

专题: 二维及拓扑自旋物理

二维钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片的生长与磁性研究*杨瑞龙[†] 张钰樱 杨柯 姜琦涛 杨晓婷 郭金中 许小红[‡]

(山西师范大学化学与材料科学学院, 磁性分子与磁信息材料教育部重点实验室, 太原 030031)

(2023年7月28日收到; 2023年9月12日收到修改稿)

二维磁性材料是近年来发展起来的新兴材料, 在单层或者少层的原子厚度中以其独特的磁性特性和结构特征而备受关注. 其中铁磁性材料在信息存储和处理等方面有着广泛的应用, 所以当前研究主要集中在丰富二维铁磁数据库以及开发磁调制的修饰策略上. 本文通过常压化学气相沉积法在云母片衬底上成功生长出了二维钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片, 获得了钒源温度 765 °C 和质量 0.010 g 为纳米片生长情况最适中条件, 并通过光学显微镜、原子力显微镜、拉曼光谱仪、扫描电子显微镜、X 射线能谱、X 射线光电子能谱对纳米片进行表征. 同时掺杂样品的磁性表征表明钒掺杂后样品居里转变温度变为 105 K, 由亚铁磁性变为铁磁性, 矫顽力也显著增大, 证明钒掺杂可以有效地调控 Cr_2S_3 纳米片的磁性. 这些研究结果将有望推动钒掺杂 Cr_2S_3 材料向着实际应用的的可能性, 成为下一代自旋电子应用的理想候选材料之一.

关键词: 二维磁性材料, 化学气相沉积, 钒掺杂 Cr_2S_3 , 铁磁性**PACS:** 75.50.-y, 75.70.-i, 81.15.Gh**DOI:** 10.7498/aps.72.20231229

1 引言

二维磁性材料是近年来发展起来的一种新兴材料, 它们能够将自发磁化保持到几层甚至是单层, 以其独特的磁性特性和结构特征而备受关注^[1-3]. 通常二维磁性材料的特性受其结构影响, 其中包括磁性原子的排列和堆垛结构, 以及材料的层数等, 进而所表现出的高磁性、高品质因子和高磁电性能等丰富特性, 使二维磁性材料在数据存储、磁性传感器等自旋电子器件中具有重要的应用^[4,5]. 然而前期对本征二维磁性材料的探索过程比较缓慢, 随着制备方法和表征技术的快速发展, 研究者在 CrI_3 ^[2], $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ ^[6], VSe_2 ^[7] 和 Fe_3GeTe_2 ^[8] 等材料中发现了二维本征磁有序, 这为进一步研究二维磁

体提供了新的思路. 比如二维 CrI_3 纳米片表现出奇特的层依赖铁磁性现象^[2], 单层 CrI_3 为铁磁性, 双层 CrI_3 却是反铁磁性, 然而三层 CrI_3 又表现出铁磁性, 接着对双层 CrI_3 器件进行静电栅压控制, 在固定磁场下还可以实现反铁磁和铁磁态的超磁转换; 二维 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 纳米片在低温下具有面外方向的磁各向异性特征^[6]; 单层 VSe_2 表现出区别块材的强铁磁有序^[7], 并可持续到室温以上, 而块材 VSe_2 则表现顺磁性; 二维 Fe_3GeTe_2 纳米片厚度为四层时表现室温以上的铁磁性^[8]; 双层 CrBr_3 的反铁磁态和铁磁态也可由堆垛顺序控制^[9]. 这些实验研究结果极大丰富了本征二维磁性材料的性能及应用研究.

目前二维磁性材料的研究主要集中在丰富其数据库以及开发磁性调控的修饰策略上. 研究者们

* 国家自然科学基金 (批准号: 52002232, 12174237)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3505301)、山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2021L267)、山西省研究生教育创新项目 (批准号: 2021Y484) 和山西师范大学研究生科技创新项目 (批准号: 2022XSY019) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yangruilong@sxnu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: xuxh@sxnu.edu.cn

