



拓扑超导体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶超导性能与磁通钉扎

梁超 张洁 赵可 羊新胜 赵勇

Superconducting and flux pinning properties of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ topological superconductors

Liang Chao Zhang Jie Zhao Ke Yang Xin-Sheng Zhao Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 237401 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201125

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201125>

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

BaO掺杂对单畴GdBCO超导块材性能的影响(二)

Influences of BaO doping on the properties of single domain GdBCO bulk superconductors (II)

物理学报. 2017, 66(16): 167401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.167401>

临界电流密度对圆柱状超导体力学特性的影响

Effects of critical current density on mechanical properties of cylindrical superconductors

物理学报. 2019, 68(18): 187402 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190759>

在人工拓扑超导体磁通涡旋中寻找Majorana零能模

Search for Majorana zero mode in the magnetic vortex of artificial topological superconductor

物理学报. 2019, 68(13): 137401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181698>

低能离子对高温超导 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -薄膜的表面改性和机理

Low-energy ion beam modified surface property and mechanism of high temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - thin film

物理学报. 2018, 67(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20170822>

基于Yu-Shiba-Rusinov态的拓扑超导理论

Theory of topological superconductivity based on Yu-Shiba-Rusinov states

物理学报. 2020, 69(11): 117401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200831>

高阶拓扑绝缘体和高阶拓扑超导体简介

Higher-order topological insulators and superconductors

物理学报. 2019, 68(22): 226101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191101>

拓扑超导体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶超导性能与磁通钉扎*

梁超¹⁾²⁾ 张洁¹⁾²⁾ 赵可^{1)†} 羊新胜²⁾ 赵勇²⁾

1) (西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

2) (西南交通大学超导与新能源研究开发中心, 成都 610031)

(2020年7月1日收到; 2020年8月12日收到修改稿)

铁基超导体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 由于其具有上临界场高、各向异性小、临界电流密度大等优点, 备受研究者的广泛关注. 本文采用自助溶剂法生长得到了几种 Se/Te 组分比例不同的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品, 对其结构和形貌进行了表征, 并且对样品在低温下的磁性进行了测量. 对样品超导态下临界电流密度、磁通钉扎力和磁场的关系进行了分析, 讨论了样品在低温下的磁通钉扎模式. 通过分析 Se 和 Te 的不同比例对上述性能的影响, 确定了超导性能最佳的组分, 为今后进一步研究 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 的超导与拓扑性质提供了参考.

关键词: $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$, 拓扑超导体, 临界电流密度, 磁通钉扎

PACS: 74.25.-q, 74.25.Wx

DOI: 10.7498/aps.69.20201125

1 引言

随着学者们对超导材料和超导物理的研究不断深入, 一系列新的超导材料家族不断被发现, 超导转变温度不断被刷新. 2008年, 日本科学家率先发现了铁基超导体^[1], 当时超导转变温度即达到 26 K^[2]. 此后我国科学家进行了大量的研究, 使得铁基超导材料的超导转变温度提高到 50 K^[3]. 铁基超导体为探索超导机理提供了一个新的平台: 高的上临界场、弱的各向异性和更大的相干长度(相对铜氧化物超导体而言)确保了这种材料的应用潜力^[4]. 作为铁基超导体家族中的重要一员, 铁硫族超导体 $\text{Fe}(\text{Se}/\text{Te})$ 由于其简单的晶体结构、易于合成等优点深受研究超导机理的学者们青睐. 而且相比于铁砷超导体来说, 以 $\text{Fe}(\text{Se}/\text{Te})$ 为代表的铁硫族超导体的毒性低, 更适合工业化应用^[5-7].

Fiamozzi Zignani 等^[8]报道的多晶 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 由于具有不均匀性以及大量的渗透作用, 因此其存在一定的缺陷, 这不利于对样品进行进一步研究. 但单晶样品可以很好地解决以上问题, 所以近年来的研究主要集中在单晶的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 材料中. 例如 Sun 等^[9]通过在不同气体氛围中退火来提高单晶样品的 T_c (超导转变临界温度), Abe 等^[10]用 Li 掺杂 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 研究材料的超导性, Rößler 等^[11]研究了 Fe 的过量对 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 晶体材料的 T_c 的影响, Yadav 等^[12]研究了 $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ 晶体材料的活化能电性能等材料性质, Cieplak 等^[13]通过 Fe 的过渡掺杂来研究晶体材料的输运性质. 磁通钉扎是超导材料性能的关键因素. 不同的超导材料, 甚至同一样品在不同温度不同磁场下, 磁通钉扎行为都有可能发生变换. 对于不同的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品, 磁通钉扎行为和机制有不同的报道: 如 Migita 等^[14]认为 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 单晶的钉扎是单涡

