

二维材料的磁性研究*

孙媛媛^{1,†} 潘洪哲¹ 汤怒江^{2,††}

(1 临沂大学物理与电子工程学院 临沂 276000)

(2 南京大学物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

2021-06-27 收到

† email: sunyuanyuan@lyu.edu.cn

†† email: tangnujiang@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211204

The magnetism of two-dimensional materials

SUN Yuan-Yuan^{1,†} PAN Hong-Zhe¹ TANG Nu-Jiang^{2,††}

(1 School of Physics and Electronic Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China)

(2 National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

摘要 二维材料在自旋电子学器件中具有良好的应用潜力, 高磁化强度、室温铁磁性二维材料的制备与研究, 成为近年来自旋电子学领域的研究热点。文章简要回顾了二维材料磁性研究的背景, 主要介绍了几种具有代表性的二维材料磁性研究的现状, 并对二维材料的磁性研究进行了展望。

关键词 二维材料, 石墨烯, 石墨炔, 二维硼碳氮化合物, 磷烯

Abstract Magnetic two-dimensional(2D) materials are promising resources for spintronics, and room-temperature ferromagnetic 2D materials with high magnetization have attracted great attention. In this article we review the research field of the magnetism of 2D materials, introduce some representative 2D materials and their magnetic properties, and also assess the prospects for future research.

Keywords two-dimensional materials, graphene, graphdiyne, two-dimensional $B_xC_yN_z$ compounds, phosphorene

1 二维材料磁性研究的意义与现状

自旋电子学利用电子的自旋进行信息的传输和存储, 自旋电子学器件使用的磁性材料需具有高的自旋极化率、长的自旋弛豫时间和自旋扩散长度。传统稀磁半导体材料的居里温度往往低于室温, 很难在自旋电子学器件中进行实际应用^[1]。探寻新型磁性半导体材料成为自旋电子学发展的关键, 其中二维磁性半导体材料的研究与制备是近年来自旋电子学领域研究的热点。Mermin—Wagner 理论曾预言, 二维材料中的自旋由于热

扰动效应不能耦合产生磁有序^[2]。然而, 二维材料中的强磁各向异性可抑制热扰动效应, 产生长程磁耦合作用, 从而形成稳定的磁有序^[3]。目前已有文献报道, 在二维材料中探测到了磁有序, 且具有长的自旋弛豫时间和自旋扩散长度, 是可用于自旋电子学器件的优良材料^[4-9]。

目前实验上发现的二维材料主要有两大类: 由轻质元素构成的二维材料和二维过渡金属化合物。轻质元素构成的二维材料有石墨烯、石墨炔、氮化硼、磷烯等, 由于自旋轨道耦合作用相对较弱, 通常具有长的自旋弛豫时间和自旋扩散长度, 便于自旋的调控和输运。二维过渡金属化合物, 包括过渡金属碳化物、氮化物、硫族化合

* 山东省自然科学基金(批准号: ZR2020MA074, ZR2019MA042)资助项目

物、卤族化合物等。二维过渡金属化合物具有强的自旋轨道耦合作用，可产生大的磁各向异性能和能带劈裂来抑制热扰动效应从而维持长程磁耦合作用。二维材料在自旋电子学领域具有良好的应用潜力，由于多数二维材料本征不具有磁性，如何在其中诱导产生具有高磁化强度的室温铁磁性是其可应用于自旋电子学器件的关键。因此，具有高磁化强度、室温铁磁性二维材料的制备与研究，对于自旋电子学的发展具有重要的意义。本文将对几种具有代表性的二维材料磁性研究的现状进行总结与分析。

2 常见二维材料及其诱导磁性

2.1 石墨烯

石墨烯(graphene)是最先被剥离获得的二维材料，由碳原子以 sp^2 杂化形成六角型蜂窝状晶格(图1(a))^[10]，由于自旋轨道耦合作用及超精细相互作用较弱，而具有长的自旋弛豫时间和自旋扩散长度便于自旋的调控，在自旋电子学领域有良好的应用潜力。

