现质的飞跃.新型自旋器件有可能为新一代信息技术的发展提供更多发展路径.

新型自旋探测技术也是未来自旋器件发展的决定性因素.人们对自旋的认识以及掌控能力的提高促进了自旋探测技术等相关交叉领域的快速发展.实现高空间分辨、高时间分辨与高灵敏度探测是发展未来自旋器件的重要一环.

自旋电子学领域针对材料、器件、探测等各方向均自成体系,发展态势良好.然而未来自旋信息技术的发展需要依赖这三方面互相促进、协同发展、融为一体.就目前来看,三方面的研究均局限于相对独立的体系,相互之间缺乏有机连接.因此,寻找统一的自旋材料体系和研究范式,并将这三方面研究融为一个有机的整体、实现协同发展是当前自旋电子学领域面临的重要科学问题.

近年来自旋电子学的快速发展将给未来信息技术带来革命性的变革,也为我国在信息领域实现快速发

展提供了极佳机遇. 对于自旋电子学这样一个复杂且联动的研究领域, 多学科的参与和交叉必不可少. 此次双清论坛, 自然科学基金委根据该领域多学科交叉的特点, 凝聚了物理、化学、材料科学和工程、信息科学技术等多学科的力量, 从全局出发凝炼了来自自旋电子学中的核心难点问题, 旨在加快推动基于自旋的信息技术研究, 为我国把握未来信息时代的主动权提供基础理论和技术支撑.

3 自旋电子学研究的现状和发展情况

3.1 自旋器件

自旋器件是用电子电荷和自旋作为信息载体的新一代器件, 具有单元尺寸小、速度快、使用功耗低等优势, 能够广泛用于信息存储、传递和处理, 将在后摩尔时代扮演重要的角色. 近年来, 国际上的自旋电子学研究进展迅速, 在自旋轨道矩器件、磁斯格明子、反铁磁器件等领域产生了一些创新性的成果, 有望在未来信息领域上取得重大变革.

(1) 自旋轨道矩器件(SOT-MRAM)

利用自旋轨道矩来控制自旋方向, 进而控制磁性隧道结中自由层的极化方向是自旋轨道矩器件(SOT-MRAM)的核心原理^[8,9]. 从物理机制上来讲, SOT-MRAM的电荷-自旋转化机理主要包括自旋霍尔效应和Rashba-Edelstein效应^[10,11]. 自旋霍尔效应主要出现在高原子序数的重金属材料中, 用自旋霍尔角表征电荷流-自旋流的转换效率. Rashba-Edelstein效应决定于界面处对称性破缺, 其表征参数为Rashba系数, 在拓扑绝缘体表面态中已经观测到较大的自旋轨道矩^[12]. 利用自旋轨道矩的磁性隧道结器件可以实现垂直磁各向异性. 此类器件比面内磁各向异性器件更具优势. 例如在Ta/CoFeB/TaO_x体系中, 利用楔形的TaO_x来调控Co-FeB垂直各向异性, 当楔形结构的梯度方向与电流方向垂直时, 由于对称性破缺可以形成一个有效磁场实现无外场调控^[13]. 另外, 在CoTb亚铁磁薄膜中沿垂直方向上的成分梯度可以引入显著的本征SOT和Dzyaloshinskii-Moriya (DM)相互作用, 该DM相互作用可以进一步打破面内的对称性从而使面外磁矩的无外场翻转成为可能^[14]. 此外, 可以通过在多层膜结构中添加反铁磁层, 或与铁磁层直接交换作用产生交换偏置场作为垂直磁矩翻转的有效磁场^[15].

自旋轨道矩磁随机存储器件具有高稳定性和写入速度快等特性, 有望成为新一代超高性能非易失存储器, 具有巨大的应用前景. 随着CMOS (Complementary Metal-oxide-semiconductor)工艺尺寸进入10 nm以下, 自旋轨道耦合相关效应(Spin Orbit Coupling, SOC)由于表界面的存在而变得显著. 2010年美国康奈尔大学及法国SPINTEC研究所进一步制备了具有读写分离特性的自旋轨道矩(Spin Orbit Torque, SOT)三端磁隧道结器件, 该发现为发展超高性能非易失存储器提供了基础^[8,9]. SOT-MRAM成为当前国际学术界及产业界共同关注的焦点, 包括MIT, IMEC, Tohoku, ETH等研究团队都展示了亚纳秒翻转特性, 西部数据公司、格罗方德、英特尔等公司也将该技术纳入其未来发展路线图.

(2) 磁斯格明子

磁斯格明子是磁系统中存在的拓扑激发, 由于其磁结构的拓扑性, 斯格明子具有稳定性好、运动速度快、尺寸小等优点, 有望发展出高密度、高稳定性、低功耗和高速的存储器件^[16-18]. 2010年科学家发现驱动磁斯格明子运动所需的电流密度相比于驱动畴壁运动小至少6个数量级^[19]. 目前发现的磁斯格明子的最小尺寸为3 nm, 采用磁斯格明子作为存储单元, 相比硬盘可以提升存储器密度至少一个数量级. 因此探究磁斯格明子相关的新材料、物性和原型器件已成为当下材料、物理和信息的交叉研究热点. 磁斯格明子在国际上得到了广泛的关注, 各国投入了大量的研究经费. 比如, 英国自然科学基金会和美国国防高级研究计划局都大力资助磁斯格明子的基础和器件研究.

