

# 二维层状 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 超薄膜高效电磁屏蔽材料及其航天应用研究

张瑞菊<sup>1,2</sup>, 余本伟<sup>2</sup>, 胡大治<sup>2</sup>, 樊济宇<sup>2</sup>

(1. 南京市生态环境监测监控中心核与辐射室, 南京 210000;  
2. 南京航空航天大学应用物理系, 南京 211106)

**摘要:** 电磁屏蔽是有效抑制电磁危害的手段之一, 电磁屏蔽材料的性质与其抗电磁辐射能力密切相关。 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  合金材料的晶体结构呈现二维多层结构, 具有优异的屏蔽电磁波的潜能, 可以作为未来航天领域的优选材料。通过脉冲激光沉积手段,  $\text{CrTe}_2$  和  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  两种组分薄膜被外延沉积在蓝宝石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底上。X射线衍射和原子力显微镜测量结果显示薄膜为外延单晶生长, 同时薄膜表面的粗糙度起伏不超过 2 nm。其中光电子能谱对  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的扫描结果证明其化学计量比符合 4:5, 且在空气中放置一个月后未发现明显氧化。变温的磁化强度测量显示  $\text{CrTe}_2$  和  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜分别在 198 K 和 257 K 发生标准的顺磁-铁磁相变行为。温度范围从 5 K 到 320 K, 薄膜始终显示为金属性。电输运物理机理的模拟分析得出, 电子-电子散射和电子-磁子散射分别对居里点以上和以下导电性起主导作用。这些优异的性能集一体, 使得  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  材料在未来航天领域可以发挥电磁屏蔽的重要作用。

**关键词:** 二维材料; 电磁屏蔽; 磁性薄膜; 金属导电

中图分类号: O59

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 03-0065-08

## High Efficiency Electromagnetic Shielding and the Aerospace Applications of Two Dimensional Layered $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ Ultrathin Film

ZHANG Ruiju<sup>1,2</sup>, YU Benwei<sup>2</sup>, HU Dazhi<sup>2</sup>, FAN Jiyu<sup>2</sup>

(1. Nanjing Ecological Environment Monitoring and Control Center, Nuclear and Radiation Office, Nanjing 210000, China;  
2. Department of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Electromagnetic shielding is one of the effective means to restrain electromagnetic hazards, and the properties of electromagnetic shielding materials are strongly correlated with their ability to resist electromagnetic radiation. The  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  material shows a two-dimensional crystal structure, which will be possibly utilized in the future electromagnetic shielding area of aerospace due to their excellent potentials for shielding electromagnetic waves. By using pulsed laser deposition technology, we realized a single crystal growth of  $\text{CrTe}_2$  and  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  thin films on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrate. Their epitaxial growth characteristics and the surface roughness have been examined by the measurement of X-ray diffraction and the atomic force microscopy. The results of X-ray diffraction show that all of thin films epitaxially grow. Meanwhile, their surface roughness is also no more

收稿日期: 2022-10-16; 修订日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金 (11974181); 鸿鹄创新中心开放基金 (HQ202102003)

作者简介: 张瑞菊 (1974-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁屏蔽和电磁辐射。

E-mail: 422651085@qq.com

通信作者简介: 樊济宇 (1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁屏蔽和吸波材料。E-mail: jiyufan@nuaa.edu.cn

than 2 nm. For the  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  thin film, the detection of X-ray photoelectron spectra proves that its chemical components' ratio is consistent with 4 : 5. Its chemical property can remain very stable as it is placed at atmospheric environment for one month. Based on the measurement of magnetization dependence on temperature, we find that an obvious paramagnetic-ferromagnetic phase transition occurs at 198 K and 257 K, respectively for  $\text{CrTe}_2$  and  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  films. We also proved that the film conductivity exhibited a metallic electronic transport at the temperature range of 5~320 K by the measurement of resistance dependence on temperature. The study of electrical conductivity mechanism shows that electron-electron scattering and electron-magnon scattering respectively play an important role in conductivity above and below the Curie point. Based on these unique properties, we believe that  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  will play a key role in the ongoing development of aerospace field for the electromagnetic shielding.

**Key words:** Two dimensional; Electromagnetic shielding; Magnetic film; Metallic conductivity

## 0 引言

随着航天航空科技的发展,越来越多的电子元件被安装到运载火箭、卫星、飞船上,要保证这些组件能够正常工作,必须降低外部环境带来的干扰。但是现实并非如此,这些电子设备正面临着日益复杂的电磁环境,它们受到外界的电磁危害也越来越多。如何有效地屏蔽外部电磁辐射和内部电磁泄漏,已成为当前航天领域和应用技术领域一个亟待解决的难题。当前常常采用的手段主要有屏蔽、滤波和接地。其中,电磁屏蔽因对电场与磁场这一垂直的矢量场具有良好的屏蔽效果,且不必接地的灵活特性而成为优先选择<sup>[1]</sup>。