* 国家自然科学基金(批准号: 51271155, 51377138, 51877180)、国家重点研发计划(批准号: 2017YFE0301402)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032701)和四川应用基础研究项目(批准号: 2018JY0003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoke@swjtu.edu.cn

旋钉扎 (single vortex pinning), 而 Wu 等^[15] 分析认为 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 单晶的钉扎是由微小的正常态核主导的. Leo 等^[16] 报道 $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.68}\text{Se}_{0.32}$ 单晶的钉扎模式符合 Dew-Hughes 模型中的 δT_c 体钉扎 (亦即 Dew-Hughes 所谓的 $\Delta\kappa$ 体钉扎). 对于 Se/Te 比例变化的系列样品的研究很少有报道, 前面提到的 Wu 等^[17] 在另外一篇报道中分析了不同组分的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品的钉扎行为, 但是并未测量临界电流和使用 Dew-Hughes 模型进行分类, 而是根据电阻率在超导转变温区的行为, 对磁通钉扎的热激发能量进行了分析.

本文对不同组分的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品的钉扎行为进行了进一步的研究, 对通过自助溶剂法生长的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶进行结构分析、形貌分析和磁性测量, 通过输运和磁测量, 分析了临界电流与钉扎力随外磁场的变化, 通过 Dew-Hughes 模型对样品的磁通钉扎行为进行了讨论

2 实验

本实验所用单晶样品采用自助溶剂法生长. 首先将高纯的 Fe 粉, Se 粉, Te 粉 (99.999%) 按名义分子式 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 的原子比配备原料. 在充满惰性气体的手套箱中研磨一个小时使其混合均匀, 然后压成 1 g 左右的小圆片. 然后将成型样品放入坩埚中再密封于抽真空的石英管中. 将石英管放在箱式炉中以 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度加热到 $1070\text{ }^\circ\text{C}$, 接着降温到 $420\text{ }^\circ\text{C}$ 并保温 90 h, 最后冷水淬火, 就得到了单晶样品.

本文使用荷兰帕纳科公司生产的 X 射线粉末衍射仪 (Cu 靶, 波长: 0.15418 nm , 扫描步长: 0.013°) 来表征样品结构. 采用日本电子公司型号为 JSM-7800 F 的扫描电子显微镜 (SEM) 来观察样品的形貌. 测量磁性能使用美国 Quantum Design 公司的综合物性测量系统 (MPMS).

3 结果与讨论

$\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 样品的晶体结构由 X 射线衍射仪测定, 如图 1(a) 所示. 可观察到所有的衍射峰与 $(0\ 0\ L)$ 晶面族吻合, 并且衍射峰很强, 没有看到杂相. 考虑到 X 射线衍射装置的设置, 这说明样品具有很好的单晶性且 c 轴垂直于样品台, 样品均都属于四方结构, 其空间群为

$P4/nmm$ (129). 从图 1(b) 中可以清楚地看到, 随着样品 Se 含量的减小, 其对应的衍射峰向着小角度方向移动, 这一结果与文献 [18] 报道的研究结果一致. 导致这一结果的原因是 Te^{2+} 离子半径为 221 pm , 然而 Se^{2+} 离子半径为 198 pm , 所以 Te 增加 Se 减少使得晶胞变大. 晶格参数 c 随着 Te 含量的变化 (图 1(c)) 也符合这一趋势: 除了 $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ 样品外, 其他三个样品晶格参数 c 随着 Te 含量的变化是一致的, 这也与文献 [19,20] 的报道一致.

