

11 体系铁基超导材料实用化研究进展

晏晨¹, 杨芳¹, 刘吉星², 贺一轩¹, 张胜楠², 王大友³, 闫果^{1,3}, 张平祥^{1,2}

(1. 西北工业大学 超导材料与应用技术研究院, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(3. 西安聚能医工科技有限公司, 陕西 西安 710028)

摘要: 自被发现以来, 铁基超导体因其较高的临界电流密度、较低的各向异性以及极高的上临界磁场而受到科学家们的广泛关注, 具有极好的应用前景, 同时也是研究高温超导机制的重要抓手。“11”体系作为结构最简单的铁基超导材料, 其不含有毒元素 As 以及对掺杂敏感等特点使其成为领域内的研究热点。本文从线带材、涂层导体和薄膜 2 个角度综述了“11”体系铁基超导材料实用化的研究进展。

关键词: 铁基超导; 线带材; 薄膜材料

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)07-2059-08

超导材料因其零电阻和完全抗磁等特性而具有传统材料不可比拟的应用潜力。其中高温超导体在核磁共振、核聚变等高场领域具有极大优势^[1]。铁基超导材料作为自铜基超导材料后的又一个“高温超导家族”, 自被发现以来, 研究热度一直不减^[2]。铁基超导体为理解非常规超导电性提供了极大的可能性, 这对解释铜氧化物超导体的机理有很大帮助^[3]。在所有铁基超导材料体系中, “11”体系是铁基超导体中晶体结构最简单并且不含有毒前驱体元素 As 的体系, 因而在实用化方面具有极大优势, 受到广泛研究^[4]。“11”体系的代表化合物为 FeSe, 晶体是仅由超导层组成的四方层状结构, 临界温度在 8 K 左右^[5], 在高压下临界转变温度最高可达 38.5 K^[6]。其母体化合物本身具有超导电性, 不像其他铁基超导体需要 K、F 等掺杂来诱导超导电性。可用 Te 元素取代部分 Se 元素引入负的化学压力^[7], 获得更好的超导性能。Fe 的含量以及 Se/Te 的比值的微小改变都能对其超导电性产生影响, 即该体系超导材料的性能对成分变化非常敏感^[8-9]。该体系超导机理目前尚不明确, 其机理研究主要受限于难以制得高质量大尺寸的单晶^[10]。

“11”体系铁基超导材料的发展历程见图 1。根据现有研究, “11”体系的本征临界电流密度超过 10^6 A/cm², 本征上临界场超过 50 T, 这些性能已经能够满足低温下的实际应用。但该体系材料的制备工艺仍不够成熟因而实际性能与本征值存在一定差距, 以临界电流密度举例, 该体系的线带材临界电流密度最高达到 10^4 A/cm² 数量

级, 与实用化门槛值 10^5 A/cm² 还有 1 个数量级的差距。“11”体系的实用化进展仍存在不少阻碍, 研究人员从不同角度提出了许多优化工艺的方法来克服困难。本文将从超导线带材、涂层导体和薄膜 2 个角度, 综述近些年来研究人员取得的一些研究成果。

1 “11”体系线带材的制备

高温超导材料的线带材一般采用粉末装管法 (PIT) 制备, PIT 根据前驱体的不同可以分为原位法 (in-situ) 和先位法 (ex-situ) 2 种。其中原位法采用均匀混合的初始粉末, 先拉拔成型后烧结成相, 制备过程简单, 但烧结后的超导芯通常含有大量的杂质相, 且热处理过程中需要避免超导芯丝与包套发生化学反应, 对材料的化学稳定性要求极高。此外, 原位法还存在芯丝密度低的问题, 进而影响临界电流密度。先位法采用先烧结成相的超导粉末进行装管, 后进行拉拔成形。成形后通常采用一步退火工艺, 可有效改善晶粒连通性, 避免原位法中化学反应产生的孔洞。为了提高前驱体粉末的相纯度, 可以重复多次研磨和烧结步骤, 优点在于所得线带材的超导相纯度更高并且其超导芯具有更高的致密度^[11]。

“11”体系的超导线带材最先由日本国立材料研究所 Mizuguchi 等人在 2009 年制备成功^[12], 该小组通过原位法, 结合退火扩散方法, 选取 Fe 作为包套材料, 轧制拉拔成线材后进行烧结, 再将线材密封在石英管中, 在

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金 (52372259); 第八届中国科协青年人才托举工程 (2022QNRC001)

作者简介: 晏晨, 男, 2000 年生, 硕士生, 西北工业大学超导材料与应用技术研究院, 陕西 西安 710072, E-mail: m16679018818@163.com

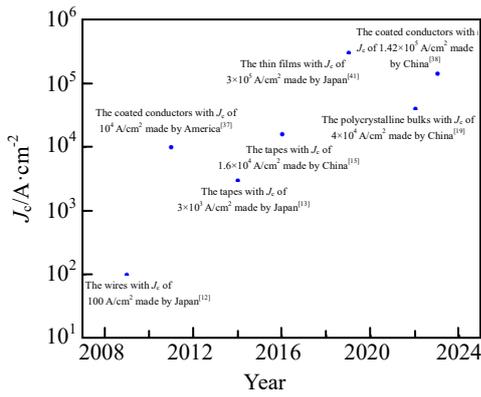


图 1 “11”体系铁基超导材料的发展历程

Fig.1 Development of 11 system iron-based superconducting materials

氩气气氛下 700 °C 加热 2 h。如此制得了最早的超导线材，该合成方法较简单便捷。制得的线材经测试在 4.2 K 的温度下临界电流密度为 100 A/cm²。该小组分析实验结果发现通过改善晶粒连接性、引入钉扎中心和制备多芯线可以提高超导线材的临界电流密度。

