

新型磁性二维材料 Fe_3GeTe_2 及其 室温磁性调控

邓雨君[†] 於逸骏 张远波

(复旦大学物理系 表面物理国家重点实验室 上海 200433)

2018-12-19收到

[†] email: yujun.deng@hotmail.com

DOI: 10.7693/wl20190203

现代微电子器件的发展,很大程度上依赖于工艺与材料的突破,其中特别是对磁性薄膜材料的基础研究,已经使自旋电子学领域有了革命性的进展。为了获得具有广泛应用前景且更高性能的电子学器件,对于新型的磁性薄膜材料的研究是非常重要的课题。

传统的磁性薄膜材料^[1, 2]可通过分子束外延法制备,它们的磁性往往受限于特定的生长衬底,均匀的大面积薄膜的生长也极具挑战性。而随着石墨烯的发现,范德瓦尔斯晶体为我们提供了新的机遇。这一类晶体在层内由很强的共价键或金属键连接,在层间则依靠较弱的范德瓦尔斯力结合;结构上的各向异性使晶体可以从层间被解理至单个原子层或少数个原子层的最小单元,并仍然能够保持其化学稳定性和结构完整性。更重要

的是,当被解理到少层后,材料的比表面积大大增加,更容易被多种实验手段所调控^[3, 4]。最近就有实验工作将范德瓦尔斯晶体 CrI_3 和 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 解理到了单层或少层^[5, 6],并用光学实验验证了磁性的长程序确实在二维材料中存在。但是 CrI_3 和 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 都是绝缘体,而且它们的铁磁转变温度远低于室温,这就限制了这两种材料在自旋电子学器件方面可能的应用。我们采用了金属性的范德瓦尔斯晶体 Fe_3GeTe_2 作为研究对象,开展了一系列对其本征二维磁性以及磁性调控的研究。 Fe_3GeTe_2 的晶体结构如图1(a)所示,体材料的铁磁转变温度在150 K到220 K之间,并且具有很强的面外磁各向异性。

我们首先发展了一种新的样品解理方法,与Xiaodong Xu研究组^[7]同期首次获得了 Fe_3GeTe_2 对

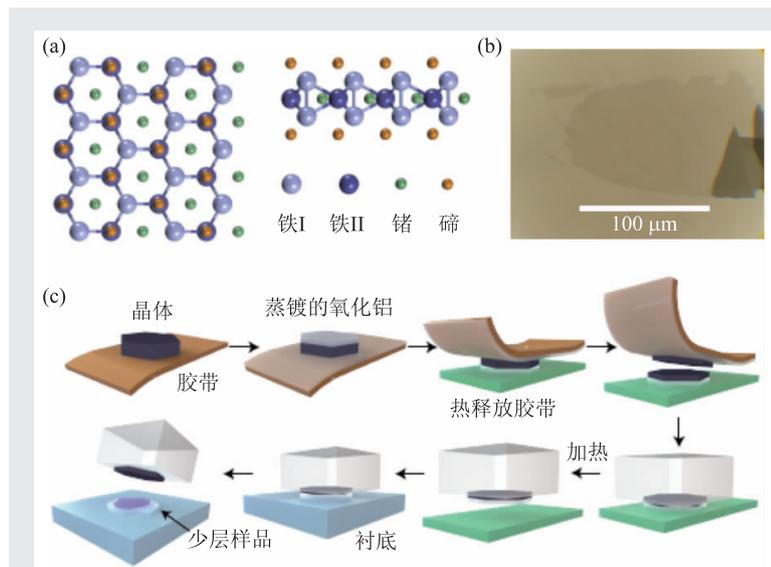


图1 (a)单层 Fe_3GeTe_2 的原子结构图(左:沿[001]晶向,右:沿[010]晶向);(b)单层 Fe_3GeTe_2 在氧化硅衬底上的光学图像;(c)基于氧化铝的机械解理方法示意图(改编自文献[10])

应的二维材料。在二维材料领域里,胶带解理方法是一种常用的解理范德瓦尔斯晶体以制备单层材料的方式。然而随着对二维材料的研究延伸至越来越多的新型材料,这种方法解理能力有限的弱点就显现了出来。对于 Fe_3GeTe_2 和其他许多范德瓦尔斯晶体来说,层内键能与层间键能之差不如石墨和氮化硼那么悬殊,难以用传统的机械解理法获得大面积的少层样品。因此,我们发展了一种基于氧化铝的解理方法,可以将 Fe_3GeTe_2 解理到单层,单层的横向尺寸能够达到100 μm 以上(图1(b))。由于用于解理的氧化铝层绝缘,这种方法解理的样品可以直接用于电输运研究。基于