磁斯格明子的相关研究主要包括四类材料体系^[17,18]. 第一类是具有DM相互作用的体材料; 第二类是传统的磁泡, 这是由单轴各向异性和静磁能之间的竞争形成的磁斯格明子结构^[20]; 第三类是由阻挫磁体形成, 磁矩之间最近邻相互作用是铁磁, 次近邻是反铁磁, 在特定条件下会形成了磁斯格明子^[21]; 第四类是薄膜材料, 大多是由重金属/铁磁金属薄膜异质结形成且为奈尔型磁结构, 形成的磁斯格明子可在室温条件下存在^[17].

由于磁斯格明子的特殊拓扑磁结构, 其在磁场、电场、温度场、光场下表现出非常丰富的物理现象. 从应用的角度看, 核心是电流和磁斯格明子之间的相

互作用. 在电流作用下, 磁斯格明子不但有一个平行于电流方向的纵向速度, 还有一个横向速度, 被称为斯格明子霍尔效应, 即磁斯格明子在电流作用下运动会发生偏转^[22]. 电流驱动下的磁斯格明子, 受到杂质的钉扎作用, 其运动不能同步, 表现出一定的随机性. 因此, 要真正实现基于磁斯格明子的实用化器件, 需要深入研究如何有效地控制磁斯格明子的运动方向和减少杂质等对其运动的影响, 特别是如何对单个磁斯格明子进行读、写、运动及擦除的操控.

(3) 反铁磁器件

反铁磁体可以代替铁磁体作为自旋电子器件所依赖的自旋功能单元. 反铁磁器件具有对外部磁场干扰的鲁棒性, 不产生杂散场, 实现高密度集成, 同时还具有超快响应速度和能够增强磁传输效应等优势, 具有成为未来高密度和高速度信息存储、处理、通讯器件的巨大潜力.

反铁磁结构在自旋芯片领域应用广泛, 人造反铁磁自由层结构在Toggle-MRAM中的应用解决了磁场写入的行列半选问题, 人造反铁磁参考层结构解决了自由层处的漏磁场问题. 近年来磁性隧道结的自由层材料研究正从铁磁扩展到反铁磁和亚铁磁材料, 在信息存储和感知领域实现能耗、速度、可靠性等方面的性能突破. 除此之外, 反铁磁器件还涉及诸多其他自旋效应例如畴壁运动、“磁化”动力学以及(隧道)各向异性磁阻、自旋霍尔和逆自旋霍尔效应、自旋波和自旋超流体输运、超快全光磁化翻转等. 同时反铁磁体具有广泛的多样性, 涵盖金属、半导体和绝缘体, 而且具有丰富的磁性质, 为开发未来新型自旋电子器件提供了宽广平台.

近年来, 反铁磁器件的研究热点包括反铁磁奈尔序的外场调控^[23], 目的是实现基于反铁磁的高密度、高速度磁存储自旋器^[24]; 反铁磁绝缘体可以支持自旋流传输, 其效率高具有放大效应, 同时传输距离可达微米级别, 有望实现反铁磁磁振子传递的低功耗自旋电子器件^[25,26]; 利用反铁磁实现太赫兹源和太赫兹探测器^[27]; 反铁磁自旋波器件的研究, 如自旋波偏振调控器件等.

(4) 新概念器件

传统自旋器件主要是利用铁磁异质结构对电子自旋流进行调控, 进而实现功能性器件. 近年兴起的各类新概念自旋器件对传统自旋器件从几个方面做出了拓

展: 调控对象从电子自旋流拓展到磁子自旋流或其他准粒子自旋流; 调控材料从铁磁材料拓展到反铁磁或亚铁磁材料; 调控目的从实现自旋存储拓展到自旋逻辑或自旋类脑; 调控体系从纯自旋调控拓展到自旋体系与其他(光、声、热)物理作用的交叉. 这些探索的最终目的是提出在能耗、速度、功能等方面具备更高效率的信息存储或信息处理器件.

作为新概念器件的一个典型例子, 自旋与光谐振腔耦合体系是近年来兴起的一个新的研究领域. 通过腔自旋体系不仅能实现自旋与光子的相互调控, 而且有望实现基于自旋的量子信息处理器件和平台^[28]. 自旋体系具备非线性、振荡性、随机性、记忆性、可塑性等诸多类脑特点, 有望成为下一代人工智能产业的变革性技术^[29]. 磁子(自旋波)带有自旋但不带电荷, 利用磁子的自旋输运可规避焦耳热, 实现基于磁性绝缘体的低能耗自旋器件^[30,31]. 基于磁性薄膜的柔性磁电子器件可作为传感器和存储器应用于智能可穿戴设备, 具有重要的应用前景.

3.2 新型自旋材料

要开发高性能的自旋电子器件, 在很大程度上取决于材料的本征性质. 设计和发现具有全新或高效物理效应的关键材料是未来自旋电子学的基础. 以下列举有望用于未来自旋电子学器件制备的新型材料研究现状.