通过研究二维磁体的磁交换相互作用,并不断改善二维材料的制备方法,从而开发出具有理想性能的二维磁体,解决二维磁体在空气中不稳定、居里温度低、制备效率低等问题,实现对二维材料磁性能的调控,为自旋电子学领域的研究及实际应用提供了新的视角^[10-15].为了最大限度地扩大二维磁性材料的应用范围,研究者们也已经开发了几种调节其性能的方法,如构建异质结构^[16,17]、施加应变^[18]和掺杂^[19,20]等.掺杂策略是一种探索二维材料新性质的简便方法,这有利于其在自旋电子学领域的进一步应用,但是如何控制掺杂的均匀性以及是否为稳健的替代掺杂而不是占据间隙和缺陷位置的掺杂,这些是实验需要进一步解决的实际问题.菱方相 Cr_2S_3 具有六边形结构,每个超晶胞都可以看作是 CrS_6 八面体的周期性叠加,从整体上看,硫原子首先通过密集的六边形堆叠形成结构的骨架,然后 Cr 原子占据 S_6 八面体的空隙.在填充过程中会发生两种原位现象,一种是由共边的 CrS_6 八面体组成完全占据 CrS_2 层,另一种是 $1/3$ 占据的 $\text{Cr}_{1/3}\text{S}$ 层与相邻层共面,以保持结构稳定.而且 Cr_2S_3 采用类 $3R$ 结构的 ABC 堆垛顺序, $\text{Cr}_{1/3}$ 层和 CrS_2 层由强共价键相连,而不是弱的层间范德瓦耳斯力,所以属于非层状材料,生长难度较大.另外菱方相 Cr_2S_3 是一种非常稳定的二维本征亚铁磁材料,居里温度约为 120 K,但是在 75 K 会出现反平行晶格磁化^[21-23].研究者们通过化学气相沉积方法合成了二维 (2D) 硒掺杂 $\text{Cr}_2\text{S}_3(\text{Se}-\text{Cr}_2\text{S}_3)$ 纳米片,与纯 Cr_2S_3 相比,4.07%-Se- Cr_2S_3 纳米片的反平行晶格磁化降低、居里温度提高,这为实现对其磁性的调控提供了实验证据^[24].

本文利用常压化学气相沉积法在云母片衬底上生长了二维钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片,通过调节优化钒源 (VCl_3) 的温度和质量生长参数,可以有效调控纳米片的厚度及尺寸,归纳了纳米片的生长规律;使用光学显微镜、原子力显微镜、拉曼光谱仪、扫描电子显微镜、X 射线能谱仪、X 射线光电子能谱对纳米片进行表征,表明制备出了高质量的钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片.最后磁性表征结果表明,钒掺杂后,居里转变温度变为 105 K,磁化强度随着温度变化曲线中 75 K 的最大点消失,由亚铁磁性变为铁磁性,磁滞曲线中矫顽力也显著增大,表明钒掺杂可以有效地调控 Cr_2S_3 纳米片的磁性.本工作推动了钒掺杂 Cr_2S_3 材料向着实际应用的的可能

性,有望成为下一代自旋电子应用的理想候选材料之一.

2 实验

2.1 化学气相沉积法合成

材料生长前,需要使用薄刀片沿氟晶云母片 ($15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 0.2\text{ cm}$,长春市泰元氟晶云母有限公司)的横向方向将其切成 6—10 片的新鲜薄片,用作材料生长衬底.如图 1(a) 的生长示意图所示,材料生长所用装置为二温区管式电炉 (KLG-12-2Y,石英管尺寸为长 1200 mm,外管直径 50 mm,内管直径 38 mm).实验所用无水三氯化铬、无水三氯化钒、硫和无水氯化钠粉末全部购至阿法埃莎 (中国) 化学有限公司,未经过进一步处理.实验中,把铬源、钒源和云母片放置于同一石英舟内,位于右端高温区中心;硫源单独放置于另一个石英舟,位于左端低温区中心左侧 200 °C 处.先通入高纯氩气流量 400 sccm ($1\text{ sccm}=1\text{ mL/min}$),持续通入 10 min,清洗管路以除去管路中的氧气,确保为惰性气体氛围.整个生长过程中,氩气流量及氩氢混合气流量根据前期实验情况确定,温区设置过程如图 1(b) 所示,左端低温区温度设置为 350 °C,升温速率为 15 °C/min;右端高温区温度设置为

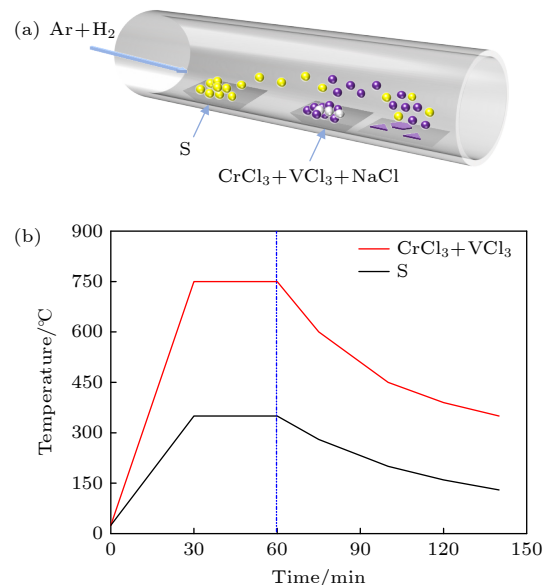


图 1 生长示意图 (a) 化学气相沉积生长示意图; (b) 生长过程温度设置曲线

Fig. 1. Schematic diagram of growth setup: (a) Schematic diagram of chemical vapour deposition growth setup; (b) temperature setting curve of growth process.