氧化铝的解理方法的制备过程如图1(c)所示。这种方法的发明是受到了在金衬底上解理过渡族金属硫化物的启发^[8, 9]。先在新鲜解理的体材料 Fe_3GeTe_2 表面蒸镀50—200 nm厚的氧化铝层,用热释放胶带将氧化铝层与部分体材料 Fe_3GeTe_2 粘起来,通过加热将氧化铝与 Fe_3GeTe_2 的堆叠层一同释放到聚二甲基矽氧烷薄膜(PDMS)上,再将PDMS、 Fe_3GeTe_2 、氧化铝的堆叠层按压到衬底上并快速地揭开,新鲜解理的单层及少层 Fe_3GeTe_2 将会留在衬底上。这种解理方法制备效率高,解理能力强,不只适用于 Fe_3GeTe_2 ,还可应用于多种其他范德瓦尔斯晶体。研究认为这归结于蒸镀的氧化铝层与新鲜解理的体材料表面有较强的粘附性和非常大的接触面积。

在获得单层和少层的 Fe_3GeTe_2 后,我们进一步研究了这种磁性二维材料的电输运性质。通过观测反常霍尔效应来研究少层 Fe_3GeTe_2 中的磁性。对于磁性材料来说,霍尔电阻可以分成两部分: $R_{xy} = R_{\text{NH}} + R_{\text{AH}}$,其中 R_{NH} 为正常霍尔电阻, $R_{\text{AH}} = R_{\text{S}}M$ 为反常霍尔电阻,正比于磁矩 M 。对于不同厚度甚至单层的 Fe_3GeTe_2 样品,在垂直于样品解理面的方向施加磁场后,我们都在低温下测量到了霍尔电阻随外加磁场的回滞行为(图2(a)),也就标志着单层的 Fe_3GeTe_2 在低温下仍具有铁磁长程序以及面外磁各向异性。若零磁场下,可以测量到一个非零的剩余霍尔电阻,那么样品在此温度下已有了自发磁极化,可以据此定义一个铁磁转变温度。图2(b)为 Fe_3GeTe_2 少层的铁磁转变温度随层数的变化关系,可以看到其铁磁性确实会受到维度的影响,我们同时用反射磁性圆二色(polar refractive magnetic circular dichroism, RMCD)显微光谱和霍尔电阻的阿罗特图(Arrott plots)分别佐证了这一关系。

尽管在本征的 Fe_3GeTe_2 薄层中,铁磁转变温度大大降低了。在此研究中,我们可以通过锂离子

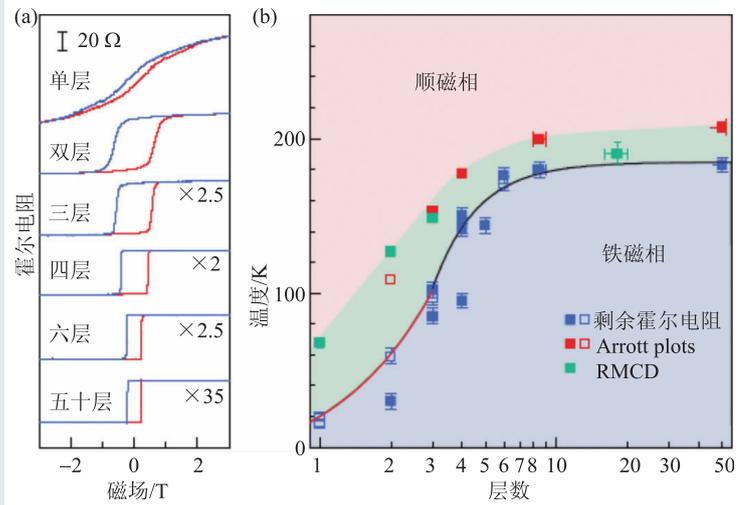


图2 (a)在最低温下,不同层数的 Fe_3GeTe_2 样品的反常霍尔效应;(b) Fe_3GeTe_2 关于层数和温度的相图,铁磁转变温度分别用反常霍尔效应、RMCD和Arrott plots得到(改编自文献[10])