(1) 分子基自旋材料

从化学角度出发, 通过自下而上设计分子基自旋材料, 有望实现材料的可控制备、自旋电子器件的高集成度, 以及分子尺度上自旋的电场控制等目标. 有机半导体在自旋电子器件方面具有无机材料无法比拟的优点, 包括易于制备、价格低廉、绿色环保等. 此外, 有机半导体能够实现自旋长距离传输并且可以通过分子合成和替换精细地调控自旋轨道耦合大小. 有机半导体在自旋电子学中的应用始于有机自旋阀的实现. 21世纪初, 意大利Dediu研究组和犹他大学Shi和Vardeny研究组^[32,33]分别实现了有机半导体中的自旋输运和有机自旋阀高达40%的巨磁电阻效应. 自旋电荷转换方面, 2016年, Vardeny研究组^[34]利用分子调控的方法实现了自旋霍尔角在有机半导体中的有效调控. 分子磁体方面, 2018年Vardeny和Miller研究组^[35]合成并测量了高分子-金属配合物 $V(TCNE)_x$ ($x \sim 2$)的磁性

阻尼系数(2×10^{-4}), 其数值可以与世界上已知最低的 YIG 磁性阻尼系数相比拟, 可以作为自旋轨道矩应用的候选材料. 近年来, 有机-无机杂化半导体材料在自旋电子学方面也表现优异. 2012 年高松研究组^[36]合成了具有磁性的有机-无机杂化钙钛矿. 2014 年, 孙阳研究组与合作者^[37]在钙钛矿结构金属有机框架材料中发现了磁化强度量子隧穿效应. 2018 年 Pan 等人^[38]合成了居里温度高于 530 K 的磁性有机-无机杂化材料. 2020 年 Tom Wu 研究组^[39]发现光照可以调控有机-无机杂化钙钛矿的自旋轨道耦合; 高兴宇研究组^[40]发现改变有机-无机杂化钙钛矿中的卤族元素可以调控自旋轨道耦合. 2020 年, Oyarzabal 研究组和 Clérac 研究组^[41]合成了低密度 Cr-Pyrazine 金属有机框架磁性材料, 具有大矫顽力(7500-奥斯特), 可以在 242°C 保持磁性. 另一方面, 2019 年于贵和金奎娟课题组、谢士杰课题组^[42]都证明有机半导体中自旋传输速度比载流子速度快 1–2 个数量级, 和有机半导体的自旋电子器件相比无机材料器件具有快速响应的优点. 已有研究表明, 有机半导体自旋的研究可以为自旋器件的应用提供新的候选材料, 基于有机半导体的自旋轨道矩器件不仅具有电响应还可以实现光照响应^[39,43].

(2) 磁性拓扑电子材料

磁学和拓扑学的结合是先进材料和凝聚态物理领域近年来一个重要进展^[44]. 磁性拓扑电子材料首先具备拓扑表面态、外尔费米子等拓扑电子态, 表现出丰富的、新奇的电输运行为. 这类拓扑物态可以看作一种新型的拓扑准粒子激发, 具有奇异的拓扑保护特征. 此类材料包括磁性外尔半金属、磁性拓扑绝缘体材料等. 磁性外尔半金属是以外尔费米子为主要导电载流子的磁性半金属材料^[45], 其电子结构具有能带反转、线性色散等稳定的拓扑保护特征. 加上时间反演对称性的破缺, 该类材料具有很多奇特的物理性质, 包括外尔费米子手征反常、拓扑表面态费米弧、量子振荡、强贝利曲率、巨反常霍尔、巨反常能斯特、自旋-轨道极化子、低电流驱动磁畴翻转等物性和物态等. 磁性拓扑绝缘体是在拓扑绝缘体中建立长程磁有序的体系, 其体内绝缘但表面具有良好的导电性^[46], 此类材料有望实现高温量子反常霍尔效应、轴子绝缘体及拓扑磁电效应.

磁性拓扑电子材料展现出拓扑关联系统中电子的电输运行为, 为新物态、多场条件下的量子调控提供

了重要基础, 也为自旋电子学带来了新的契机. 基于长程本征铁磁序, 磁性外尔半金属和磁性拓扑绝缘体在二维极限下都可能出现高温量子反常霍尔效应、拓扑磁电耦合效应等; 也有望基于拓扑非平庸的边态电流, 实现二维量子反常霍尔器件、二维量子自旋霍尔器件等无耗散的新型电子器件. 磁性拓扑材料有望成为研究拓扑自旋电子学、拓扑电路互连、拓扑热电、拓扑催化、高温量子反常霍尔效应等的理想载体. 这些新兴材料可能对新一代拓扑电子器件产生变革性升级, 在信息传感、信息传输、逻辑运算、高密度存储、量子计算等方面具有巨大的应用潜力, 为前沿学科交叉提供了重要的契机.

我国在拓扑物理及拓扑材料方面的研究一直处于国际领先地位, 为这一新兴学科的发展做出了重要的贡献, 并保持着迅猛的发展趋势. 我国学者率先实现了基于磁性拓扑绝缘体的量子反常霍尔效应, 提出并实现了外尔半金属材料 and 磁性外尔半金属. 该领域接下来的核心问题是基于发现的各种拓扑材料实现更多新奇的拓扑量子效应, 并探索这些效应在自旋电子学中的应用, 推动拓扑自旋电子学的发展.