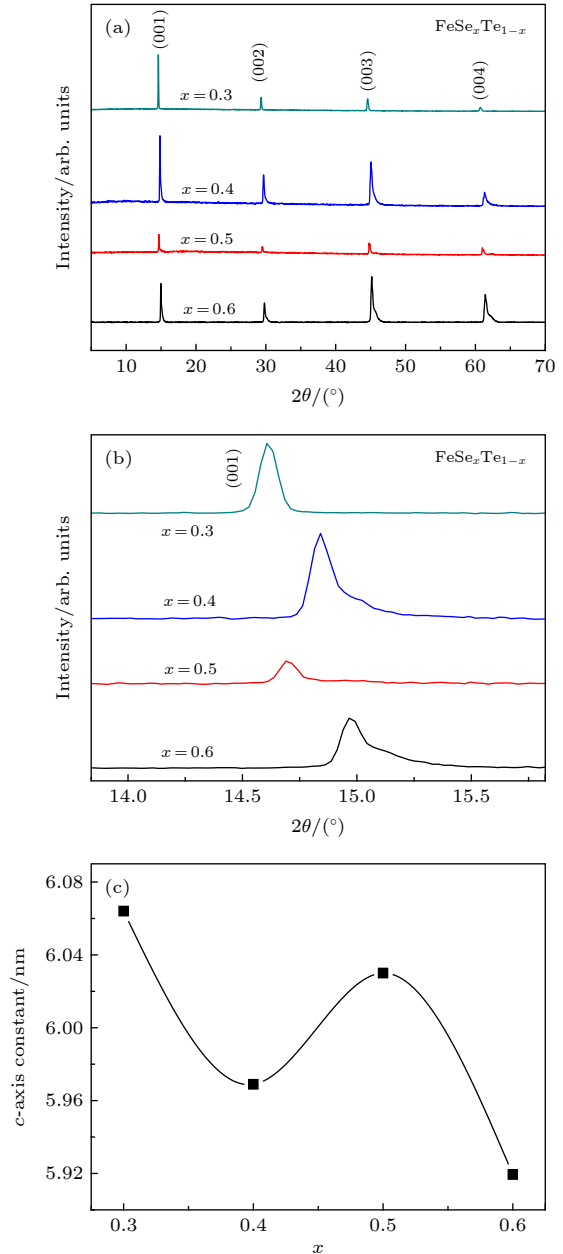


图 1 (a) $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品 X 射线衍射图谱; (b) (001) 随组分比例 x 的变化; (c) 晶格参数 c 随 x 的变化

Fig. 1. (a) X-ray diffraction pattern of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ single crystal sample; (b) the (001) peak shifts with changing x ; (c) lattice parameter c changes with Se content x .

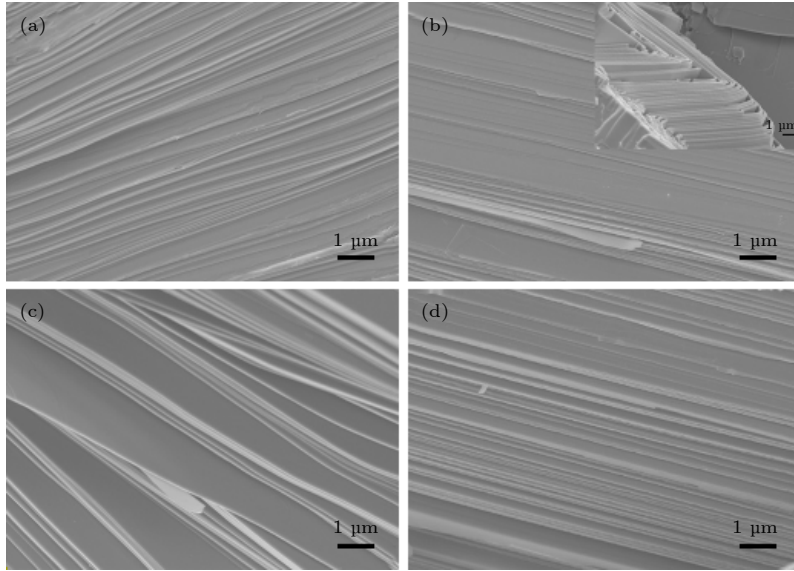


图 2 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品的 SEM 图谱 (a) $x = 0.3$; (b) $x = 0.4$; (c) $x = 0.5$; (d) $x = 0.6$, 其中 (b) 图右上角为同一样品的另一个区域
Fig. 2. SEM images of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ samples: (a) $x = 0.3$; (b) $x = 0.4$; (c) $x = 0.5$; (d) $x = 0.6$. The upper right corner of Fig. (b) is another region of the same sample.