735—780 °C, 升温速率为 25 °C/min, 铬源 CrCl_3 及钒源 VCl_3 (添加少量的氯化钠) 放置于高温区中心处, 高低温区升温时间 30 min, 保温时间 30 min. 通过化学气相沉积方法生长钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片, 参数的选择是基于前期生长 Cr_2S_3 纳米片的条件^[25], 生长 Cr_2S_3 纳米片的最优条件为 0.025 g 的铬源质量, 0.600 g 的硫粉, 750 °C 的铬源温度, 1:15 的氢气与氩气流量比例, 在此基础上调节钒源的质量和温度. 不同钒源温度和温度可得到不同的样品生长情况, 将在结果及讨论部分详细描述生长情况. 保温结束后, 只通入氩气, 样品随炉自然冷却至室温.

2.2 材料表征与磁性测量

材料生长完成后, 二维纳米片的光学形貌采用 LW300LJT 型光学显微镜表征; 利用 Bruker Dimension Icon 型原子力显微镜 (AFM) 进行纳米片厚度表征; 基本结构和化学成分采用 LabRAM HR Evolutio 型拉曼光谱仪 (Raman, 532 nm 激发光源)、配置有 X 射线能谱仪 (EDS) 的 JSM-7500F 型扫描电子显微镜 (SEM)、ES-CALAB 250Xi, A1K α 型 X 射线光电子能谱 (XPS) 等进行表征; 二维纳米片的磁性性能测量在 MPMS-5L 型超导量子干涉仪 (SQUID) 和综合物性测量系统 (PPMS) 上完成.

3 结果及讨论

首先如图 2 所示, 通过改变生长温度来调控前

驱体浓度, 实验中将 VCl_3 紧邻 CrCl_3 左侧放置, VCl_3 提供稳定的源蒸气浓度所需温度与 CrCl_3 基本一致, 故 Cr 源位于高温区中心, 所以 V 源与 Cr 源温度基本一致. VCl_3 温度分别为 735, 750, 765 °C 进行实验, 生长情况如图 2(a)—(c) 所示. 735 °C 时, 黑色颗粒大量存在, 同时有较小尺寸发亮发圆的纳米片生长, 黑颗粒的大量存在表明生长温度太低, 前驱体浓度不足, 同时无法为样品的横向生长提供足够的能量. 750 °C 时, 可观察到黑色颗粒基本消失, 纳米片明显较小较厚且大多为非规则形状, 说明钒源浓度适中, 但是不足以使其横向长大. 所以继续升高温度至 765 °C, 发现纳米片尺寸明显增大, 为 20—30 μm , 大多为正六边形, 形状规则, 但纳米片厚度较厚. 可以看出, 钒源 765 °C 是提供前驱体浓度的适合条件.

实验确定 VCl_3 源的适合温度为 765 °C, 其他生长参数也完全相同时, 决定参与反应的 VCl_3 蒸气的量就取决于钒源质量, 进而调控掺钒 Cr_2S_3 纳米片的生长情况. 接着实验设计了在钒源温度为 765 °C 条件下, VCl_3 质量分别为 0.005, 0.010 和 0.015 g 的对照实验, 探究了 VCl_3 质量对纳米片生长情况的影响. 如图 2(d)—(f) 所示, 随着 VCl_3 质量的增大, 云母片基底上纳米片的数量、厚度以及尺寸都显著变化, VCl_3 质量为 0.005 g 时, 纳米片厚度明显减薄, 但部分形状不规则, 尺寸较小, 说明钒源的量较少; 增大 VCl_3 质量为 0.010 g, 纳米片尺寸变大, 厚度较薄, 形状表现出六边形、截角

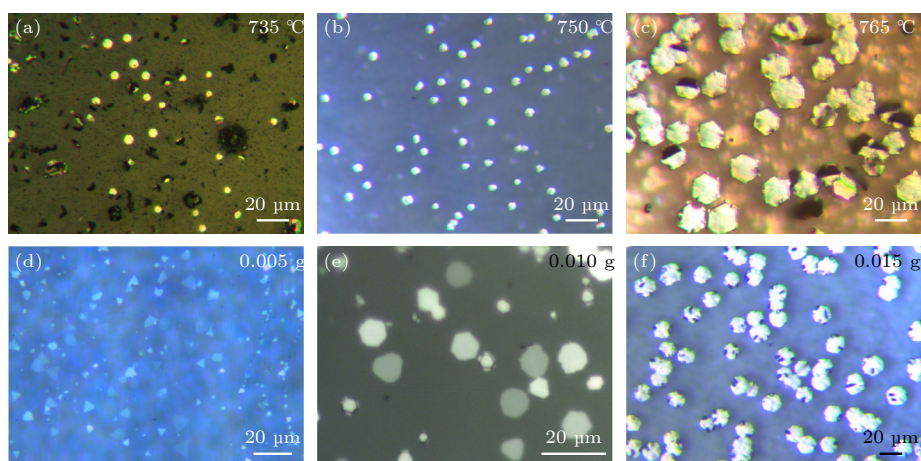


图 2 不同钒源温度与质量条件下生长的纳米片光学形貌图 (a)—(c) 735, 750, 765 °C 钒源温度条件下生长的纳米片光学照片; (d)—(f) 0.005, 0.010, 0.015 g 钒源质量条件下生长的纳米片光学照片

Fig. 2. Optical morphology of nanosheets grown under different vanadium source temperature and mass conditions: Optical image of nanosheets grown under the vanadium source temperature conditions of (a) 735, (b) 750, and (c) 765 °C; optical image of nanosheets grown under the vanadium source mass conditions of (d) 0.005, (e) 0.010, and (f) 0.015 g.