本征石墨烯为抗磁性零带隙半导体，如何打开带隙、引入自旋，进而耦合产生磁有序，是其

可应用于自旋电子学器件的关键。根据Lieb理论，由A、B两套子晶格构成的石墨烯中，相邻两碳原子的 p_z 轨道电子自旋取向相反，当两套子晶格碳原子 p_z 轨道电子自旋不匹配时便会产生净自旋^[13]。石墨烯中的空位、掺杂、吸附、锯齿型边界等，可导致自旋的不匹配而引入磁矩，甚至可通过RKKY相互作用耦合产生磁有序^[14-17]。目前实验上在石墨烯中已探测到，氢吸附会引入局域磁矩(图1(b))^[11]，氮掺杂可诱导产生铁磁性(图1(c))^[12]，锯齿型边界石墨烯纳米带的边界自旋能耦合产生磁有序(图1(d))^[4]等。尽管关于石墨烯诱导磁性已有大量的研究报道，目前仅在其中探测到顺磁性或较弱的铁磁性，不能在自旋电子学器件中进行实际应用。如何在石墨烯中诱导产生可应用的室温强铁磁性，还有待进一步的研究。

2.2 石墨炔

石墨炔(graphdiyne)，由李玉良院士课题组于2010年率先合成获得^[18]，是碳原子以 sp 和 sp^2 杂化形成的具有大 π 共轭体系和孔洞结构的新型二维碳材料(图2(a))^[19]。与石墨烯相似，石墨炔由 s 、 p 电子构成的体系具有长的自旋弛豫时间和自旋

扩散长度，可适用于自旋电子学领域^[20]。

石墨炔六角形结构中的碳原子为 sp^2 杂化，链上的碳碳三键原子为 sp 杂化。尽管本征石墨炔不具有磁性，但其碳碳三键结构易于吸附异质原子可引入磁矩^[23-25]。我们在对石墨炔的研究中发现，制备态及退火石墨炔在低温2 K下表现为顺磁性(图2(b))^[21]，其磁源为键合在碳链上的羟基，当羟基比例增加后会表现出反铁磁性^[21, 26]。中国科学院黄长水研究员对掺杂石墨炔的磁性进行了研究，氮掺杂可使顺磁性石墨炔的磁化强度增大一倍^[19]；

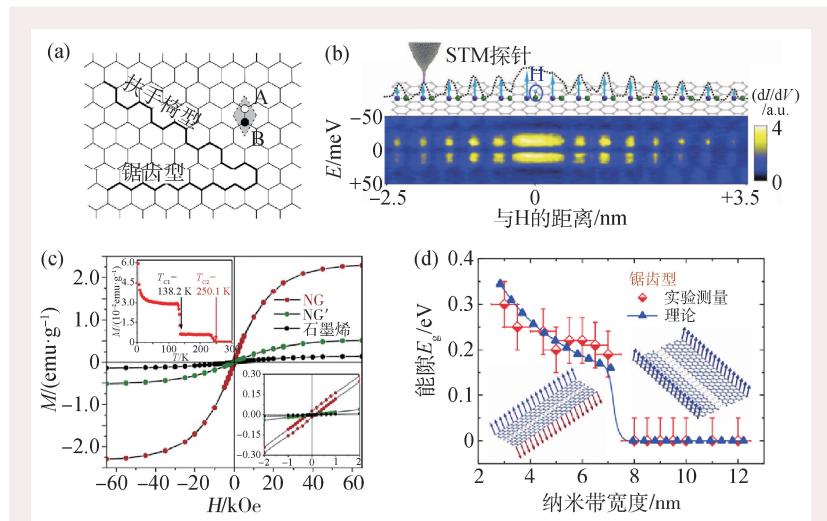


图1 (a)石墨烯晶格图^[10]；(b)石墨烯表面吸附氢原子诱导磁矩分布图^[11]；(c)氮掺杂石墨烯NG和NG'在2 K时磁化强度随外加磁场强度的变化关系，左上角插图为磁化强度随温度的变化关系，右下角插图为磁滞回线^[12]；(d)锯齿型边界石墨烯纳米带的边界自旋耦合作用随纳米带宽度的变化关系^[4]

三价铁离子掺杂能够在石墨炔中诱导产生室温铁磁性(图2(c))^[5]；硫掺杂石墨炔同样具有室温铁磁性(图2(d))^[22]。关于室温铁磁性石墨炔的制备及磁性研究，将推动其在自旋电子学器件中的实际应用，对于自旋电子学的发展具有重要意义。