图 2(a)—(d) 给出一系列 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 样品解理面的 SEM 图像。所有的样品都呈现了层状结构。但是, 可以看到 $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ 样品 (图 2(b)) 存在一个特别的形貌, 该形貌显示存在双边界分层结构。这一结果说明该样品中存在更多的晶体缺陷, 这也可能是该样品晶格参数比其他样品稍有异常的原因。这也说明 $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ 样品在传输电流方面与其他三个样品可能存在不同的行为, 在分析输运性质时将考虑这一点。

图 3 是不同 Se 含量的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品分别在零场冷 (ZFC) 和场冷 (FC) 模式下测得的 4 K 到 20 K 磁化强度温度 ($M-T$) 曲线。可以看到所有 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品的 ZFC 模式都有一个清晰的跃迁, 并且在低温下有显著的抗磁性。同时它们的 ZFC 和 FC 曲线在转变温度以上重合表明了样品的泡利顺磁性^[21]。这些是第二类超导体的特征行为, ZFC 曲线的跃变对应了超导相变。从图 3 可以确定 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品的超导转变温度分别为 13.24 K ($x = 0.3$), 15.73 K ($x = 0.4$), 14.38 K ($x = 0.5$) 和 13.64 K ($x = 0.6$)。同时可以看出 $x = 0.4$ 和 $x = 0.6$ 这两个样品具有相对于另外两个样品的较大的单位质量磁矩, 表明 $x = 0.4$ 和 $x = 0.6$ 这两个样品的超导成分比例较高。 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品中随着 Se 含量的增大超导转变温度并没有一致地上升或下降, 这可能是因为 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品中存在对超导性而言最佳的 Se-Te 比例。可估

计这个最佳值大约在 $x = 0.4-0.5$ 之间, 与之前的报道^[22]一致。

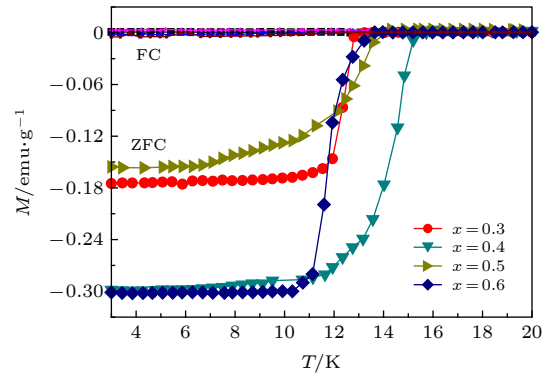


图 3 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 样品的磁化强度-温度 (ZFC, FC) 曲线

Fig. 3. $M-T$ (ZFC, FC) curves of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) samples.

$\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品在磁场平行于晶体 c 轴时的不同温度下的磁滞回线 ($M-H$ 曲线) 见图 4, 温度分别是 2 K 和 4 K。4 个样品的磁滞回线均表现出第二类超导体的典型行为。这些样品适合 Bean 临界态模型^[23]。根据 Bean 模型可以确定这种长方体样品的临界电流密度 J_c ^[24]:

$$J_c = 20 \frac{\Delta M}{a(1-a/3b)}, \quad (1)$$

式中, a 和 b 为样品横截面的边长, 且 a 小于 b 。磁滞回线的宽度 $\Delta M = M^+ - M^-$, 其中 M 和 M^+ 分别为升场和降场时的磁化强度。根据 (1) 式得出