(3) 二维磁性材料

随着高密度存储和高速信息处理的纵深发展, 一方面原有基于外加磁场的自旋调控和器件设计的思路不断受到挑战, 另一方面二维体系中不断涌现的新奇物性给新型自旋电子学器件的研发带来了新的机遇. 二维磁性材料因其超薄层厚、表面洁净无悬挂键、可旋转堆垛, 以及独特的电子输运和自旋性质, 成为研究自旋态调控、界面耦合效应和强关联效应的良好载体, 可以为新一代高速、低功耗自旋信息技术提供材料支撑.

近年来, 一系列二维层状磁有序材料, 比如 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 、三卤化铬家族等被陆续发现^[47,48], 掀起了人们对二维极限下的磁性的研究热潮^[49,50]. 理论和实验表明, 二维材料中面内和层间的磁交换作用在层间的堆叠方式、应力、表面原子重构等因素的影响下, 能产生丰富的现象和可调控特性. 单层的 Fe_3GeTe_2 在低温下仍具有铁磁长程序以及面外磁各向异性, 通过插层锂离子提高 Fe_3GeTe_2 薄层的电子浓度, 可使其铁磁转变温度提高到室温以上^[51]. 此外二维磁性材料在自旋阀器件中取得了快速发展, 如在 CrI_3 自旋阀中观测到了巨大的磁阻效应^[52]. 最近, 科学家在二维磁性材料中也

观测到了磁斯格明子^[53].

(4) 自旋超导

自旋超导态是由电荷为零自旋非零的波色子在低温时凝聚成的超流态^[54-56]. 人们已推导出自旋超导的类伦敦方程和类金兹堡-朗道方程, 也给出了BCS型哈密顿量. 此外, 人们也已发现这些超导体的一些有趣现象, 包括零自旋阻现象, 即自旋流可以无耗散的流过自旋超导体; 电迈斯纳效应, 即自旋超导体有抗外电场空间变化量的特性; 在自旋超导弱耦合结中, 有直流和交流自旋流约瑟夫森效应等. 在低温时, 很多体系可能是自旋超导体, 如铁磁(或者强磁场下)石墨烯、一些三维铁磁体系、由自旋子或磁子构成的体系、氦超流态、磁性冷原子的玻色-爱因斯坦凝聚体等. 在自旋电子学实际应用中的一个主要问题是自旋流不守恒, 即沿着流的方向自旋流会逐渐衰减. 如果利用自旋超导做自旋流的载体, 将很好解决自旋流衰减问题.

自旋超导态是一个新兴的充满活力的前沿方向, 其研究不仅对基础科学具有重大意义, 同时也能推动基于自旋超导的新原理信息器件的应用研究, 因此已成为国际物质科学领域中广受关注的重要前沿领域之一. 最近科学家已经在石墨烯和反铁磁材料中观测到自旋超导的实验证据^[57-59].

(5) 磁性半导体材料

半导体自旋电子学的目标是研发出高性能、低功耗的半导体自旋电子器件, 在信息处理、存储和传输方面和传统半导体器件互补甚至实现替代. 利用电学或光学等手段高效地操控和探测电子自旋是这些应用的基础. 当前磁性半导体的典型获取方法是在已有的半导体材料中(比如TiO₂, GaAs, InAs, Si)掺杂磁性离子, 这种方法获得的磁性半导体材料和半导体工艺匹配得很好. 然而这种掺杂的磁性半导体材料的居里温度一般都不高, 例如, 研究最多的(Ga, Mn)As的居里温度可达到200 K, 是迄今为止的世界最高纪录^[60], 但远不能满足应用的需求. 其他的铁磁半导体材料也取得了进展, 如Li(Zn, Mn)As作为基于I-II-V半导体的稀磁材料^[61]. 如何保持半导体性质的同时提高居里温度和其他磁学性质成为当前研究的难点问题. 另外, 近年来人们在新型磁性半导体器件领域进行了多方面的探索工作, 取得了一定的进展. 这也是半导体自旋电子学发展的重要趋势, 因其潜在的应用价值成为当前国际研究的前沿.

(6) 磁性氧化物材料

以磁性氧化物为代表的关联电子体系中存在自旋、轨道、电荷、晶格等多自由度的关联与耦合, 表现出了丰富的物理现象和复杂的磁电相图. 磁性氧化物在自旋电子学应用的一个比较突出的前景是利用其磁学性质可以被电场和磁场有效调控的优势^[62], 结合已有的如磁性隧道结和自旋轨道矩等自旋器件, 发展出高性能的存储、逻辑等自旋器件.

磁性氧化物材料的制备技术和方法在21世纪得到快速的发展, 通过氧化物分子束外延和脉冲激光沉积等方法已经可以获得大面积、高质量的氧化物薄膜和多层膜. 虽然近年来在与半导体工艺和材料相结合方面取得了一定的进展^[63], 但是磁性氧化物材料制备质量还有待进一步提高. 虽然一些原型器件在实验室得到了验证^[64], 但是这类体系用电场或磁场进行调控的效率都较低, 在实际的器件应用中还有待提高.