2.3 二维硼碳氮化合物

二维硼碳氮化合物有 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 、 $g\text{-C}_4\text{N}_3$ 、 $h\text{-BN}$ 、 B_4CN_3 和 B_3CN_4 等，是由硼、碳、氮中的两种或三种元素构成的二维半导体材料，具有与石墨烯相类似的蜂巢晶格、 π 共轭体系，部分二维硼碳氮化合物含有孔洞结构。具有磁有序的二维硼碳氮化合物，在自旋电子学领域具有良好的应用前景。

石墨化碳氮化合物 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 是由碳、氮原子构成的二维半导体材料，具有类石墨烯的蜂巢晶格和孔洞结构。以 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 为基本单元构建二维材料可产生磁有序，例如笼目格(kagome)结构的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 具有铁磁性^[30]。在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 表面吸附异质元素也可诱导产生磁有序。在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 表面吸附氢可诱导产生铁磁或反铁磁性^[31]。2015年，中国科学技术大学吴长征教授课题组在边界键合氢的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 中探测到了室温铁磁性，并计算了其自旋密度分布，如图3(a)所示^[27]。同年，兰州大学薛德胜教授课题组研究发现，氟化后的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 铁磁性的居里温度可高达 700 K，图3(b)为 10 K 到 700 K 之间的磁滞回线^[28]。 $g\text{-C}_4\text{N}_3$ 是另一种石墨化的碳氮化合物，于 2010 年在实验上制备获得^[32]。理论计算表明 $g\text{-C}_4\text{N}_3$ 具有铁磁半金属特性^[33]，在自旋电子学领域同样可具有良好的应用价值，然而目前还没有关于其磁性的实验报道。

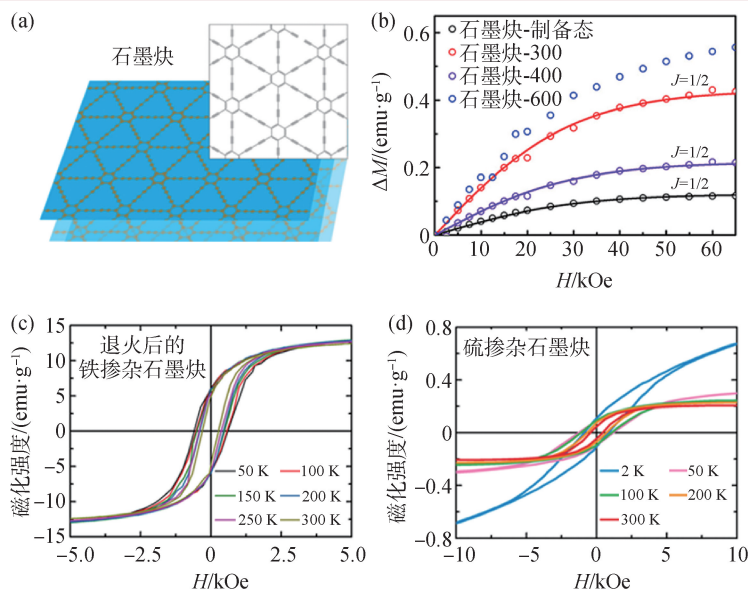


图2 (a)石墨炔结构图^[19]；(b)制备态及退火石墨炔的磁化强度随外加磁场的变化关系^[21]；(c)铁掺杂石墨炔在 50 K 至 300 K 的磁滞回线^[5]；(d)硫掺杂石墨炔在 2 K 至 300 K 的磁滞回线^[22]

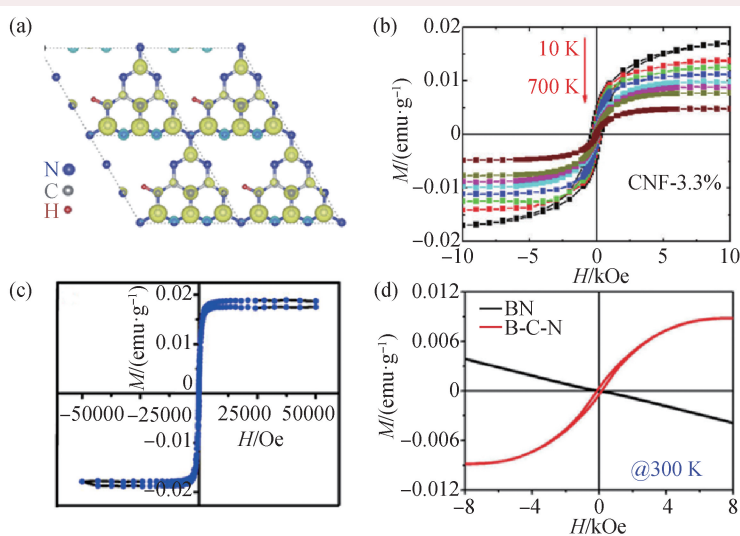


图3 (a)边界键合氢掺杂的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的自旋密度分布图^[27]；(b)氟掺杂浓度为 3.3% $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的磁滞回线^[28]；(c)氟化 h-BN 在 300 K 的磁滞回线^[29]；(d)碳掺杂 h-BN 在 300 K 的磁滞回线^[6]