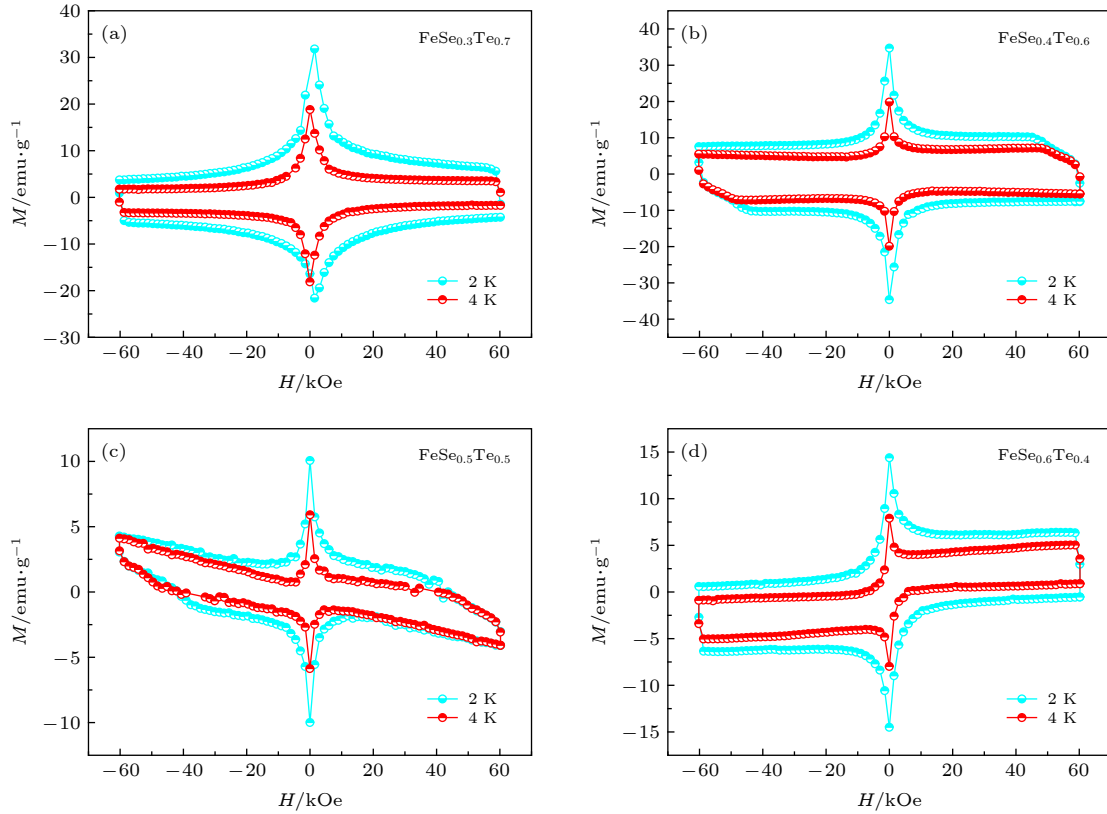

 图 4 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品在磁场平行于样品 c 轴时不同温度下的磁滞回线 (a) $x = 0.3$; (b) $x = 0.4$; (c) $x = 0.5$; (d) $x = 0.6$

 Fig. 4. Hysteresis loops of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ samples at different temperatures under the field parallel to c axis: (a) $x = 0.3$; (b) $x = 0.4$; (c) $x = 0.5$; (d) $x = 0.6$.

的临界电流密度 (J_c) 和磁场的关系见图 5, 在低温下和低场下的 J_c 达到了 10^5 A/cm^2 , 表明相应样品具有较好的超导性能.

从图 5 可以看出, $x = 0.4$ 和 0.5 时, 两个样品的临界电流密度比另外两个组分的样品要明显高一些, 特别是在温度为 4 K, 磁场大于 1 T 的时候表现得最为明显. 其中 $x = 0.4$ 样品的临界电流密度最大, 表明这个组分最接近超导性能最佳的 Se-Te 比例. 超导材料临界电流密度与磁通钉扎力密度有关, 磁通钉扎力密度 (F_p) 可由临界电流反推得到, 如 (2) 式所示:

$$F_p = J_c H. \quad (2)$$

图 5(c),(d) 是分别在 2 K 和 4 K 的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品的磁通钉扎力密度曲线, 可以看到 $x = 0.4$ 组分样品具有较大的峰面积, 表示在整个磁场范围具有较强的磁通钉扎能力.

根据 Dew-Hughes 模型, 钉扎力密度与磁场之间的关系为:

$$F_p = Ah^p(1-h)^q, \quad (3)$$

式中, A 为比例系数, h 为约化磁场, 定义为 H/H_{irr} .

这 4 个样品的不可逆场 (H_{irr}) 估计都在 10 T 以上, 大大超过了实测磁场的范围. 根据文献 [16,25] 报道, 可以通过 Kramer 图中 $J_c^{1/2}H^{1/4}$ 与磁场的关系外推出 J_c 为零时的不可逆场. 通过这种办法可以确定 $x = 0.4$ 和 $x = 0.5$ 这两个样品在 2 K 和 4 K 下的不可逆场, 介于 10—12 T 之间.

Dew-Hughes 模型中 p, q 为与钉扎机制有关的两个参数. 6 种典型钉扎模型对应的值为: a) 正常点钉扎 $p = 1, q = 2$; b) 正常面钉扎 $p = 0.5, q = 2$; c) 正常体钉扎 $p = 0, q = 2$; d) $\Delta\kappa$ 点钉扎 $p = 2, q = 1$; e) $\Delta\kappa$ 面钉扎 $p = 1.5, q = 1$; f) $\Delta\kappa$ 体钉扎 $p = 1, q = 1$.