电磁屏蔽是指利用屏蔽材料来阻断或衰减外部环境与被屏蔽区域之间电磁波的传播<sup>[2]</sup>。当电磁波传播至屏蔽材料表面时,一般是以3种不同形式分别依次进行衰减:1)表面直接反射:由材料表面阻抗突变引起的电磁波反射的部分;2)屏蔽材料吸收衰减:进入屏蔽材料内部的电磁波被屏蔽材料本身吸收的部分;3)屏蔽材料内多次反射衰减:未被吸收的电磁波在屏蔽材料中反复振荡引起衰减的部分<sup>[3-4]</sup>。电磁屏蔽材料对电磁场的屏蔽分为电场屏蔽和磁场屏蔽两部分,屏蔽效能(shielding efficiency, SE)分别按照以下公式进行计算<sup>[3-4]</sup>

$$SE_E = 20 \lg \left( \frac{E_0}{E_1} \right)$$

$$SE_H = 20 \lg \left( \frac{H_0}{H_1} \right)$$

式中,  $E_0$ ,  $E_1$  为有屏蔽和无屏蔽时场点的电场强度,  $H_0$ ,  $H_1$  为有屏蔽和无屏蔽时场点的磁场强度。表面直接反射的 SE 主要依赖于屏蔽材料中那些可

以移动的自由电子,自由电子浓度越高,屏蔽效能也越高,因此一般选取导电性强的物质作为屏蔽材料<sup>[5]</sup>。屏蔽材料吸收衰减的 SE 主要取决于材料中含有大量的电偶极子和磁偶极子,这须要材料具有大的介电常数、高的磁导率,以及大的电磁损耗<sup>[6]</sup>。这类原材料基本以过渡金属 Fe、Co、Ni 以及它们的合金为主。屏蔽材料内多次反射衰减的 SE 主要与材料的厚度相关。一般情况下,厚度增加会使这种衰减效果更明显;然而,从实际应用角度必须考虑到屏蔽材料的轻质化,所以不能太厚。如果能够找到一种材料,既能够有效屏蔽外部电磁辐射以及内部电磁泄漏,同时材料的质地又非常轻薄,就可能较好地解决这项难题。

近年来,二维材料成为材料物理领域研究的热点,指的是电子只在一个平面上自由运动,而在与这个平面垂直的方向上局域受限的材料。理论计算表明由于二维材料的特殊层状结构、能带结构、电子特性以及可受控平面结构,使其在屏蔽电磁辐射和吸波方面具有独特的优势;并且二维材料还有具有较高的轻质性,可以大幅度减小负荷,因此二维结构的材料已成为电磁屏蔽的优选材料<sup>[7]</sup>。但是绝大多数二维磁性材料的居里点远远低于室温,在室温下完全表现为顺磁性。且目前研究的很多二维材料,如  $\text{CrI}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  薄层,在空气中放置几分钟后就会完全降解,无法在实际器件中获得应用<sup>[8-9]</sup>,同时它们多伴随着半导体或绝缘性<sup>[10-11]</sup>。电磁屏蔽效能与材料的电导率和磁导率有关,因此,这些材料实际的屏蔽效果是有限的。

$\text{Cr}_x\text{Te}_y$  合金材是最近研究发现的一种新型二维结构材料,其在室温下不仅表现出明显的金属

性,同时具有很强的铁磁性,这与屏蔽电磁波中电矢量和磁矢量的要求非常契合<sup>[12]</sup>。更重要的是, $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 合金化学性质在室温潮湿的环境下也可以长期保持稳定<sup>[13-14]</sup>。 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 是由Cr元素和Te元素构成的二维结构的合金,其化学成分可随着 $x$ 和 $y$ 比例而变化,常见的有 $\text{CrTe}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Cr}_3\text{Te}_4$ 、 $\text{Cr}_3\text{Te}_8$ 、 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 等,居里温度在200 K到350K之间变化,同时此材料呈现良好的金属导电性<sup>[15]</sup>。介于 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 合金兼具高稳定性、低密度轻质性、高居里温度、高导电性等特性,使其可以应用到电磁屏蔽领域<sup>[16]</sup>。

## 1 材料制备和实验测量

使用脉冲激光沉积法(PLD)在 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 尺寸的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0001)取向的单晶衬底上生长 $\text{CrTe}_2$ 和 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 薄膜。首先,以化学计量比1:2和4:5为前提,采用高纯度99.999 9% Te粉和Cr粉,通过固相反应法合成并压制圆饼状的 $\text{CrTe}_2$ 和 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 靶材。然后,将反应腔抽至 $1\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 的真空度,靶材与衬底之间的距离均设置为8 cm,腔内温度升至 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 。射在靶材上的激光密度恒定为 $1.7\text{ Jcm}^{-2}$ ,出射激光频率恒定在5 Hz,打开激光使焦点落在靶材表面上,使得出射的羽辉尾巴正好落在衬底上,达到最好的沉积效果,然后将薄膜在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下退火1 h,温度降到室温后再取出。X射线衍射仪在宽范围 $10^\circ\sim 80^\circ$ 角度内扫描样品的 $2\theta$ 曲线,用来表征样品的结晶度和面外晶面取向,将样品用双面胶粘在X射线衍射仪的样品台上,采用连续扫描模式表征样品在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 角度范围内的 $\varphi$ 峰,展现了薄膜的面内六重对称取向。用原子力显微镜(Asylum Research MFP-3D-SA, AFM)在非接触轻敲模式下扫描薄膜的表面粗糙度。X射线光电子能谱(XPS)被用来分析表面的元素构成和价态。磁性测量系统(Quantum Design, MPMS 7 T-XL)用来测试样品的基本磁性性质,这里测试了变温( $0\sim 400\text{ K}$ )的磁化强度曲线和5 K固定超低温下变场( $\pm 1\text{ T}$ 和 $\pm 2\text{ T}$ )的磁滞回线。样品的电阻率和磁电阻随温度变化性质可以通过变温电阻测试仪器进行测量。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 晶格结构