三角形; 继续增至 0.015 g 时, 纳米片横向尺寸、密度都显著增大, 但是样品表面变得不均匀, 这可能是钒源蒸气浓度过大导致. 通过调控选取钒源温度与质量, 获得了不同的生长情况, 对比得到在钒源温度为 765 °C 和质量在 0.010 g 时为最适合条件, 纳米片厚度较薄, 尺寸均匀分布. 选取纳米片进行厚度表征, 如图 3 所示, 纳米片表面平整均匀, 薄纳米片厚度仅约 4.87 nm, 厚纳米片厚度约为 49.3 nm.

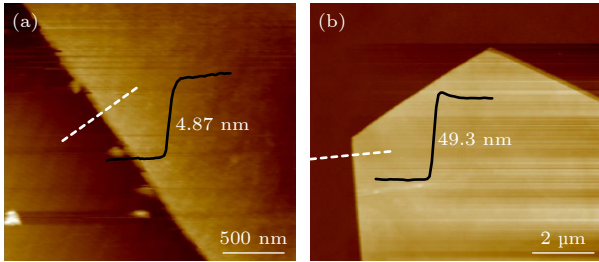


图 3 纳米片的 AFM 表征 (a) 薄纳米片 AFM 表征; (b) 厚纳米片 AFM 表征
Fig. 3. AFM characterization of nanosheets: (a) AFM characterisation of thin nanosheet; (b) AFM characterization of thick nanosheet.

接着对生长的纳米片进行了拉曼光谱表征, 如图 4 所示, Cr_2S_3 的两个强的特征峰出现, 分别约为 252.2 cm^{-1} 和 285.9 cm^{-1} , 分别对应于平面内 E_g 振动模式和平面外 A_g 振动模式, 而且平面内振动较强; 其余较强峰为云母片基底特征峰, 没有出现其他峰位, 表明生长纳米片为单一的 Cr_2S_3 相 [24].

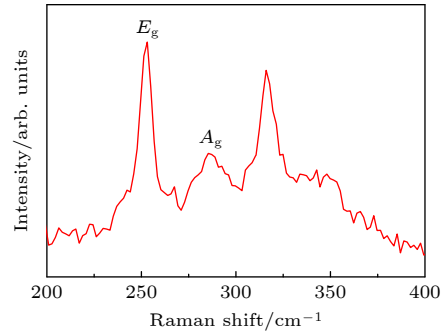


图 4 纳米片的拉曼光谱表征
Fig. 4. Raman characterization of nanosheets.

为了进一步确定实验生长纳米片的元素组成及比例, 对其进行了元素能谱 (EDS) 和 XPS 表征, 如图 5 所示. 图 5(a) 为纳米片的 SEM 图像, 图 5(b) 为纳米片的能谱 (EDS) 表征结果, 显示实验所生长的纳米片由 S, Cr, V 三种元素组成, 比例约为 65.24:13.38:21.39, 其中 Cr, V 两种元素与 S 元素的原子比为 34.77:65.24, 小于 Cr_2S_3 的 2:3, 说明掺杂的样品存在空位缺陷 [24]. 拉曼光谱和元素能谱结果说明实验成功获得了高比例的钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片. 接着通过对纳米片进行 XPS 图谱表征, 得到了 Cr 2p, V 2p 和 S 2p 的谱图结果. Cr 2p 谱图中 583.5 eV 和 574.1 eV 的峰位分别对应于 Cr $2p_{1/2}$ 和 Cr $2p_{3/2}$ 的电子结合能, 表明 Cr 的化合价为 +3 价 [22]; V 2p 谱图中 523.7 eV 和 516.3 eV