通过对样品的 F_p/F_p^{\max} 和 h 的关系曲线拟合 Dew-Hughes 公式, 得到的相应参数如表 1 所示.

 表 1 F_p-h 曲线的 Dew-Hughes 公式拟合参数值
Table 1. Fitted parameters of F_p curves.

	$T = 2 \text{ K}$			$T = 4 \text{ K}$		
	p	q	F_p 峰位	p	q	F_p 峰位
$x = 0.4$	1.647	2.461	0.4013	1.996	2.233	0.4654
$x = 0.5$	1.632	2.870	0.3552	2.001	2.335	0.4398

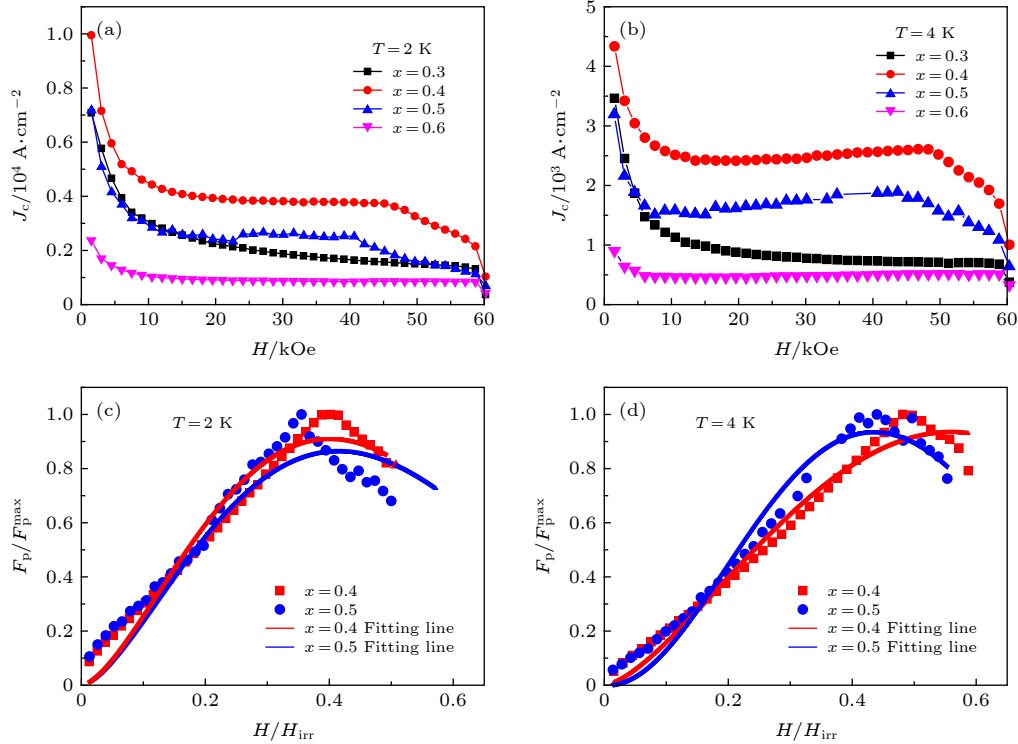


图 5 (a), (b) 不同 Se 含量的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品的 J_c - H 曲线 (a) $T = 2$ K, (b) $T = 4$ K; (c), (d) 不同 Se 含量的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 样品归一化的钉扎力密度和约化磁场的关系 (c) $T = 2$ K, (d) $T = 4$ K

Fig. 5. J_c - H curves of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ samples with different Se contents: (a) $T = 2$ K, (b) $T = 4$ K; F_p/F_p^{\max} - normalized field curves: (c) $T = 2$ K, (d) $T = 4$ K.