首先,为了清楚展示 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 晶体的结构和所

对应的原子占位,以 $\text{CrTe}_2$ 和 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 为代表的结构示意图如图1所示。 $\text{CrTe}_2$ 是以Cr-Te-Cr三层基本单元沿 $c$ 轴堆垒而成的NiAs型六方结构。其中,相邻最近的Te层原子并非处于同样的晶体学位置,而是交替错落,形成了从垂直于 $ab$ 平面观测的Te六边形格,Cr原子点缀于六边形的正中央。各个三层基本单元之间的范德华间隙中没有被任何粒子占据,纯粹以层与层之间的范德华力紧衔连接。 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 以 $\text{CrTe}_2$ 的框架为基本结构,范德瓦耳斯间隙中3/5比例的空位被Cr原子占据,称为Cr空位层。注意,饱满占据的金属层与空位层中的Cr原子也处在两个晶体学上不同的位置,这种堆叠序位上的差异使其在直接观测的精密微观结构影像中更易被区分。因此,可以认为 $\text{Cr}_4\text{Te}_5$ 是严格的层状 $\text{CrTe}_2$ 范德瓦耳斯铁磁体的自插层化合物,嵌入的Cr层使得原本被范德瓦耳斯间隙隔开的Te层之间的距离变近,相邻 $\text{CrTe}_2$ 层间的耦合作用力更弱。

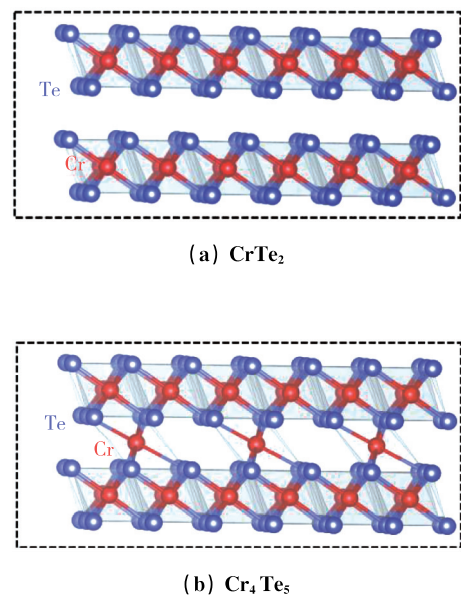


图1 微观晶格排列侧面示意图

Fig. 1 Microscopic crystal side configuration

### 2.2 结构表征

如图2(a)(b)中对 $\text{CrTe}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Cr}_4\text{Te}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜的面外 $\theta-2\theta$ 线性扫描所示,清晰且高耸的布拉格衍射峰表明薄膜是严格沿 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶轴方向生长,证明其在面外结构的单元层叠式排列。同时,插图中处于小角度掠射扫描的狭窄而尖锐的摇摆曲线峰是薄膜样品结晶度极好的强有力证明。值得注意的是,所有 $\text{Cr}_x\text{Te}_y$ 系统样品中的

(006) 衍射峰信号微弱到无法在曲线中体现, 这与  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  系列块材中 (006) 峰非常微弱的事实一致<sup>[17]</sup>。除此之外,  $\text{CrTe}_2$  与  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的最强衍射强度对应的 (222) 面和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底的 (104) 面, 面内  $\varphi$  衍射扫描谱也被展示在图 2 (c) (d)

中, 两者均存在  $60^\circ$  均匀间隔的 6 个峰, 且每一个峰中心角度都相同, 不仅符合 (222) -  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  系统和 (104) -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  蓝宝石衬底的面内六重对称结构, 还表明 (222) 取向的  $\text{CrTe}_2$  和  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜层与衬底层在平面内晶向相同并外延生长。