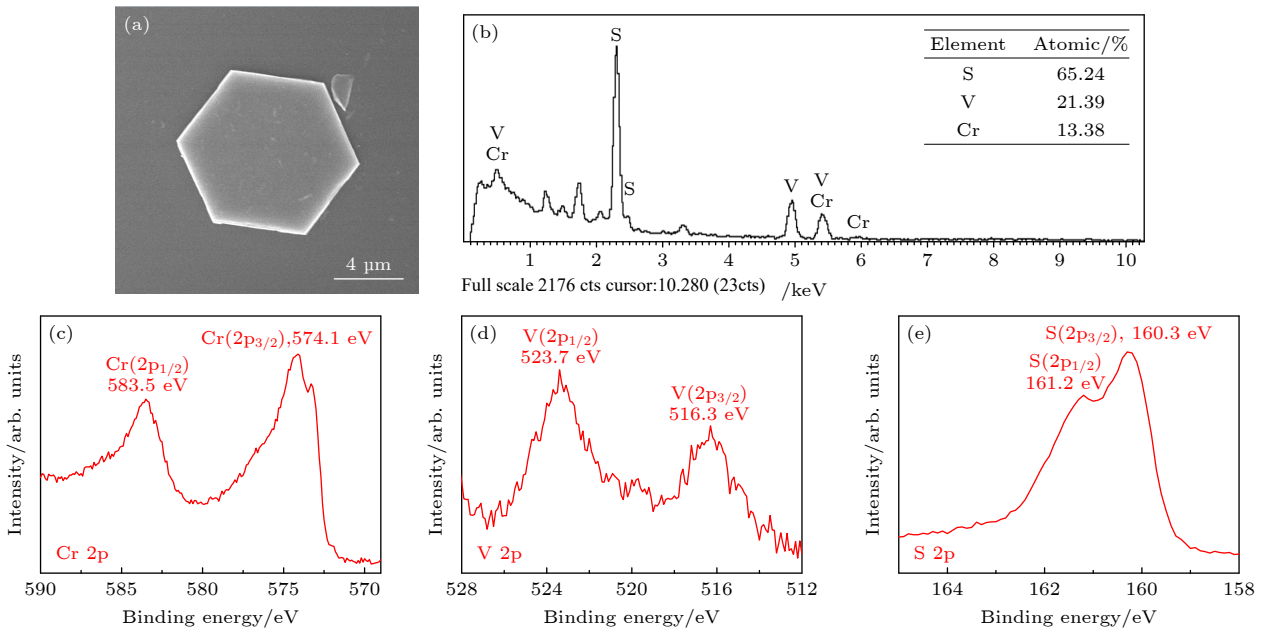


图 5 纳米片 SEM, EDS 和 XPS 表征 (a) SEM 照片; (b) EDS 表征, 插图为元素百分比; (c)–(e) 纳米片 XPS 图谱
Fig. 5. SEM, EDS and XPS characterisation of nanosheets: (a) SEM image; (b) EDS characterisation, inset shows elemental percentages; (c)–(e) XPS spectrum of nanosheets.

的峰位分别对应于 V $2p_{1/2}$ 和 V $2p_{3/2}$ 的电子结合能, 表明 V 的化合价为+4 价^[26], 考虑钒原子可能是插入了 Cr_2S_3 结构的“ CrS_2 ”; S 2p 谱图中 161.2 eV 和 160.3 eV 的峰位分别与 S $2p_{1/2}$ 和 S $2p_{3/2}$ 的电子结合能相对应, 表明 S 的化合价为-2 价^[22]. X 射线光电子能谱进一步辅助证明生长的纳米片为钒掺杂 Cr_2S_3 .

进一步对钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片进行磁性表征, 如图 6 所示. 图 6(a)–(c) 为施加面内磁场方向的磁性表征. 图 6(a) 是样品在 1000 Oe ($1 \text{ Oe} = 10^3 / (4\pi) \text{ A/m}$) 外磁场, 场冷 (FC) 和零场冷 (ZFC) 下的磁化强度随着温度的变化曲线 ($M-T$), 温度范围为 5–350 K, 变化曲线不重合, 表明自旋极化程度的

增加, 显示出显著的铁磁特性. 从 ZFC 和 FC 下 $M-T$ 曲线可以看出, 随着温度的降低, 样品的磁化强度逐渐增大, 这是由于大场测试 $M-T$ 曲线, 会出现常见的“拖尾效应”, 会对本征磁性产生影响, 所以这里归结为顺磁信号的影响; 接着在 ZFC 下 $M-T$ 曲线可以看到, 约 105 K 时出现了明显的拐点, 斜率突然增大, 磁化强度开始急剧增加, 表明样品的居里温度约为 105 K. 而纯 Cr_2S_3 的居里温度为 120 K, 75 K 时磁化强度最大, 75 K 后由于反平行晶格磁化的出现 (亚铁磁性) 影响, 磁化强度开始减小, 所以奈尔温度为 75 K^[22]. 两种磁性结果比较表明钒掺杂以后, 大大消除了反平行晶格磁化, 成功对 Cr_2S_3 的磁性实现了很好的调控. 图 6(b)