拟合得出的 p , q 值并不符合任何一种模型, 很大程度上是受实验数据的涨落影响, 也和数据并未涵盖整个不可逆场以下的范围有关, 这在其他超导材料中也有类似报道^[26,27]. 分析钉扎力密度的峰值位置可以看出, $x = 0.4$ 和 $x = 0.5$ 这两个样品的峰值位置处于 $h = 0.35$ — 0.47 之间, 介于 Dew-Hughes 理论的正常点钉扎 (0.33) 和 $\Delta\kappa$ 体钉扎 (0.5) 这两个模式之间. 所以可以认为实际的钉扎模式是这二者的混合, 甚至更多模式的混合. 比如本研究不能排除样品中有铁磁性的杂质区域, 所以也有可能存在正常态磁性钉扎, 根据 Dew-Hughes 理论也会产生峰位在 0.33 的效果. Se 的含量从 0.4 增大到 0.5 的过程中, 正常态点钉扎的贡献上升, 而 $\Delta\kappa$ 体钉扎的贡献相对下降. 而温度从 4 K 下降到 2 K, 也能看到类似的现象. 正常态的钉扎中心或者磁性钉扎中心并不会随温度变化而变化, 但是 Ginzburg-Landau 参数 κ 的差异在温度越低的时候越小, 所以 $\Delta\kappa$ 钉扎的贡献变小, 体现在钉扎力密度的峰位朝 0.33 移动. 这也从另一个侧面验证了样品中钉扎类型的确是正常点钉扎和 $\Delta\kappa$ 体钉扎的混合. 此前关于 $\text{Fe}(\text{Se}/\text{Te})$ 单晶的钉

扎行为的研究中, 也指出了正常点钉扎和 $\Delta\kappa$ (或更具体一点, 称为 ΔT_c) 体钉扎两种情况^[15,16]. $x = 0.3$ 和 0.6 两个组分的样品钉扎力与磁场呈现出近似线性关系, 这有可能是它们的不可逆场过大, 测试难以探索钉扎行为的全貌.

4 结 论

本文采用自助溶剂法生长得到了 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 单晶样品, 所有的 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 晶体样品具有明显的层状结构, 并且较易解离出平面光滑平整的晶体薄片. 在 $x = 0.4$ 组分的样品中, 发现了孪晶的存在, 从而表明该样品中存在晶体缺陷. 其他样品晶格参数 c 随 Te 的含量增大而增大, 与半径较大的 Te 原子替代 Se 原子的设想一致. 根据低温下磁性的测量, Se 元素在 Se/Te 中的占比在 0.4 到 0.5 之间的样品的超导转变临界温度高于其他样品. 所有的样品均呈现出典型的第二类超导体的磁滞回线, Se 占比为 0.4 和 0.5 的样品具有较高的临界电流密度, 特别是 $x = 0.4$ 的样品具有最大的磁通钉扎强度. 这说明有可能 Se/Te 的最佳比例在 0.4/0.6

附近, 这对进一步研究这类材料的超导性质和拓扑性质具有重要的意义. 同时分析了最佳比例组分附近的样品的磁通钉扎行为, 认为磁通钉扎的模式是正常态点钉扎和 $\Delta\kappa$ 体钉扎的混合.