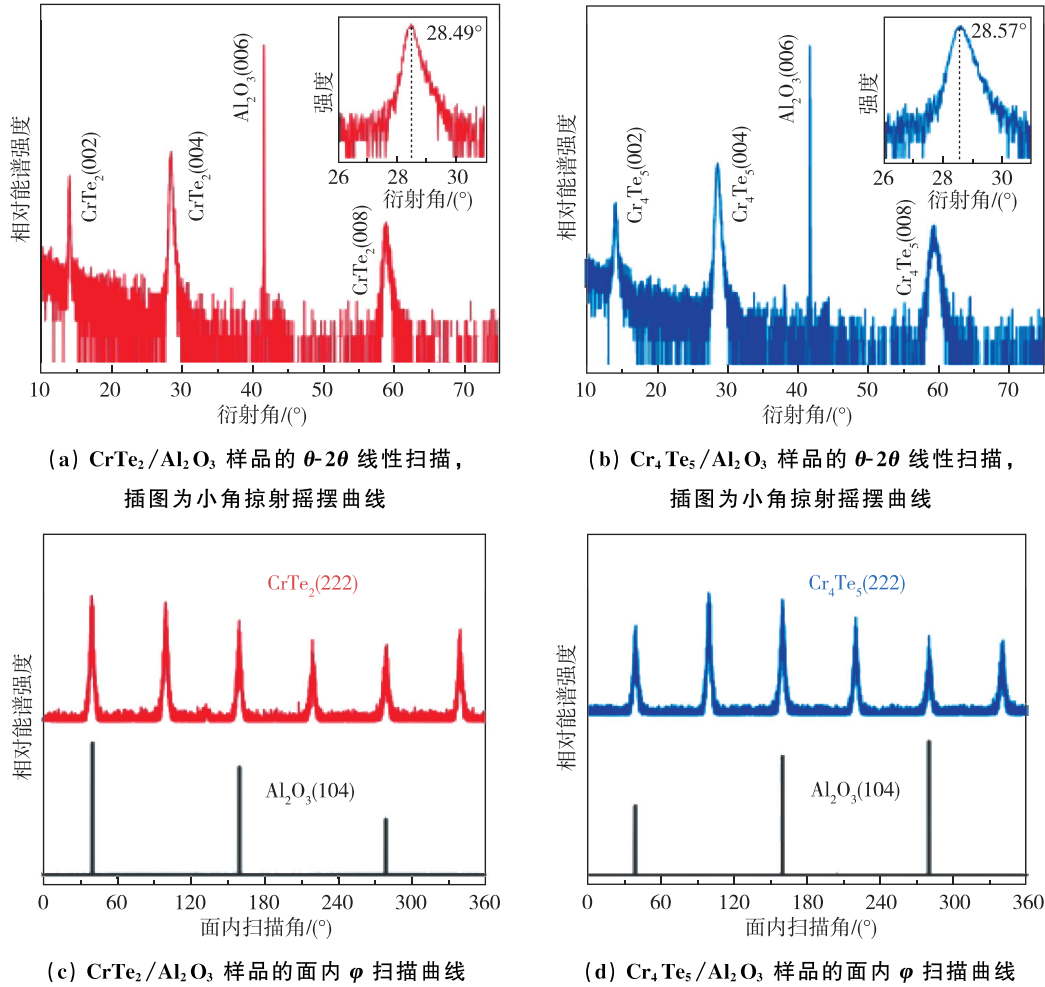


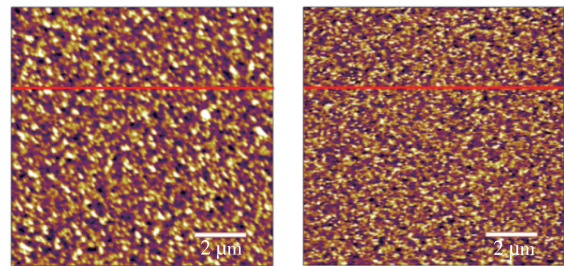
图 2 X 射线  $\theta$ - $2\theta$  线性扫描和面内沿着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底和薄膜  $\varphi$  扫描曲线

Fig. 2 XRD  $\theta$ - $2\theta$  scan results and the phi scans on the skew planes of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrate and film

### 2.3 表面形貌表征

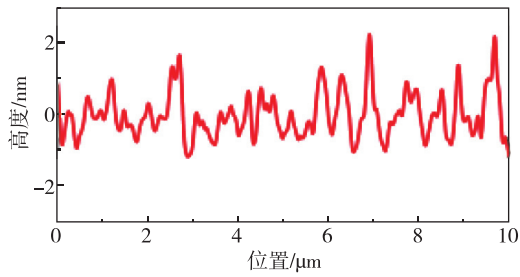
为了探究所制备的薄膜质量, 采用原子力显微镜 (AFM) 对薄膜的纳米尺度的表面形貌和结构进行了研究。图 3 (a) (b) 分别展现了  $\text{CrTe}_2$  和  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜致密的表面结构, 具有均匀的颗粒。整个测量区域为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的正方小格子, 均方根表面粗糙度约为  $1.5\ \text{nm}$ , 各点起伏度基本不超过  $2\ \text{nm}$ 。图 3 (c) (d) 分别对应沿图 3 (a) (b) 中红色实线测量的高度 (粗糙度) 剖面。最大高度差基本小于  $2\ \text{nm}$ , 说明制备的样品表面相对光滑和平整。基于一系列对结构和形貌的表征, 蓝宝石衬底上成功地生长出高质量单相  $\text{CrTe}_2$  和  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  铁磁性准层状