二维六角氮化硼 $h\text{-BN}$ (又名白石墨烯)，是由硼、氮原子构成的二维六角蜂窝状类石墨烯结构。通过表面修饰或掺杂，可在 $h\text{-BN}$ 中引起硼、氮原子的 $2p$ 轨道自旋失配，进而诱导产生磁矩。2010年 Zhou 等人计算了表面吸附氢或氟的 $h\text{-BN}$ 的电子结构和磁性，发现氢或氟吸附均可在 $h\text{-BN}$ 中诱导产生磁有序^[34]。由于外加应力对二维材料

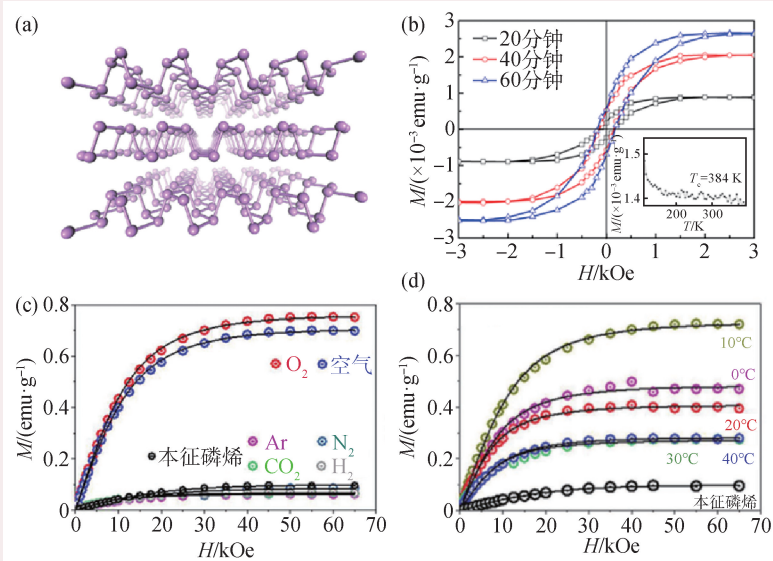


图4 (a)磷烯结构图^[38]; (b)不同氧化时间的磷烯在室温下的磁滞回线, 插图是氧化时间为30分钟磷烯的磁热关系曲线, 其室温磁有序的居里温度高达384 K^[41]; (c)磷烯在不同气氛中放置5小时后, 2 K下磁化强度随外加磁场的变化关系^[42]; (d)不同温度下的磷烯在空气中放置10小时后, 2 K下磁化曲线随外加磁场的变化关系^[42]

的结构会产生一定的影响, 可通过施加应力对二维材料的磁性进行调控。2011年山东大学戴瑛教授课题组报道了应力对半氟化 h-BN 磁性的影响, 提出通过调控外加应力可使其表现为铁磁或反铁磁性^[35]。2017年实验上制备获得了氟化 h-BN, 在室温下表现为铁磁性, 其磁滞回线如图3(c)所示^[29]。另外, 在 h-BN 中掺杂异质元素同样可诱导产生磁有序。比如, 在 h-BN 中掺杂碳元素, 碳占据硼或氮的位置均可引入磁矩^[36]。2014年, 中国科学院王恩哥院士课题组在碳掺杂 h-BN 中探测到室温铁磁性, 其磁滞回线如图3(d)所示^[6]。2016年, 我们对高浓度碳掺杂 h-BN 的电子结构进行了理论计算, 发现 B_4CN_3 和 B_3CN_4 两种结构均具有室温铁磁性, 其中 B_4CN_3 为双极磁性半导体, B_3CN_4 为自旋无带隙半导体, 在自旋电子学领域都具有良好的应用潜力^[37]。