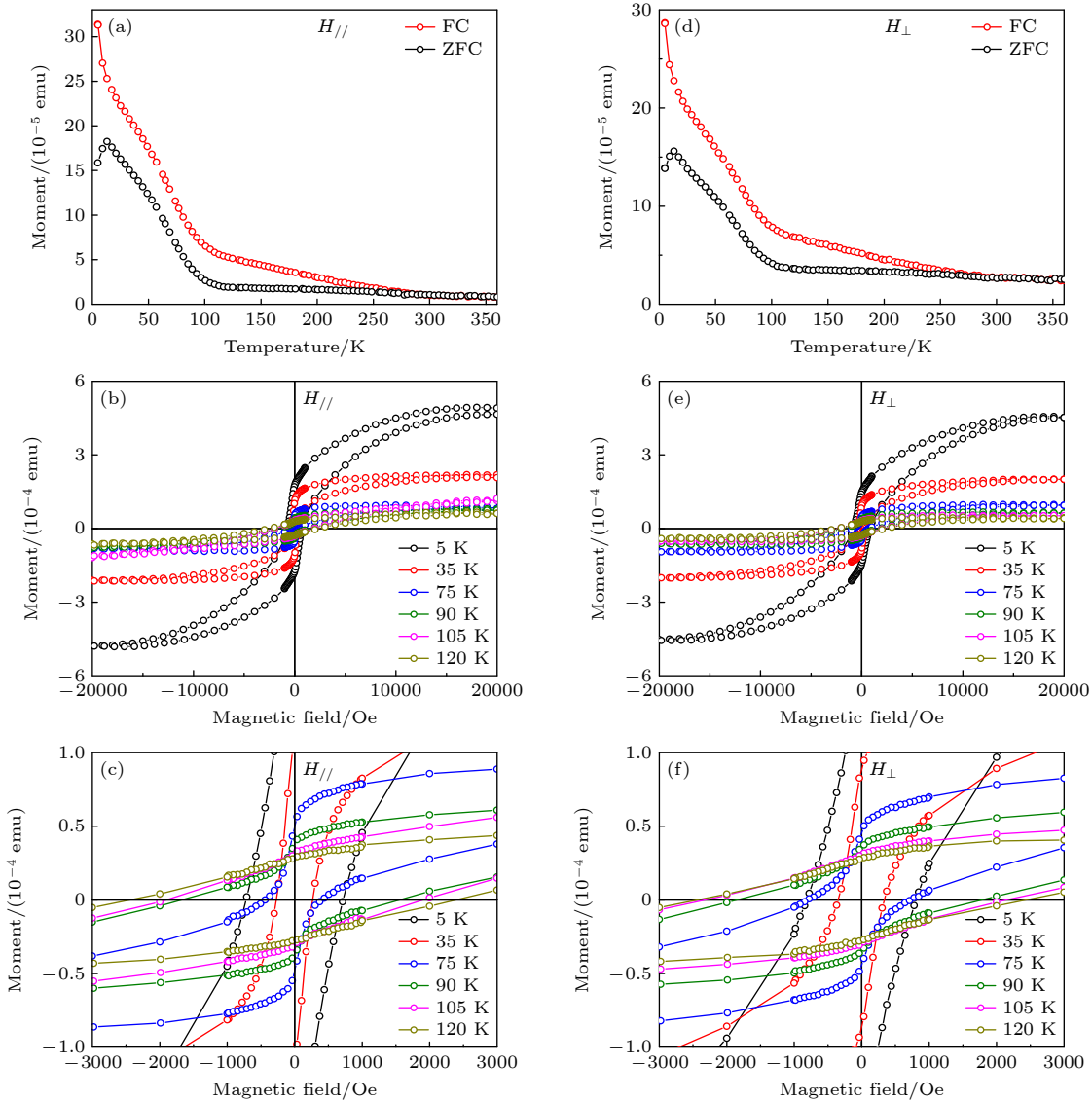


图 6 纳米片的磁性测量 (a)–(c) 纳米片面内磁场方向的 $M-T$ 和 $M-H$ 曲线; (d)–(f) 纳米片面外磁场方向的 $M-T$ 和 $M-H$ 曲线
 Fig. 6. Magnetic measurements of nanosheets: (a)–(c) $M-T$ and $M-H$ curves in the direction of the in-plane magnetic field of nanosheets; (d)–(f) $M-T$ and $M-H$ curves in the direction of the out-of-plane magnetic field of nanosheets.

为样品在不同温度下的磁滞回线 ($M-H$), 可以观察到明显的磁滞现象, 随着温度的降低, 剩余磁化强度显著增大, 饱和磁化强度也变大, 矫顽场先变小后变大. 将图 6(b) 中出现磁滞的区域放大得到图 6(c), 可以更加清晰地发现随着温度的降低, 样品的剩余磁化强度增大, 矫顽场逐渐减小, 5 K 时又变大 (整体与纯 Cr_2S_3 矫顽场相比变大), 在 120 K 时, 也有较明显的磁滞曲线, 这里归结为顺磁信号的影响. 继续对施加面外磁场方向的磁性进行表征, 如图 6(d)–(f) 所示. 面外方向的 $M-T$ 曲线 (图 6(d)) 走势几乎与面内方向结果相同, 磁化强度仅稍小于面内方向, 表明与纯 Cr_2S_3 面内方向是磁易轴方向结果相同; 面外方向 $M-H$ 曲线 (图 6(e), (f)) 的变化趋势也基本与面内方向曲线变化规律一致, 在居里温度 105 K 以下也有明显的磁滞曲线 (120 K 的磁滞曲线也归结为顺磁信号的影响). 总体而言, 宏观磁性表征结果表明对二维 Cr_2S_3 进行钒掺杂, 大大减少了 Cr 原子的插入, V 原子与 Cr, S 原子发生磁耦合相互作用, 增强了其面内磁性, 使其反铁磁性减弱, 铁磁性增强^[24], 由亚铁磁性转变为铁磁性, 成功实现了对 Cr_2S_3 磁性的有效调控.