薄膜, 此质量良好且组分均匀的薄膜可为后续探索薄膜的磁电性质提供重要保证。

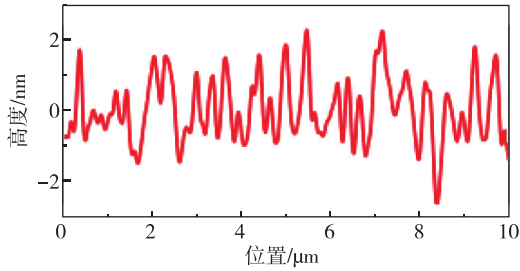


(a)  $\text{CrTe}_2$  薄膜  
AFM 扫描图像

(b)  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜  
AFM 扫描图像



(c)  $\text{CrTe}_2$  薄膜粗糙度随红色实线对应处高度变化

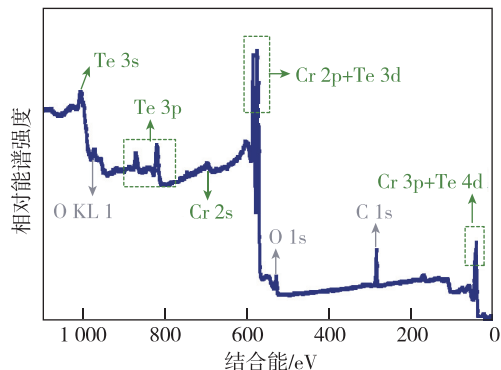


(d)  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜粗糙度随红色实线对应处高度变化

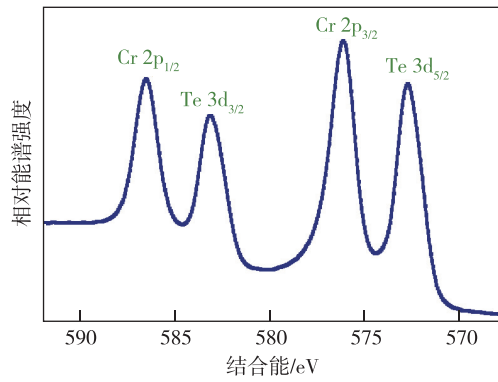
图 3 原子力显微镜图像

Fig. 3 AFM topographic images

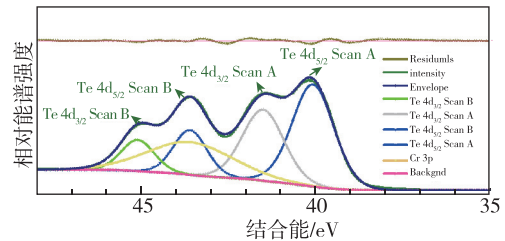
图 4 (a) 显示了  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的 XPS 光谱全谱, 横坐标为宽范围结合能, 纵坐标为接收光子强度, 其中 Cr、Te、O 的元素被证实存在于薄膜表面。同时在 530 eV 和 1 000 eV 的位置出现了两个小峰, 这两个峰都指向氧元素的贡献。由于 XPS 表征只局限在半定量层面, 因此这些微弱的峰表明目前的  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的表面氧化基本可以忽略, 揭示了  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜即使在室温较潮湿环境下依然能保持化学稳定性, 具有高稳定性。图 4 (b) 显示了 Cr 2p 和 Te 3d 峰在 600 eV 左右的放大 XPS 谱, 显示了薄膜表面的主要构成元素确实是 Cr 和 Te。详细的拟合结果如图 4 (c) 所示, 根据两者拟合峰值面积与两种元素分别对应的原子量的比值, 可以估算出 Cr : Te 的组成比。计算结果表明, Cr : Te = 44.26 : 55.74, 非常接近于  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  样品中 Cr : Te =



(a) X 射线光电子能谱大范围扫描结果



(b) 放大的 X 射线光电子能谱图



(c) X 射线光电子能谱拟合结果

图 4 X 射线光电子能谱图和拟合结果

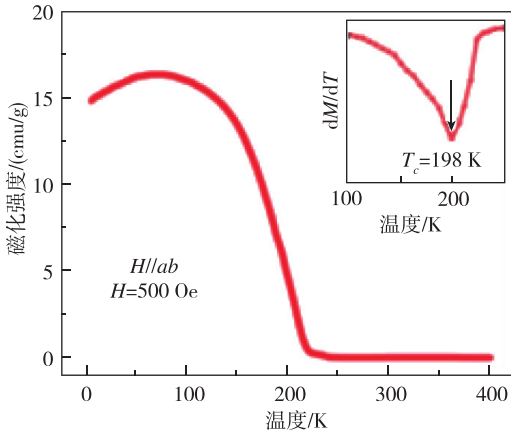
Fig. 4 XPS plot and the detailed fitting datas