3.3 自旋探测技术

人们对自旋的认识以及掌控能力的提高促进了自旋探测技术等相关交叉领域的快速发展, 可以突破信息和物质科学技术的经典极限, 在特殊环境下实现高空间分辨、高时间分辨与高灵敏度探测. 自旋显微技术是自旋探测技术的一个重要组成部分, 包括磁光克尔显微镜^[65]、光发射电子显微镜^[66]、洛仑兹透射电镜^[67]、自旋极化扫描隧道显微镜^[68]、核磁共振技术^[69]等; 自旋动力学研究需要发展高时间分辨率的超快探测技术^[70], 从能带结构和元素分辨等方面^[71]探测自旋性质等. 发展在极端条件下具有高空间、时间、元素及能级分辨的磁性表征技术, 是探索新型自旋材料及其物理效应的重要手段和途径, 能有效调控不同能量之间的竞争, 诱导新物态、产生新现象和新物理, 将对自旋电子学的发展具有重要的推动作用.

4 未来5-10年自旋电子学研究的发展目标及重点发展方向

4.1 发展目标

经过大会报告、发言和研讨, 与会专家针对未来信息时代的自旋器件、新型自旋材料及潜在应用、自旋相关技术研究中的关键基础科学问题, 展开了热烈的讨论, 凝练出了焦点问题和亟需解决的关键科学问

题. 未来5–10年自旋电子学研究的发展目标是在自旋电子学材料和自旋电子学物理等基础研究中取得突破性进展, 并大力推动自旋轨道矩、磁斯格明子、反铁磁等器件的快速发展, 促使其在未来信息技术中得到广泛应用.

4.2 重点发展方向

(1) 自旋轨道矩器件

自旋轨道矩器件中的新型磁、自旋轨道矩材料、自旋轨道矩新机制、新型多功能器件的设计, 以及大规模集成方法等; 实现高存储密度和快时间写入的自旋轨道矩信息器件.

(2) 磁斯格明子的操控与器件

虽然在磁斯格明子的人工操控方面的研究已经取得了很大的进展, 但是对单个磁斯格明子的精准产生、运动、擦除和探测还有待深入研究. 基于磁斯格明子的自旋器件在理论上提出了多种方案, 现在需要把各种功能集成起来实现完整的器件功能.

(3) 新概念器件

新概念自旋器件的研究目标是突破传统器件在能耗、速度、功能上的受限, 实现具有应用前景的信息处理器件和信息处理新范式. 自旋波器件、反铁磁自旋器件、自旋类脑器件在这三方面都具有很广阔的发展前景, 其中自旋波器件可实现低能耗器件, 反铁磁器件具有速度高的特点, 而自旋类脑器件可在信息处理范式上实现突破.

(4) 分子基自旋材料

分子基自旋材料的设计理论与方法、新概念材料、分子尺度操控自旋的技术, 以及有机、有机-无机杂化自旋电子材料的设计与应用. 从化学的角度, 通过自下而上设计分子基自旋材料, 实现材料的可控制备、自旋电子器件的高集成度, 以及分子尺度上自旋的电场控制等目标.

(5) 磁性拓扑材料

磁性与拓扑结合的新兴材料有望对新一代拓朴电子器件产生变革性升级, 在信息传感、信息传输、逻辑运算、高密度存储、量子计算等方面具有巨大的应用潜力. 该领域的重点方向包括磁性拓朴材料新体系的理论和实验研究; 磁性拓朴材料低维薄膜及器件物理研究; 拓朴自旋电子学新兴方向的快速发展, 促进下一代自旋电子学器件和技术的诞生.

(6) 二维磁性材料

二维磁性材料中的高居里温度材料及其异质结的材料、物性、表征, 以及多场调控和器件研究. 该方向中的重要前沿包括合成制备可在室温以上的大气环境中保持稳定磁性的大面积单晶二维材料; 设计和构造新型二维磁性材料, 使其具有新奇的物理特性, 比如二维半金属, 室温量子反常霍尔绝缘体等; 二维磁性材料与多铁、超导等强关联体系的耦合调控, 实现新奇的量子效应; 利用二维磁性材料的奇异特性, 设计新型自旋器件.

(7) 自旋超导材料和物性

自旋超导态的研究不仅对基础科学具有重要意义, 同时也能推动基于自旋超导的新原理信息器件的应用研究. 主要的研究前沿方向包括自旋超导态的材料理论设计和制备; 自旋超导态的物理特性研究以及自旋超导的表征; 自旋超导态的多场调控; 自旋超导态的新型器件设计等.

(8) 半导体自旋电子学和磁性氧化物自旋电子学

发展高居里温度的磁性半导体材料制备和磁性氧化物性质的高效多场调控. 提高磁性半导体居里温度是半导体自旋电子器件应用的重要前提条件. 磁性氧化物的性质可以通过多种物理场很好的调控, 但是目前调控仍需要高电压大磁场等. 因此, 实现对磁性的高效调控是未来应用的基础.

(9) 自旋探测技术

发展在极端条件下具有高空间、时间、元素及能级分辨的磁性表征技术, 比如, 自旋显微实验技术, 包括磁光克尔显微镜、光发射电子显微镜、洛伦兹透射电镜、自旋极化扫描隧道显微镜、核磁共振技术等; 自旋动力学研究需要发展高时间分辨率的超快探测技术; 从能带结构和元素分辨等方面探测自旋性质等.