2.4 磷烯

磷烯(BP)为单层黑磷, 每个磷原子与周围的三个磷呈 sp^3 杂化共价结合, 形成折叠的蜂窝状结构, 如图4(a)所示^[38]。体结构的黑磷是带隙在

0.31—0.35 eV 之间的半导体, 随着层数减少其带隙逐渐增加, 单层黑磷的带隙宽度可达 2 eV^[39]。磷烯在室温下具有长达纳秒的自旋弛豫时间, 适用于自旋电子器件中的自旋调控。2014年, 复旦大学的张远波教授课题组、荷兰的 Castellanos-Gomez 等人, 先后从实验上制备获得了少层黑磷^[38, 40]。

与石墨烯相类似, 本征磷烯不具有磁性, 通过掺杂、吸附、构造缺陷和边界可引入磁矩, 进而通过 RKKY 作用能够耦合产生磁有序。磷烯的锯齿型边界有未配对的自旋, 同侧边界呈铁磁性耦合, 相对的两边界之间呈反铁磁耦合^[43]。然而, 由于磷原子具有孤对电子, 在空气中容易被氧化

不易维持本征的锯齿型边界。尽管扶手椅型边界不能引入磁矩, 通过电荷掺杂同样可在扶手椅型边界的磷烯纳米带中诱导产生铁磁性^[44]。在磷烯表面吸附气体分子^[45]、掺杂金属和非金属原子^[46, 47], 均能有效引入磁矩。2016年吴兴龙教授课题组报道, 在氧化的磷烯中探测到室温铁磁性(图4(b)), 认为表面磷原子与空气中的氧成键后, 由磷、氧原子自旋极化的 p 电子贡献磁矩产生铁磁有序^[41]。2019年, 我们关于环境(气体氛围、温度、湿度、光照)对磷烯结构及磁性影响的研究发现, 各种环境因素下的磷烯均表现为顺磁性, 因此认为磁源为结构中被氧饱和的空位缺陷^[42]。由于磷烯的结构容易受环境的影响, 其磁性也会随之发生变化, 图4(c)和(d)分别反映了气氛和温度对磷烯磁性的影响^[42]。因此, 基于磷烯制备的自旋电子器件需要考虑环境因素的影响, 可通过表面覆盖等方法进行钝化处理。

2.5 二维过渡金属化合物

过渡金属层状化合物有: 过渡金属碳化物或氮化物、过渡金属硫族化合物、过渡金属卤族化

合物等，其层间为范德瓦耳斯力，可通过剥离获得二维过渡金属化合物。二维过渡金属化合物中过渡金属元素的 d/f 电子未配对自旋可作为磁源，较强的自旋轨道耦合作用产生大的磁晶各向异性能，使得自旋之间可发生长程磁耦合作用，其磁性结构能够稳定存在。因此，在二维过渡金属化合物中有望获得具有高磁化强度的室温铁磁性，二维过渡金属化合物的制备与磁性研究为近年来自旋电子学领域关注的热点。

二维过渡金属与碳元素、氮元素或碳氮构成的化合物统称为 $MXenes$ ，可构成 M_2X 、 M_3X_2 、 M_4X_3 (M 代表过渡金属元素， X 为碳、氮或碳氮) 等至少三种化学式结构。具有半金属特性的 $MXenes$ ，在室温下表现为磁有序时可用于自旋电子器件中的自旋选择过滤。理论研究预言了大量的磁性 $MXenes$ 材料可适用于自旋电子学领域。例如单层 MoN_2 是居里温度为 420 K 的铁磁性金属^[8]；单层 YN_2 为铁磁性半金属^[8]；单层 Fe_2C 为铁磁性金属，其居里温度高达 861 K^[51] 等。实验上，二维 $MXenes$ 的制备通常采用酸液剥离法，在 $MXenes$ 的表面通常会键合一些官能团 (H 、 OH 、 O 、 F 等)，往往形成表面官能化的 $MXenes$ 。Frey 等人关于 M_2NT_x 的研究提出，通过改变表面官能团和过渡金属可实现对自旋结构及其磁晶各向异性能的调控 (图 5 (a))^[48]。尽管理论研究预言了众多具有室温铁磁性的 $MXenes$ ，目前相关实验研究还相对较少，大量的理论研究还有待进一步的实验验证。2019 年我们在制备态的 $Ti_3C_2T_x$ 中探测到顺磁性，退火处理后表现为室温铁磁性，如图 5 (b) 所示^[49]。