4 : 5 的化学计量比。因此, 根据以上对于薄膜晶格结构、表面形貌和化学计量比的详细表征, 充分证明了生长的  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜是值得信赖的高质量的成分精准的样品, 为后续磁电性质的表征奠定了坚实的基础。

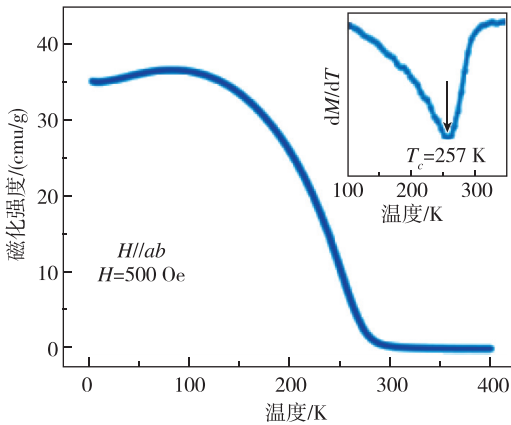
## 2.4 磁性表征

在之前的研究中, 发现  $\text{CrTe}_2$  与  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的易磁化轴均处在平行于薄膜表面的 ab 面内<sup>[16]</sup>。图 5 (a) (b) 分别展示了对  $\text{CrTe}_2$  与  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜在 500 Oe 恒定外场下的磁化强度-温度曲线, 由于低温对磁畴的热扰动强度降低, 两者均在 220 ~ 150 K 范围内显现出渐变的顺磁-铁磁态相变, 随后在温度降低至 80 K 时, 磁化强度产生回落趋势。居里温度从曲线的微分极大值中得到, 分别为 198 和 257 K, 相对于  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  和  $\text{Fe}_3\text{Ge}_2\text{Te}_2$  快材的居里温度分别为 64 K 和 200 K, 薄膜样品的居里温度值是比较高的<sup>[18-19]</sup>。同时表明对于相同厚度的样品, 随着 Cr 组分占比提高, 居里温度也随之提高。另外, 具有铁磁性的样品对电磁屏蔽具有良好的促进作用, 因此近乎室温 300 K 的居里温度也为  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  系统材料在电磁屏蔽和吸波领域中的应用提供了可能性。图 5 (c) (d) 分别展示了在 5 K 极低温下,  $\text{CrTe}_2$  与  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜在 2.0 T 外磁场之间的磁滞回线。两条

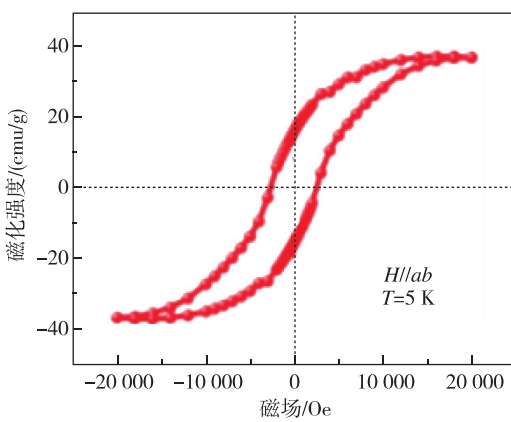
回路均在高磁场处达到饱和，饱和磁化强度分别为 38, 47 emu/g, 矫顽力分别为 3 000, 4 000 Oe, 剩余磁化强度分别为 15, 28 emu/g, 仅拥有微弱的增长趋势, 不存在量级上的明显差异<sup>[20]</sup>。



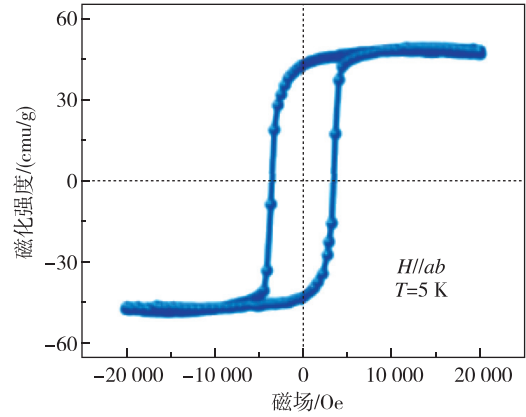
(a) CrTe<sub>2</sub> 薄膜磁化强度随温度变化曲线, 小插图对应其微分曲线



(b) Cr<sub>4</sub>Te<sub>5</sub> 薄膜磁化强度随温度变化曲线, 小插图对应其微分曲线



(c) CrTe<sub>2</sub> 薄膜在低温下等温磁化曲线



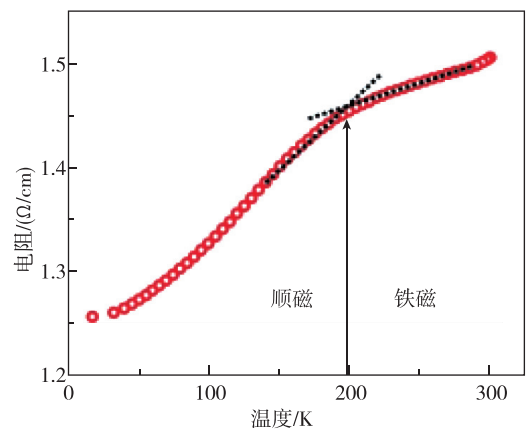
(d) Cr<sub>4</sub>Te<sub>5</sub> 薄膜在低温下等温磁化曲线