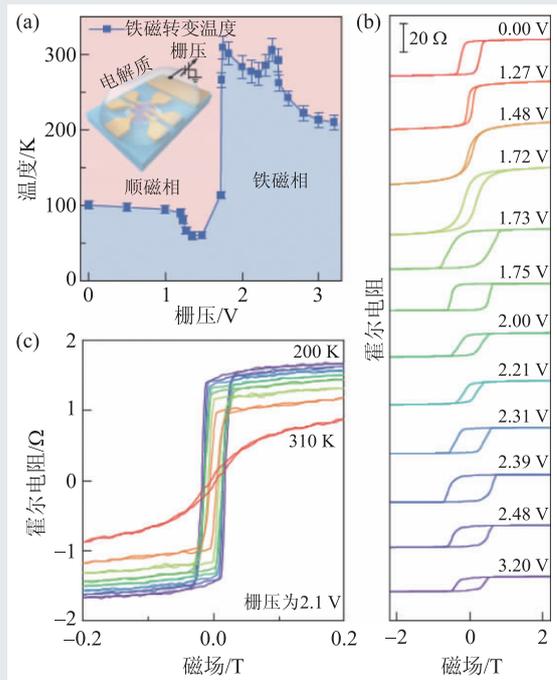


图3 (a)三层 Fe_3GeTe_2 关于栅压和温度的相图(插图: Fe_3GeTe_2 离子场晶体管示意图);(b)三层 Fe_3GeTe_2 在几个特定栅压下的反常霍尔效应;(c)四层 Fe_3GeTe_2 在室温附近的反常霍尔效应(改编自文献[10])

子插层^[4],将少层 Fe_3GeTe_2 的铁磁转变温度调控至室温以上。我们制备了 Fe_3GeTe_2 薄层的离子场晶体管器件,将固态电解质覆盖于 Fe_3GeTe_2 和旁侧栅极上(图3(a)中的插图)。施加正向的栅极电压可

以将锂离子插层进 Fe_3GeTe_2 的层间间隙中，引起大约每层 10^{14} cm^{-2} 的电子浓度增加，从而改变费米面上的态密度。研究发现，锂离子插层能够显著调控少层 Fe_3GeTe_2 的磁性(图 3 (b))。三层 Fe_3GeTe_2 的铁磁转变温度随着栅极电压的变化呈现出复杂的行为(图 3(a))，在栅极电压约等于 1.75 V 时，铁磁转变温度达到最高，超过了室温。另外，在四层的 Fe_3GeTe_2 样品中我们看到了霍尔电阻随外加磁场在 310 K 仍有回滞(图 3 (c))，这也是少层 Fe_3GeTe_2 被离子调控后，铁磁转变温度达到室温以上的直接证据。

本项研究成果于近期在 *Nature* 上发表^[10]。其中发现的新型磁性二维材料 Fe_3GeTe_2 ，为二维巡游磁性的研究提供了一个理想的体系。我们在这种磁性二维材料中获得了前所未有的高铁磁转变温度，这将为今后基于此类材料研发超高密度、栅压可调且室温可用的磁电子学器件提供了一种可能。而新发现的二维材料解理方法也将有利于进一步扩展二维材料库。

参考文献

- [1] Huang F *et al.* Phys. Rev. B, 1994, 49: 3962
- [2] Elmers H J *et al.* Phys. Rev. B, 1996, 54: 15224
- [3] Ye J T *et al.* Science, 2012, 338: 1193
- [4] Yu Y *et al.* Nat. Nanotechnol., 2015, 10: 270
- [5] Huang B *et al.* Nature, 2017, 546: 270
- [6] Gong C *et al.* Nature, 2017, 546: 265
- [7] Fei Z *et al.* Nat. Mater., 2018, 17: 778
- [8] Magda G Z *et al.* Sci. Rep., 2015, 5: 14714
- [9] Desai S B *et al.* Adv. Mater., 2016, 28: 4053
- [10] Deng Y *et al.* Nature, 2018, 563: 94

标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，
超过700个品种规格的透镜，
棱镜，反射镜，窗口，
滤光片等常用光学器件；
涵盖紫外，可见，
近红外，
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co.,Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216
邮箱：optics@goldway.com.cn



微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7210
多通道锁相放大器

全球唯一
通道之最



Model 197 光学斩波器



生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10
Email: infosi@ametec.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三尼阳光科技发展有限公司
电话：010-65202180/81 传真：010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net