二维过渡金属硫族化合物 (TMDs) 有 MoS_2 、 WS_2 、 $MoTe_2$ 、 VS_2 等，是由过渡金属原子 (M) 与硫族原子 (X) 构成的化学式为 MX_2 的二维材料，具有 $X-M-X$ 三明治夹层六角蜂巢状结构。二维

TMDs 具有高的电子迁移率和较长的自旋轨道散射长度，在自旋电子学领域具有应用潜力。本征二维 TMDs 不具有磁性，通过构造锯齿型边界、引入缺陷、掺杂异质元素等，可引入自旋、耦合产生磁有序^[52, 53]。实验上在 WS_2 和 MoS_2 纳米片中，已探测到弱的室温铁磁性，磁源被认为是材料中的缺陷或锯齿型边界^[54, 55]。另外，二维 TMDs 的层间范德瓦耳斯力对面内磁有序产生抑制作用。2018 年 Batzill 等人在单层 VSe_2 中探测到强的室温铁磁性，当其层数增多后磁性明显减弱，图 5(c) 为磁化强度和矫顽力随层数的变化关系^[9]。通过构造缺陷或边界来引入磁矩容易破坏材料结构的稳定性，相较而言，通过异质元素掺杂引入磁矩是增强磁性的更为可行的途径。2017 年，中国科学院魏钟鸣课题组制备获得了高质量的铁掺杂 SnS_2 ，铁元素掺杂使 SnS_2 成为具有垂直各向异性的铁磁性半导体^[56]。

二维过渡金属卤族化合物，由过渡金属原子 (M) 与卤族原子 (X) 构成，包含二维过渡金属二卤化物 (MX_2) 和三卤化物 (MX_3) 两种结构。单层过渡金属二卤化物 MX_2 中的过渡金属元素诱导产生磁

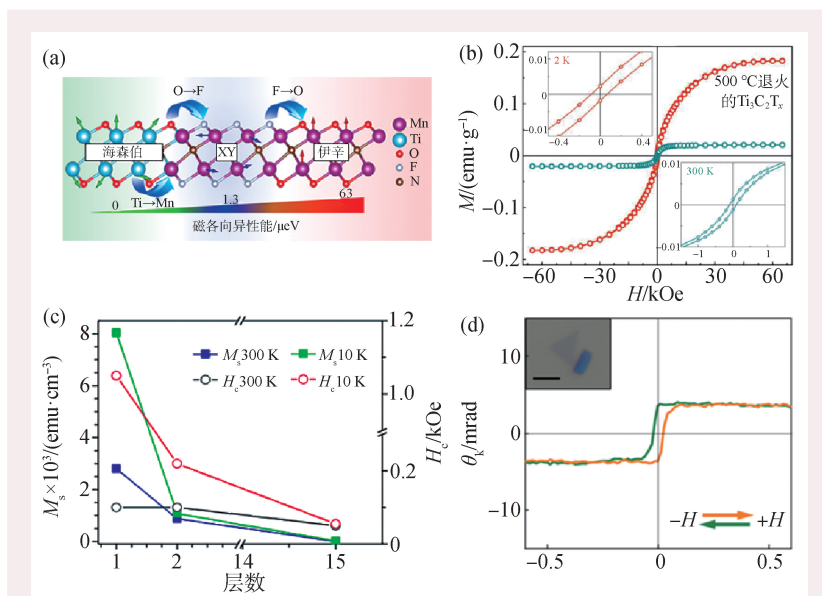


图5 (a)通过改变表面官能团和过渡金属，调控 $M_2NT_x-MXenes$ 的自旋结构及磁晶各向异性能^[48]；(b)铁磁性 $Ti_3C_2T_x-MXenes$ 的磁化强度随外加磁场的变化关系，其中插图分别为 2 K 及 300 K 下的磁滞回线，横纵坐标与大图一致^[49]；(c)二维 VSe_2 的铁磁性及其他饱和磁化强度和矫顽力随层厚的变化关系^[9]；(d)单层 CrI_3 的极化磁光克尔效应图，插图是单层 CrI_3 的光学图像^[50]