4 结 论

本文通过常压化学气相沉积方法成功在云母片衬底上生长了钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片. 研究了通过改变钒源 (VCl_3) 粉末的温度和质量, 可以有效调控纳米片的厚度及尺寸, 温度 765 °C 和质量 0.010 g 为纳米片生长情况最适中条件. 并用光学显微镜、原子力显微镜、拉曼光谱仪、扫描电子显微镜、X 射线能谱仪、X 射线光电子能谱对纳米片进行了表征, 纳米片形状规则、表面平整、厚度可控, 制备出了高质量的钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片. 最后磁性表征结果表明, V 掺杂后, 居里转变温度变为 105 K, $M-T$ 曲线中 75 K 的最大磁矩点消失, 由亚铁磁性变为铁磁性, $M-H$ 曲线中矫顽力也显著增大, 表明 V 掺杂可以有效地调控 Cr_2S_3 纳米片的磁性. 然而缺少不同钒掺杂比例对 Cr_2S_3 纳米片磁性的影响, 希望后期对实验生长条件进一步优化, 另外对 V 掺杂 Cr_2S_3 纳米片磁性的调控机制也值得进一步深入研究. 总而言之, 本工作推动了钒掺杂 Cr_2S_3 材料向着实际应用的可能性, 有望成为下一代自旋电子应用的理想候选材料之一.

参考文献

- [1] Burch K S, Mandrus D, Park J G 2018 *Nature* **563** 47
- [2] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, Klein D R, Cheng R, Seyler K L, Zhong D, Schmidgall E, McGuire M A, Cobden D H, Yao W, Xiao D, Pablo Jarillo-Herrero P, Xu X D 2017 *Nature* **546** 270
- [3] Klein D R, MacNeill D, Lado J L, Soriano D, Navarro-Moratalla E, Watanabe K, Taniguchi T, Manni S, Canfield P, Fernández-Rossier J, Jarillo-Herrero P 2018 *Science* **360** 1218
- [4] Jiang S W, Li L Z, Wang Z F, Shan J, Mak K F 2019 *Nat. Electron.* **2** 159
- [5] Lin X Y, Yang W, Wang K L, Zhao W S 2019 *Nat. Electron.* **2** 274
- [6] Wang Z, Zhang T Y, Ding M, Dong B J, Li Y X, Chen M L, Li X X, Huang J Q, Wang H W, Zhao X T, Li Y, Li D, Jia C K, Sun L D, Guo H H, Ye Y, Sun D M, Chen Y S, Yang T, Zhang J, Ono S, Han Z, Zhang Z D 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 554
- [7] Bonilla M, Kolekar S, Ma Y J, Diaz H C, Kalappattil V, Das R, Eggers T, Gutierrez H R, Phan M H, Batzill M 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 289
- [8] Deng Y J, Yu Y J, Song Y C, Zhang J Z, Wang N Z, Sun Z Y, Yi Y F, Wu Y Z, Wu S W, Zhu J Y, Wang J, Chen X H, Zhang Y B 2018 *Nature* **563** 94
- [9] Chen W J, Sun Z Y, Wang Z J, Gu L H, Xu X D, Wu S W, Gao C L 2019 *Science* **366** 983
- [10] Jiang H N, Zhang P, Wang X G, Gong Y J 2021 *Nano Res.* **14** 1789
- [11] Wang H, Wen Y, Zhao X X, Cheng R Q, Yin L, Zhai B X, Jiang J, Li Z W, Liu C S, Wu F C, He J 2023 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2211388
- [12] Lu S H, Zhou Q H, Guo Y L, Zhang Y H, Wu Y L, Wang J L 2020 *Adv. Mater.* **32** 2002658
- [13] Guo Y L, Wang B, Zhang X W, Yuan S J, Ma L, Wang J L 2020 *InfoMat* **2** 639
- [14] Zha H M, Li W, Zhang G J, Liu W J, Deng L W, Jiang Q, Ye M, Wu H, Chang H X, Qiao S 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 087501
- [15] Zhang Y L, Zhang Y Y, Ni J Y, Yang J H, Xiang H J, Gong X G 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 027501
- [16] Eremeev S V, Otrokov M M, Chulkov E V 2018 *Nano Lett.* **18** 6521
- [17] Hu T, Zhao G D, Gao H, Wu Y B, Hong J S, Stroppa A, Ren W 2020 *Phys. Rev. B* **101** 125401
- [18] Yang S X, Chen Y J, Jiang C B 2021 *InfoMat* **3** 397
- [19] Abramchuk M, Jaszewski S, Metz K R, Osterhoudt G B, Wang Y P, Burch K S, Tafti F 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801325.
- [20] Duan H L, Guo P, Wang C, et al. 2019 *Nat. Commun.* **10** 1584
- [21] Zhou S S, Wang R Y, Han J B, Wang D L, Li H Q, Gan L, Zhai T Y 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1805880
- [22] Chu J W, Zhang Y, Wen Y, Qiao R X, Wu C C, He P, Yin L, Cheng R Q, Wang F, Wang Z X, Xiong J, Li Y R, He J 2019 *Nano Lett.* **19** 2154
- [23] Cui F F, Zhao X X, Xu J J, Tang B, Shang Q Y, Shi J P, Huan Y H, Liao J H, Chen Q, Hou Y L, Zhang Q, Pennycook S J, Zhang Y F 2020 *Adv. Mater.* **32** 1905896
- [24] Zhou X Y, Liu C, Song L T, et al. 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 276811
- [25] Yang R L, Zhang Y Y 2023 *J. Mater. Engineer.* **51** 162 (in Chinese) [杨瑞龙, 张钰樱 2023 *材料工程* **51** 162]
- [26] Guo Y Q, Deng H T, Sun X, et al. 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700715