5 结语

自旋电子学的研究有可能对未来信息技术产生革命性的变化. 面向下一代信息技术的自旋电子学研究一定能为我国未来信息领域的发展并实现换道超车提供极佳机遇. 虽然我国错过了20世纪90年代自旋电子学第一次大发展时期, 但是进入21世纪后, 特别是最近十年, 我国在自旋电子学领域的研究已经逐渐实现

与国际先进水平并跑. 当前, 自旋电子学的发展出现与其他学科深度交叉的趋势, 可能正处于革命性突破的前夜, 因此聚集物理、化学、材料科学和工程、信息

科学技术等多学科的力量, 针对自旋电子学研究中的核心关键难点问题进行跨学科合作, 协同攻关, 促进我国未来信息时代自旋电子学领域的持续发展.

参考文献

- 1 Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys Rev Lett*, 1998, 61: 2472–2475
- 2 Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys Rev B*, 1989, 39: 4828–4830
- 3 Fert A. Nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics. *Rev Mod Phys*, 2008, 80: 1517–1530
- 4 Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, et al. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO(100) tunnel barriers. *Nat Mater*, 2004, 3: 862–867
- 5 Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nat Mater*, 2004, 3: 868–871
- 6 Ralph D C, Stiles M D. Spin transfer torques. *J Magn Magn Mater*, 2008, 320: 1190–1216, arXiv: 0711.4608
- 7 Sinova J, Valenzuela S O, Wunderlich J, et al. Spin Hall effects. *Rev Mod Phys*, 2015, 87: 1213–1260, arXiv: 1411.3249
- 8 Miron I M, Garello K, Gaudin G, et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. *Nature*, 2011, 476: 189–193
- 9 Liu L, Pai C F, Li Y, et al. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of tantalum. *Science*, 2012, 336: 555–558, arXiv: 1203.2875
- 10 Manchon A, Železný J, Miron I, et al. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems. *Rev Mod Phys*, 2019, 91: 035004, arXiv: 1801.09636
- 11 Han W, Otani Y C, Maekawa S. Quantum materials for spin and charge conversion. *npj Quant Mater*, 2018, 3: 27, arXiv: 1805.08474
- 12 Mellnik A R, Lee J S, Richardella A, et al. Spin-transfer torque generated by a topological insulator. *Nature*, 2014, 511: 449–451, arXiv: 1402.1124
- 13 Yu G Q, Upadhyaya P, Fan Y B, et al. Switching of perpendicular magnetization by spin-orbit torques in the absence of external magnetic fields. *Nat Nanotech*, 2014, 9: 548–554, arXiv: 1311.0929
- 14 Zheng Z Y, Zhang Y, Lopez-Dominguez V, et al. Field-free spin-orbit torque-induced switching of perpendicular magnetization in a ferrimagnetic layer with a vertical composition gradient. *Nat Commun*, 2021, 12: 4555, arXiv: 2101.08518
- 15 Baek S H C, Amin V P, Oh Y W, et al. Spin currents and spin-orbit torques in ferromagnetic trilayers. *Nat Mater*, 2018, 17: 509–513, arXiv: 1708.06864
- 16 Fert A, Cros V, Sampaio J. Skyrmions on the track. *Nat Nanotech*, 2013, 8: 152–156
- 17 Nagaosa N, Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nat Nanotech*, 2013, 8: 899–911
- 18 Jiang W J, Chen G, Liu K, et al. Skyrmions in magnetic multilayers. *Phys Rep*, 2017, 704: 1–49, arXiv: 1706.08295
- 19 Jonietz F, Mühlbauer S, Pfleiderer C, et al. Spin transfer torques in MnSi at ultralow current densities. *Science*, 2010, 330: 1648–1651, arXiv: 1012.3496
- 20 Yu X, Mostovoy M, Tokunaga Y, et al. Magnetic stripes and skyrmions with helicity reversals. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 8856–8860
- 21 Kurumaji T, Nakajima T, Hirschberger M, et al. Skyrmion lattice with a giant topological Hall effect in a frustrated triangular-lattice magnet. *Science*, 2019, 365: 914–918, arXiv: 1805.10719
- 22 Litzius K, Lemesch I, Krüger B, et al. Skyrmion Hall effect revealed by direct time-resolved X-ray microscopy. *Nat Phys*, 2017, 13: 170–175, arXiv: 1608.07216
- 23 Chen X Z, Zhou X F, Cheng R, et al. Electric field control of Néel spin-orbit torque in an antiferromagnet. *Nat Mater*, 2019, 18: 931–935
- 24 Olejník K, Seifert T, Kašpar Z, et al. Terahertz electrical writing speed in an antiferromagnetic memory. *Sci Adv*, 2018, 4: eaar3566, arXiv: 1711.08444
- 25 Wang Y, Zhu D P, Yang Y M, et al. Magnetization switching by magnon-mediated spin torque through an antiferromagnetic insulator. *Science*, 2019, 366: 1125–1128