矩,通过最近邻反铁磁耦合与超交换铁磁耦合作用可产生磁有序,可通过加应力或空穴掺杂将其居里温度提高至室温^[57]。He等人关于二维过渡金属三卤化物 MX_3 电子结构的研究表明,单层 VCl_3 和 VI_3 为低温铁磁性半金属,通过载流子掺杂同样可将其居里温度提高至室温^[58]。另外,单层过渡金属三卤化物 CrX_3 具有大的磁晶各向异性,是可稳定存在的本征铁磁性半导体^[59]。实验上,华盛顿大学的许晓东教授在2017年利用磁光克尔效应技术探测到单层 CrI_3 为Ising铁磁体,其磁滞回线如图5(d)所示^[50]。然而,在二维材料的制备过程中,通常会引入一些空位缺陷对材料的磁性产生一定影响。尽管如此,东南大学王金兰教授关于含空位单层 CrI_3 的研究发现,I空位的存在不会破坏其铁磁性半导体特性,反而会使其磁性得到增强^[60]。

另外,还有一些基于范德瓦耳斯铁磁体剥离获得的二维过渡金属化合物,例如 $CrXTe_3$ ($X=Si, Ge$)、 $Cr_2Ge_2Te_6$ 、 Fe_3GeTe_2 等。这些二维过渡金属化合物包含磁性元素,同样可具有本征磁有序特

性,可成为适用于自旋电子学器件的优良材料,近年来也逐渐受到关注^[61-63]。

3 总结与展望

新型二维磁性半导体材料的可控制备与磁性调控,对于自旋电子学的发展具有重要的意义。理论预言了众多二维材料可适用于自旋电子学器件,实验上在一些二维材料中也探测到了磁有序。目前在二维材料中探测到室温磁有序的饱和磁化强度相对较弱,难以进行自旋的调控和输运,不能在自旋电子器件中进行实际应用。如何在二维材料中引入高浓度的自旋、耦合产生强的室温磁有序,是其应用于自旋电子学领域面临的挑战。目前关于二维材料磁性的实验研究还相对较少,大量的理论预言还有待进一步的验证。相信随着实验技术的发展和理论研究的深入,二维材料的磁性研究必将推动自旋电子学的发展,基于二维磁性材料的自旋电子学器件值得期待。

参考文献

- [1] MacDonald A H, Schiffer P, Samarth N. *Nat. Mater.*, 2005, 4: 195
- [2] Mermin N D, Wagner H. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, 17: 1133
- [3] Burch K S, Mandrus D, Park J G. *Nature*, 2018, 563: 47
- [4] Magda G Z, Jin X, Hagymasi I *et al.* *Nature*, 2014, 514: 608
- [5] Zhang M, Wang X, Sun H *et al.* *2D Mater.*, 2018, 5: 035039
- [6] Zhao C, Xu Z, Wang H *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24: 5985
- [7] Bhattacharyya G, Choudhuri I, Pathak B. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, 20: 22877
- [8] Wu F, Huang C, Wu H *et al.* *Nano Lett.*, 2015, 15: 8277
- [9] Bonilla M, Kolekar S, Ma Y *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2018, 13: 289
- [10] Yazyev O V. *Rep. Prog. Phys.*, 2010, 73: 056501
- [11] González-Herrero H, Gómez-Rodríguez J M, Mallet P *et al.* *Science*, 2016, 352: 437
- [12] Liu Y, Shen Y, Sun L *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7: 10921
- [13] Lieb E H. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62: 1201
- [14] Yazyev O V, Helm L. *Phys. Rev. B*, 2007, 75: 125408
- [15] Palacios J J, Fernández-Rossier J, Brey L. *Phys. Rev. B*, 2008, 77: 19428
- [16] Wu M, Liu E Z, Jiang J Z. *App. Phys. Lett.*, 2008, 93: 082504
- [17] Fernandez-Rossier J, Palacios J J. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99: 177204
- [18] Li G, Li Y, Liu H *et al.* *Chem. Comm.*, 2010, 46: 3256
- [19] Zhang M, Wang X, Sun H *et al.* *Sci. Rep.*, 2017, 7: 11535
- [20] Ge C, Chen J, Tang S *et al.* *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11: 2707
- [21] Zheng Y, Chen Y, Lin L *et al.* *App. Phys. Lett.*, 2017, 111: 033101
- [22] Zhang M, Sun H, Wang X *et al.* *J. Phys. Chem. C*, 2019, 123: 5010
- [23] Kang B, Liu H, Lee J Y. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, 16: 974
- [24] He J, Ma S Y, Zhou P *et al.* *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116: 26313
- [25] Chen X, Gao P, Guo L *et al.* *J. Phys. Chem. Solids*, 2017, 105: 61
- [26] Lin L, Pan H, Chen Y *et al.* *Carbon*, 2019, 143: 8
- [27] Xu K, Li X, Chen P *et al.* *Chem. Sci.*, 2015, 6: 283
- [28] Gao D, Liu Y, Song M *et al.* *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3: 12230
- [29] Radhakrishnan S, Das D, Samanta A *et al.* *Sci. Adv.*, 2017, 3: e1700842
- [30] Li X, Zhou J, Wang Q *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.*, 2012, 4: 259
- [31] Qiu H, Wang Z, Sheng X. *Physica B*, 2013, 421: 46