图 5 磁化强度随温度变化曲线和等温磁化曲线

Fig. 5 Temperature dependence of magnetization curve and the isothermal magnetization curves

### 2.5 电磁性质表征

为了进一步明晰薄膜样品中磁电运输的性质, 图6 (a) (b)分别展示了 CrTe<sub>2</sub> 与 Cr<sub>4</sub>Te<sub>5</sub> 薄膜在未施加外部磁场下的电阻率  $\rho$  与温度  $T$  演化关系曲线。在 50~250 K 温度范围内, 电阻率均随温度的下降而连续降低, 表现出明显的金属行为。鉴于金属态在  $\rho(T)$  曲线中的存在正好对应图 3 (a) (b)中铁磁-顺磁相变  $M(T)$  曲线 198 K 和 257 K 的居里温度, 对相变点附近的一部分曲线进行了非线性拟合。结果如图 6 (c) (d)表明, 在居里温度以上的顺磁相, 电阻与温度拟合最接近  $\rho \sim T^{4.5}$  关系式, 即低温处由电子-磁子散射机制主导, 而在居里温度以下的铁磁相, 电阻率与温度拟合最接近  $\rho \sim T^5$  关系式, 也就是更高温时电子-声子散射机制占主导地位<sup>[21]</sup>。同时图 6 (c) (d)拟合曲



(a) CrTe<sub>2</sub> 薄膜电阻-温度变化曲线

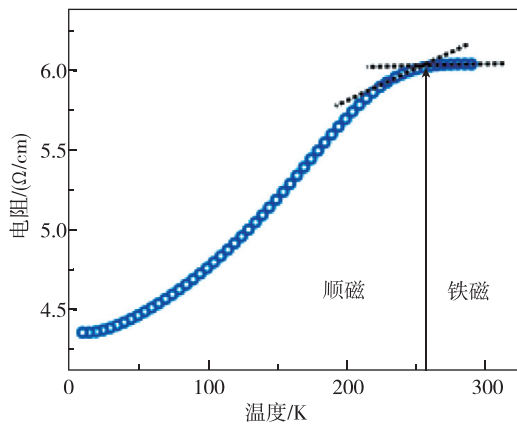
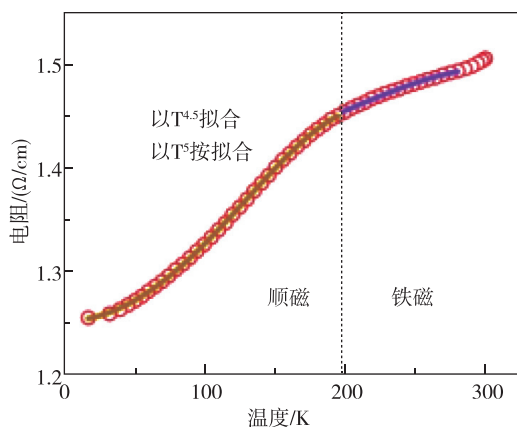
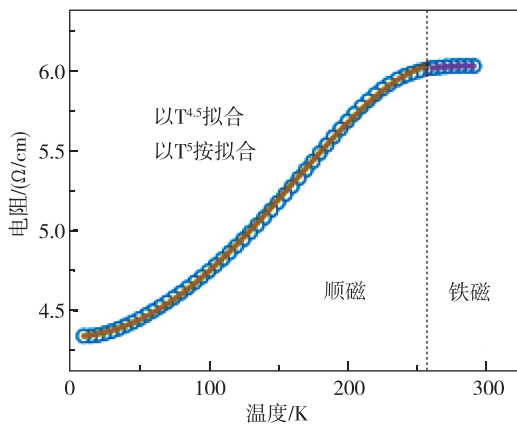
(b)  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜电阻-温度变化曲线(c) 对  $\text{CrTe}_2$  薄膜变温电阻曲线的拟合(d) 对  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜变温电阻曲线的拟合

图 6 电阻随温度变化曲线以及拟合结果

Fig. 6 Temperature dependence of resistivity curves and the fitting curves

线与实验测量结果近似完美的重叠, 暗示了  $\text{CrTe}_2$  与  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜在整个金属区的运输机制大多以电子-磁子和电子-声子相互作用为主。因此,  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜的弱铁磁特性可能起源于其他交换作用, 未来须要对  $\text{Cr}_4\text{Te}_5$  薄膜进行详细的电磁耦合研究。

然而, 上述事实已经为研究样品的潜在优异电磁屏蔽性能提供了绝佳的证明, 至室温 300 K 仍保留的长程铁磁序和特殊的磁性起源已经间接彰显了  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  系列薄膜在电磁屏蔽领域的出色效能。