SPECIAL TOPIC—Two-dimensional magnetism and topological spin physics

Growth and magnetic properties of two-dimensional vanadium-doped Cr_2S_3 nanosheets*

Yang Rui-Long[†] Zhang Yu-Ying Yang Ke Jiang Qi-TaoYang Xiao-Ting Guo Jin-Zhong Xu Xiao-Hong[‡]

(Key Laboratory of Magnetic Molecules and Magnetic Information Materials of Ministry of Education, School of Chemistry and Materials Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

(Received 28 July 2023; revised manuscript received 12 September 2023)

Abstract

Two-dimensional magnetic materials are emerging materials developed in recent years and have attracted much attention for their unique magnetic properties and structural features in single-layer or few layers of atomic thickness. Among them, ferromagnetic materials have a wide range of applications such as in information memory and processing. Therefore the current research mainly focuses on enriching the two-dimensional ferromagnetic database and developing modification strategies for magnetic modulation. In this work, two-dimensional vanadium-doped Cr_2S_3 nanosheets successfully grow on mica substrates by atmospheric pressure chemical vapour deposition. The thickness and size of the nanosheet can be effectively regulated by changing the temperature and mass of vanadium source VCl_3 powder, with the temperature of 765 °C and the mass of 0.010 g as the most appropriate conditions for the growth of nanosheets. The nanosheets are also characterised by optical microscopy, atomic force microscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray energy spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy, and the nanosheet is regular in shape, with flat surface and controllable thickness, and the high-quality vanadium-doped Cr_2S_3 nanosheet is prepared. Meanwhile, the magnetic characterisations of the doped samples show that the Curie transition temperatures of the vanadium doped samples change to 105 K, and the maximum magnetic moment point of 75 K in the M - T curve disappears after V doping, and from subferromagnetic material to ferromagnetic material, and the coercivity in the M - H curve also increases significantly, which proves that the vanadium doping can effectively regulate the magnetic properties of Cr_2S_3 nanosheets. These results are expected to advance the vanadium-doped Cr_2S_3 materials toward practical applications and become one of the ideal candidate materials for the next-generation spintronic applications.

Keywords: two-dimensional magnetic materials, chemical vapour deposition, vanadium-doped Cr_2S_3 , ferromagnetism

PACS: 75.50.-y, 75.70.-i, 81.15.Gh

DOI: 10.7498/aps.72.20231229

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52002232, 12174237), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3505301), the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions of Shanxi Province, China (Grant No. 2021L267), the Graduate Education Innovation Project of Shanxi Province, China (Grant No. 2021Y484), and the Graduate Students of Science and Technology Innovation Project of Shanxi Normal University, China (Grant No. 2022XSY019).

[†] Corresponding author. E-mail: yangruilong@sxnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xuxh@sxnu.edu.cn

二维钒掺杂 Cr_2S_3 纳米片的生长与磁性研究

杨瑞龙 张钰樱 杨柯 姜琦涛 杨晓婷 郭金中 许小红

Growth and magnetic properties of two-dimensional vanadium-doped Cr_2S_3 nanosheets

Yang Rui-Long Zhang Yu-Ying Yang Ke Jiang Qi-Tao Yang Xiao-Ting Guo Jin-Zhong Xu Xiao-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 247501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231229

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231229>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维磁性材料的物性研究及性能调控

Study on physical properties and magnetism controlling of two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2021, 70(12): 127801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202146>

二维磁性材料及多场调控研究进展

Recent development in two-dimensional magnetic materials and multi-field control of magnetism

物理学报. 2021, 70(12): 127503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202204>

磁性二维材料的近期研究进展

Recent research advances in two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2022, 71(12): 127504 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220301>

大面积二维磁性材料的制备及居里温度调控

Research progress of preparation of large-scale two-dimensional magnetic materials and manipulation of Curie temperature

物理学报. 2021, 70(12): 127301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210223>

溶剂热制备铬掺杂硫化锌和硫化镉纳米结构和磁性

Preparation and magnetic properties of chromium doped zinc sulfide and cadmium sulfide nanostructures by solvothermal method

物理学报. 2021, 70(13): 137103 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201963>

二维 CrI_3 晶体的磁性测量与调控

Probe and manipulation of magnetism of two-dimensional CrI_3 crystal

物理学报. 2021, 70(12): 127504 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202197>