- 26 Han J H, Zhang P X, Hou J T, et al. Mutual control of coherent spin waves and magnetic domain walls in a magnonic device. *Science*, 2019, 366: 1121–1125
- 27 Vaidya P, Morley S A, van Tol J, et al. Subterahertz spin pumping from an insulating antiferromagnet. *Science*, 2020, 368: 160–165, arXiv: [2005.01203](#)
- 28 Hu C M. The 2020 roadmap for spin cavitronics. *Solid State Phys*, 2020, 71: 117–121
- 29 Torreon J, Riou M, Araujo F A, et al. Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators. *Nature*, 2017, 547: 428–431
- 30 Chumak A V, Vasyuchka V I, Serga A A, et al. Magnon spintronics. *Nat Phys*, 2015, 11: 453–461
- 31 Yu H M, Xiao J, Schultheiss H. Magnetic texture based magnonics. *Phys Rep*, 2021, 905: 1–59, arXiv: [2010.09180](#)
- 32 Dediu V, Murgia M, Maticotta F C, et al. Room temperature spin polarized injection in organic semiconductor. *Solid State Commun*, 2002, 122: 181–184
- 33 Xiong Z H, Wu D, Vally Vardeny Z, et al. Giant magnetoresistance in organic spin-valves. *Nature*, 2004, 427: 821–824
- 34 Sun D, van Schooten K J, Kavand M, et al. Inverse spin Hall effect from pulsed spin current in organic semiconductors with tunable spin-orbit coupling. *Nat Mater*, 2016, 15: 863–869, arXiv: [1511.07848](#)
- 35 Liu H L, Zhang C, Malissa H, et al. Organic-based magnon spintronics. *Nat Mater*, 2018, 17: 308–312
- 36 Shang R, Sun X, Wang Z M, et al. Zinc-diluted magnetic metal formate perovskites: Synthesis, structures, and magnetism of $[\text{CH}_3\text{NH}_3][\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}(\text{HCOO})_3](x=0-1)$. *Chem Asian J*, 2012, 7: 1697–1707
- 37 Tian Y, Wang W, Chai Y S, et al. Quantum tunneling of magnetization in a metal-organic framework. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 017202
- 38 Pan D S, Li Y, Han Z, et al. Organic-inorganic hybrid $(\beta\text{-Fe}_3\text{Se}_4)_4[\text{Fe}(\text{teta})_{1.5}]$ (teta=triethylenetetramine) nanoplates: Solution synthesis and magnetic properties. *Chem Mater*, 2018, 30: 8975–8982
- 39 Li F, Ding J F, Yu W L, et al. Light-enhanced spin diffusion in hybrid perovskite thin films and single crystals. *ACS Appl Mater Interface*, 2020, 12: 3205–3213
- 40 Yang Y G, Feng S L, Li Z H, et al. Unexpected outstanding room temperature spin transport verified in organic-inorganic hybrid perovskite film. *J Phys Chem Lett*, 2019, 10: 4422–4428
- 41 Perlepe P, Oyarzabal I, Mailman A, et al. Metal-organic magnets with large coercivity and ordering temperatures up to 242°C. *Science*, 2020, 370: 587–592
- 42 Li D, Wang X, Lin Z Z, et al. Tuning charge carrier and spin transport properties via structural modification of polymer semiconductors. *ACS Appl Mater Interface*, 2019, 11: 30089–30097
- 43 Yang W T, Shi Q, Miao T, et al. Achieving large and nonvolatile tunable magnetoresistance in organic spin valves using electronic phase separated manganites. *Nat Commun*, 2019, 10: 3877
- 44 Hasan M Z, Chang G, Belopolski I, et al. Weyl, Dirac and high-fold chiral fermions in topological quantum matter. *Nat Rev Mater*, 2021, 6: 784–803
- 45 Liu E, Sun Y, Kumar N, et al. Giant anomalous Hall effect in a ferromagnetic kagome-lattice semimetal. *Nat Phys*, 2018, 14: 1125–1131, arXiv: [1712.06722](#)
- 46 Tokura Y, Yasuda K, Tsukazaki A. Magnetic topological insulators. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 126–143
- 47 Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, et al. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature*, 2017, 546: 270–273, arXiv: [1703.05892](#)
- 48 Gong C, Li L, Li Z L, et al. Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals. *Nature*, 2017, 546: 265–269, arXiv: [1703.05753](#)
- 49 Gong C, Zhang X. Two-dimensional magnetic crystals and emergent heterostructure devices. *Science*, 2019, 363: eaav4450
- 50 Gibertini M, Koperski M, Morpurgo A F, et al. Magnetic 2D materials and heterostructures. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14: 408–419, arXiv: [1910.03425](#)
- 51 Deng Y J, Yu Y J, Song Y C, et al. Gate-tunable room-temperature ferromagnetism in two-dimensional Fe_3GeTe_2 . *Nature*, 2018, 563: 94–99, arXiv: [1803.02038](#)
- 52 Song T C, Cai X H, Tu M W Y, et al. Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures. *Science*, 2018, 360: 1214–1218, arXiv: [1801.08679](#)
- 53 Ding B, Li Z F, Xu G Z, et al. Observation of magnetic Skyrmion bubbles in a van der Waals ferromagnet Fe_3GeTe_2 . *Nano Lett*, 2020, 20: 868–