### 3 结语与展望

综上, 本文从基本磁电行为的角度对  $\text{Cr}_x\text{Te}_y$  系列合金薄膜的电磁屏蔽性能进行了探讨, 其在室温下依然保留的长程铁磁序和独特的堆叠结构使其在电磁屏蔽领域表现优异, 且在室温潮湿环境下保持高度化学稳定性, 在 300 K 保有铁磁性, 也耐空气腐蚀。基于二维材料固有的轻质、小型化特点, 天生的对于电子自由度的约束、局域的量子化性质和原子级薄材料内部缺陷, 引伸出奇异的拓扑结构和性质。随着近年来二维材料成为研究人员关注的热点, 拥有范德瓦耳斯间隙的本征二维材料极大可能会成为下一代首选的电磁屏蔽材料。未来或许会在母体结构  $\text{CrTe}_2$  的范德瓦耳斯间隙中注入 Mn 或 Fe 离子, 以有效调控薄膜的磁电性质, 进而促进其电磁屏蔽效能, 使这一系列材料有效充当航空航天内存和芯片的保护膜, 降低运载负荷, 避免元件受到过的多电磁危害。

### 参考文献

- [1] 胡奋恩. 机载电子设备结构电磁屏蔽设计研究[J]. 长江信息通信, 2022, 35(8): 98-100.
- [2] 郭海伟, 李源, 毛胜辉. 方舱电磁屏蔽技术研究进展[J]. 现代防御技术, 2022, 50(4): 17-27.
- [3] 刘琳, 张东. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 功能材料, 2015, 46(3): 3016-3022.
- [4] 王帆, 张金才, 程芳琴. 电磁屏蔽涂料的研究进展[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1033-1040.
- [5] 黄晓莉. 泡沫 Fe-Ni 电磁屏蔽材料的设计与屏蔽机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 刘学宁, 王子寒, 袁美玉, 等. 石墨烯气凝胶的制备与电磁屏蔽研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(8): 252-257.
- [7] 王雨婷, 罗诗淇, 杨起帆, 等. 电磁屏蔽材料与结构的研究进展[J]. 纺织科技进展, 2022(3): 10-13, 36.
- [8] Zhang T M, Grzeszczyk M, Li J, et al. Degradation chemistry and kinetic stabilization of magnetic  $\text{CrI}_3$  [J]. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144(12): 5295-5303.
- [9] Zhao S, Caruso F, Dähne L, et al. The future of layer-by-layer assembly: a tribute to ACS nano asso-

- ciate editor helmuth möhwald[J]. ACS Nano, 2019, 13(6): 6151-6169.
- [10] 黎嘉威, 马泽南, 贺爱娜, 等. 金属电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(4): 93-108
- [11] 樊嘉诚, 袁文凤, 周爱国. 二维晶体  $Ti_3C_2T_x$  MXene 发射与屏蔽电磁波的研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2022, 43(1): 1-10.
- [12] 雷蕊英, 季三飞, 谭王景, 等. 石墨烯基电磁屏蔽材料研究进展[J]. 合成纤维, 2022, 51(2): 41-47.
- [13] 刘倩, 陈思安, 潘勇. SiC/CVD SiC 复合涂层的抗氧化及抗热震性能研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(2): 39-48.
- [14] 张瑾瑜, 雷豹, 杨东生, 等. 航天飞行器典型高温透波结构热匹配性能分析[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(3): 59-64.
- [15] 陈丽. CrTe 的交换耦合与磁性[J]. 功能材料, 2004, 35(3): 286-287, 290.
- [16] 黄猛. 二维铁磁材料  $CrTe_2$  的磁性及自旋输运研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [17] Li A L, Zhou W Z, Peng S L, et al. Half-metallicity and enhanced magnetism in monolayer T-CrTe<sub>2</sub> by lithium adsorption[J]. Physics Letters A, 2021, 394: 127195.
- [18] Gentile G. 2D ferromagnets for spintronics[D]. Politecnico di Torino, 2020.
- [19] Yang H H, Bansal N, Rüßmann P, et al. Magnetic domain walls of the van der Waals material  $Fe_3GeTe_2$  [J]. 2D Materials, 2022, 9(2): 025022.
- [20] Wang W Y, Fan J Y, Liu H, et al. Fabrication and magnetic-electronic properties of van der Waals  $Cr_4Te_5$  ferromagnetic films[J]. CrystEngComm, 2022, 24(3): 674-680.
- [21] Wang J, Wang W Y, Fan J Y, et al. Epitaxial growth and room-temperature ferromagnetism of quasi-2D layered  $Cr_4Te_5$  thin film[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(16): 165001.

引用格式: 张瑞菊, 余本伟, 胡大治, 等. 二维层状  $Cr_xTe_y$  超薄膜高效电磁屏蔽材料及其航天应用研究[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(3): 65-72.

Citation: Zhang R J, Yu B W, Hu D Z, et al. High efficiency electromagnetic shielding and the aerospace applications of two dimensional layered  $Cr_xTe_y$  ultrathin film [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(3): 65-72.