参考文献

- [1] Kamihara Y, Hiramatsu H, Hirano M, Kawamura R, Yanagi H, Kamiya T, Hosono H 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 10012
- [2] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, Hosono H 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [3] Xu G X, Huang H, Zhang X P, Huang S Y, Ma Y M 2018 *Acta. Phys. Sin.-Ch. Ed.* **20** 67
- [4] Wu Z F, Wang Z H, Tao J, Qiu L, Yang S G, Wen H H 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 035006
- [5] Tapp J H, Tang Z, Lv B, et al. 2008 *Phys. Rev. B* **78** 060505
- [6] Yuan F, Iida K, Grinenko V, Chekhonin P, Pukenas A, Skrotzki W, Sakoda M, Naio M, Sala A, Putti M, Yamashita A, Takano Y, Shi Z, Nielsch K, Hühne R 2017 *Aip. Adv.* **7** 065015
- [7] Bao W, Qiu Y, Huang Q, Green Q M, Zajdel P, Fitzsimmons M R, Zhernenkov M, Chang S, Fang M, Qian Q, Vohstedt E Q, Yang J, Pham H M, Spinu L, Mao Z Q 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 247001
- [8] Fiamozzi Zignani C, De Marzi G, Corato V, Mancini V, Vannozzi A, Rufoloni A, Leo V, Guarino A, Galluzzi A, Nigro A, Polichetti M, della Corte A, Pace S, Grimaldi G 2018 *J. Mater. Sci.* **132** 84084
- [9] Sun Y, Tsuchiyab Y, Yamadab T, Taenb T, Pyonb S, Shia Z X, Tamegai T 2014 *Physica C* **113** 8656
- [10] Abe H, Noji T, Kato M, Koike Y 2010 *Physica C* **980** 8579
- [11] Rößler S, Cherian D, Harikrishnan S, Bhat H L, Elizabeth S, Mydosh J A, Tjeng L H, Steglich F, Wirth S 2010 *Phys. Rev. B* **82** 144523
- [12] Yadav C S, Paulose P L 2009 *New J. Phys.* **11** 103046
- [13] Cieplaka M Z, Bezusyaya V L 2015 *Philos. Mag.* **1478** 6435
- [14] Migita M, Takikawa Y, Takeda M, Uehara M, Kuramoto T, Takano Y, Kimishima Y 2011 *Physica C* **471** 916
- [15] Wu Z F, Wang Z H, Tao J, Qiu L, Yang S G, Wen H H 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 4
- [16] Leo A, Guarino A, Grimaldi G, Nigro A, Pace S, Bellingeri E, Giannini E 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **507** 012029
- [17] Wu Z, Tao J, Xu X, Qiu L, Yang S, Wang Z 2016 *Physica C* **528** 39
- [18] Zhuang J C, Yeoh W K, Cui X Y, Xu X, Du Y, Shi Z X, Ringer P S, Wang X I, Dou S X 2014 *Sci. Rep.-Uk.* **4** 7273
- [19] Gomez K W 2010 *J. Nov. Magn.* **23** 551
- [20] Imai Y, Sawada Y, Nabeshima F, Maeda A 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **122** 193
- [21] Wang A F, Ying J J, Yan Y J, Liu R H, Luo X G, Li Z Y, Wang X F, Zhang M, Ye G J, Cheng P, Xiang Z J, Chen X H 2011 *Phys. Rev. B* **83** 060512
- [22] Yeh K W, Huang T W, Huang Y I, Chen T K, Hsu F C, Wu P M, Lee Y C, Chu Y Y, Chen C L, Luo J Y, Yan D C, Wu M K 2008 *Europhys. Lett.* **84** 37002
- [23] Bean C P 1994 *Rev. Mod. Phys.* **36** 31
- [24] Kumar R, Sudesh, Varma G D 2018 *Aip. Adv.* **8** 055819
- [25] Bonura M, Giannini E, Viennois R, Senatore C 2012 *Phys. Rev. B* **85** 134532
- [26] Shen B, Cheng P, Wang Z S, Fang L, Ren C, Shan L, Gu C Z, Wen H H 2010 *Phys. Rev. B* **81** 014503
- [27] Galluzzi A, Buchkov K, Nazarova E, Tomov V, Grimaldi G, Leo A, Pace A, Polichetti M 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 233904

Superconducting and flux pinning properties of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ topological superconductors*

Liang Chao¹⁾²⁾ Zhang Jie¹⁾²⁾ Zhao Ke^{1)†} Yang Xin-Sheng²⁾ Zhao Yong²⁾

1) (*School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

2) (*Superconductivity and New Energy R & D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

(Received 1 July 2020; revised manuscript received 12 August 2020)

Abstract

Iron-based superconductor $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ has attracted attention because of its high upper critical field, low anisotropy, and high critical current density. Also, it is predicted to have nontrivial topological properties, so that it is a candidate of realizing Majorana fermion, when the superconductivity is combined with topological features. However, its flux pinning behavior and mechanism in superconducting state with varying Se/Te ratio have not been systematically studied. We use self-flux method to grow single crystal samples of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ with different x values (0.3, 0.4, 0.5 and 0.6). The structural and morphological properties of the monocrystalline samples are characterized by XRD and SEM. All samples show that they possess the expected crystalline structures and their lattice parameters vary with x value. The magnetic properties at low temperatures are also measured, showing that all samples have good superconductivity. Superconducting properties, such as critical current densities and flux pinning force densities, are extracted from the magnetic measurements and analyzed, and the flux pinning behavior is discussed. The best Se:Te ratio is determined to be nearly 0.4/0.6 based on the comparison among these properties of different samples. By utilizing the Dew-Hughes theory and analyzing the pinning force density peak, the flux pinning mechanism in the best samples ($x = 0.4, 0.5$) can be regarded as the mixture of normal point pinning and $\Delta\kappa$ volume pinning. This work provides important information for the further study of the topological and superconducting properties of $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$.

Keywords: $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ topological superconductor, flux pinning, critical current density

PACS: 74.25.-q, 74.25.Wx

DOI: 10.7498/aps.69.20201125

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51271155, 51377138, 51877180), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFE0301402), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032701), and the Sichuan Applied Basic Research Project, China (Grant No. 2018JY0003).

† Corresponding author. E-mail: zhaoke@swjtu.edu.cn