- 873, arXiv: [1912.11228](#)
- 54 Sun Q F, Jiang Z T, Yu Y, et al. Spin superconductor in ferromagnetic graphene. *Phys Rev B*, 2011, 84: 214501, arXiv: [1012.4528](#)
- 55 Bao Z Q, Xie X C, Sun Q F. Ginzburg-Landau-type theory of spin superconductivity. *Nat Commun*, 2013, 4: 2951
- 56 Takei S, Tserkovnyak Y. Superfluid spin transport through easy-plane ferromagnetic insulators. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 227201, arXiv: [1311.0288](#)
- 57 Yuan W, Zhu Q, Su T, et al. Experimental signatures of spin superfluid ground state in canted antiferromagnet Cr₂O₃ via nonlocal spin transport. *Sci Adv*, 2018, 4: eaat1098, arXiv: [1804.07966](#)
- 58 Stepanov P, Che S, Shcherbakov D, et al. Long-distance spin transport through a graphene quantum Hall antiferromagnet. *Nat Phys*, 2018, 14: 907–911, arXiv: [1801.07290](#)
- 59 Han W, Maekawa S, Xie X C. Spin current as a probe of quantum materials. *Nat Mater*, 2020, 19: 139–152
- 60 Chen L, Yang X, Yang F H, et al. Enhancing the Curie temperature of ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As to 200 K via nanostructure engineering. *Nano Lett*, 2011, 11: 2584–2589
- 61 Deng Z, Jin C Q, Liu Q Q, et al. Li(Zn,Mn)As as a new generation ferromagnet based on a I-II-V semiconductor. *Nat Commun*, 2011, 2: 422
- 62 Schlom D G, Chen L Q, Pan X, et al. A thin film approach to engineering functionality into oxides. *J Am Ceramic Soc*, 2008, 91: 2429–2454
- 63 Cai K, Yang M, Ju H, et al. Electric field control of deterministic current-induced magnetization switching in a hybrid ferromagnetic/ferroelectric structure. *Nat Mater*, 2017, 16: 712–716, arXiv: [1604.05561](#)
- 64 Shi Q, Jiang F X, Yu Y, et al. An electric-field-controlled high-speed coexisting multibit memory and boolean logic operations in manganite nanowire via local gating. *Adv Electron Mater*, 2019, 5: 1900020
- 65 Kim D, Oh Y W, Kim J U, et al. Extreme anti-reflection enhanced magneto-optic Kerr effect microscopy. *Nat Commun*, 2020, 11: 5937, arXiv: [1909.13275](#)
- 66 Guo H, Strelcov E, Yulaev A, et al. Enabling photoemission electron microscopy in liquids via graphene-capped microchannel arrays. *Nano Lett*, 2017, 17: 1034–1041, arXiv: [1611.07639](#)
- 67 Zhang S F, Zhang J W, Wen Y, et al. Deformation of Néel-type skyrmions revealed by Lorentz transmission electron microscopy. *Appl Phys Lett*, 2020, 116: 142402
- 68 Haze M, Yang H H, Asakawa K, et al. Bulk ferromagnetic tips for spin-polarized scanning tunneling microscopy. *Rev Sci Instrum*, 2019, 90: 013704
- 69 Smits J, Damron J T, Kehayias P, et al. Two-dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy with a microfluidic diamond quantum sensor. *Sci Adv*, 2019, 5: eaaw7895, arXiv: [1901.02952](#)
- 70 McCormick E J, Newburger M J, Luo Y K, et al. Imaging spin dynamics in monolayer WS₂ by time-resolved Kerr rotation microscopy. *2D Mater*, 2017, 5: 011010
- 71 Klewe C, Li Q, Yang M M, et al. Element- and time-resolved measurements of spin dynamics using X-ray detected ferromagnetic resonance. *Synchrotron Radiat News*, 2020, 33: 12–19

Coming of the age with spintronics-based future information

HAN Wei¹, WU Di², LUO Feng³, WU XiaoJun⁴, XIAO Jiang⁵, LIU EnKe⁶,
CHENG ZhiGang^{6,7} & DAI YaFei^{7*}

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

² School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

³ School of Materials Sciences and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

⁴ School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁵ Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China;

⁶ Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁷ Department of Interdisciplinary Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

With the miniaturization of electronic devices approaching the physical limit, new electronic devices in the post-Moore Era have attracted tremendous attention. The intrinsic characteristics of electron spin should be considered as a path to achieve much higher efficiency in information storage, transmission, and processing in order to break or bypass the thermal and quantum barriers of traditional devices. Therefore, spintronics is one of the important cornerstones for developing information technology in future. This review is summarized based on the presentations and discussions at the 285th “Shuangqing Forum” organized by the National Natural Science Foundation of China (NSFC). It discusses major issues and challenges in spintronics research and the prospective of next-generation techniques of information storage and computations. Important progress and achievements are highlighted, and key scientific questions and promising areas are suggested for NSFC to fund in the next 5–10 years.

spintronics, spin information technology, spintronics materials, spin sensing, fundamental research

PACS: 85.75.-d, 85.75.Hh, 85.75.Mm, 71.70.Ej, 75.70.Tj

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0002](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0002)