- [32] Lee J S, Wang X, Luo H *et al.* *Adv. Mater.*, 2010, 22: 1004
- [33] Du A, Sanvito S, Smith S C. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 197207
- [34] Zhou J, Wang Q, Sun Q *et al.* *Phys. Rev. B*, 2010, 81: 085442
- [35] Ma Y, Dai Y, Guo M *et al.* *Nanoscale*, 2011, 3: 2301
- [36] Wu R Q, Peng G W, Liu L *et al.* *J. Phys.: Condens. Matter*, 2006, 18: 569
- [37] Pan H, Sun Y, Zheng Y *et al.* *New J. Phys.*, 2016, 18: 093021
- [38] Li L, Yu Y, Ye G J *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9: 372
- [39] Tran V, Soklaski R, Liang Y *et al.* *Phys. Rev. B*, 2014, 89: 23529
- [40] Castellanos-Gomez A, Vicarelli L, Prada E *et al.* *2D Mater.*, 2014, 1: 025001
- [41] Gui Q F, Sun L L, Liu L Z *et al.* *App. Phys. Lett.*, 2016, 108: 091602
- [42] Chen J, Zhou Q, Pan H *et al.* *Small*, 2019, 15: e1804386
- [43] Zhu Z, Li C, Yu W *et al.* *App. Phys. Lett.*, 2014, 105: 113105
- [44] Farooq M U, Hashmi A, Hong J. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7: 14423
- [45] Cai Y, Ke Q, Zhang G *et al.* *J. Phys. Chem. C*, 2015, 119: 3102
- [46] Jiang X, Zhang X, Hua Z *et al.* *Phys. Lett. A*, 2019, 383: 2097
- [47] Khan I, Hong J. *New J. Phys.*, 2015, 17: 023056
- [48] Frey N C, Kumar H, Anasori B *et al.* *ACS Nano*, 2018, 12: 6319
- [49] Zhang K, Di M, Fu L *et al.* *Carbon*, 2020, 157: 90
- [50] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E *et al.* *Nature*, 2017, 546: 270
- [51] Yue Y. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, 434: 164
- [52] López-Urías F, Laura Elías A, Perea-López N *et al.* *2D Mater.*, 2014, 2: 015002
- [53] Ma Y, Dai Y, Guo M *et al.* *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, 13: 15546
- [54] Huo N, Li Y, Kang J *et al.* *App. Phys. Lett.*, 2014, 104: 202406
- [55] Yang Z, Gao D, Zhang J *et al.* *Nanoscale*, 2015, 7: 650
- [56] Li B, Xing T, Zhong M *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8: 1958
- [57] Kulish V V, Huang W. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5: 8734
- [58] He J, Ma S, Lyu P *et al.* *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4: 2518
- [59] Zhang W B, Qu Q, Zhu P *et al.* *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3: 12457
- [60] Zhao Y, Lin L, Zhou Q *et al.* *Nano Lett.*, 2018, 18: 2943
- [61] Gong C, Li L, Li Z *et al.* *Nature*, 2017, 546: 265
- [62] Deng Y, Yu Y, Song Y *et al.* *Nature*, 2018, 563: 94
- [63] Fei Z, Huang B, Malinowski P *et al.* *Nat. Mater.*, 2018, 17: 778

PHOTONIC SCIENCE

Leaders in advanced sCMOS detector and system technology for synchrotron and laboratory sources

www.photonicsscience.com

Laue Systems

Single crystal orientation systems compact, real-time, 0.1 degree accuracy

Indirect Detection

NEW large area fibre coupled X-ray sCMOS with 2k x 2k, 4k x 4k & 6k x 6k resolution