在 2014 年，日本东京都立大学的 Izawa 等人^[13]采用了一种基于化学相变的粉末装管工艺，主要目的是解决 PIT 过程中普遍存在的相分离的问题，从而使超导性能得到提升。该组按照 Fe:Te:Se=1.00:0.56:0.84 的比例制备了六方相的前驱粉，然后装入 Fe 管中，通过不同的退火工艺将其转化成超导的四方相 FeTe_{0.4}Se_{0.6}。不同热处理工艺后得到材料的 X 射线衍射图像如图 2 所示。由图可见热处理工艺会极大影响超导芯丝的相转变，在合适的

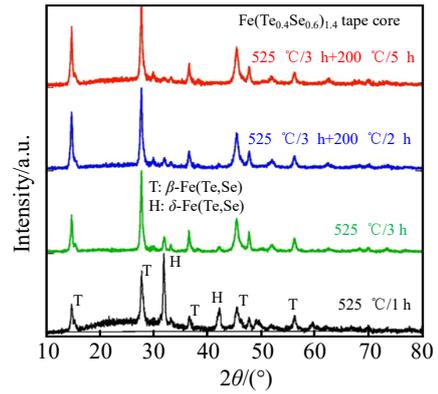


图 2 不同热处理工艺所得 Fe(Te,Se) 的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of Fe(Te,Se) obtained by different heat treatment processes^[13]

热处理工艺下几乎能使所有不超导的六方相转变为超导的四方相。得到的最好性能的带材临界电流密度达到 3.0×10^3 A/cm² (4.2 K, 自场)。

另外，包套材料的选择对于粉末装管法制备铁基超导线带材的影响也不小。意大利热那亚大学的 Palombo 等人^[14]在 2015 年探究了用先位粉末装管法制备 Fe(Te,Se) 导体的可能性，研究了多种包套材料对 Fe(Te,Se) 性能的影响，包括 Fe、Cu、Ag、Nb、Ni 等金属。在选择包套材料时他们考虑了熔化温度、延展性以及和超导 (superconducting, SC) 相的化学相容性等，选用合适的包套材料后在 700~850 °C 下进行热处理，然后观察各包套材料线材横截面的微观结构，如图 3 所示。由图中可

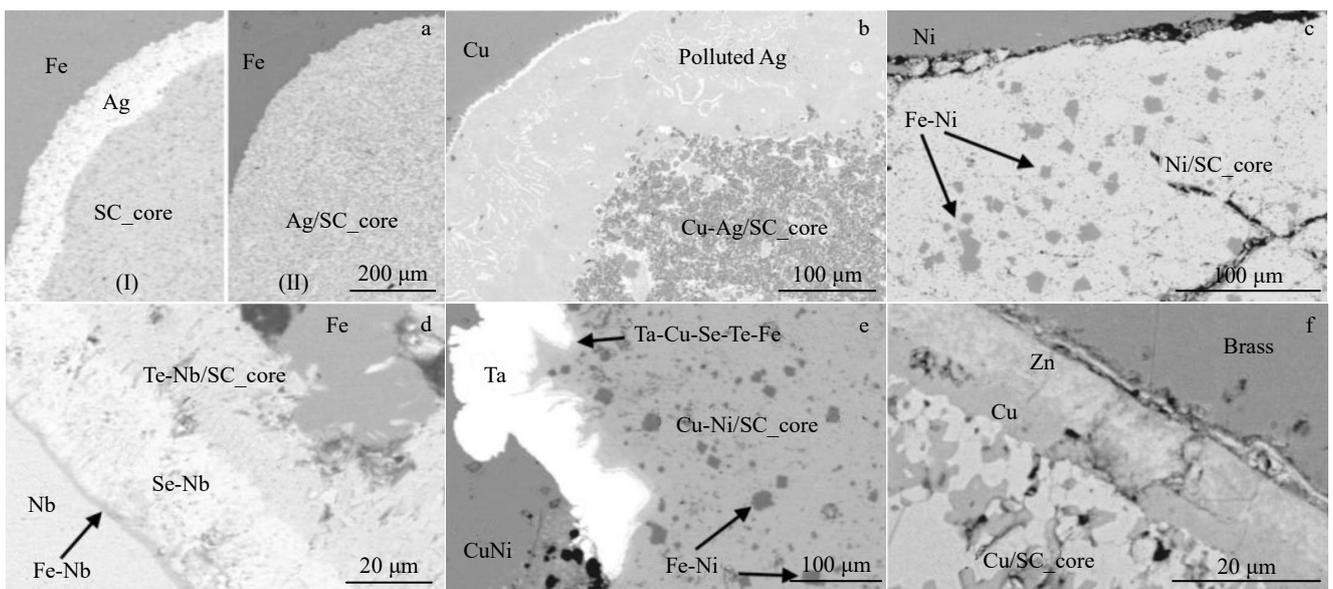


图 3 不同包套材料的线材横截面微观结构

Fig.3 Microstructures of wire cross section of different sheath materials^[14]

见几乎所有的金属包套材料都会与芯部材料发生反应从而导致了超导相的破坏。Fe 包套材料最有利于制备 Fe(Te,Se)线材。然而 Fe 元素的含量也需要一定程度的控制, 否则也会使超导电性下降。最终该组得到了临界电流密度约为 400 A/cm^2 的超导线材。该组的研究结果还表明, 粉末装管法制备 Fe(Te,Se)线带材存在诸多困难, 需要使用更复杂的金属包套并采用更加复杂的热处理工艺去改善, 或者采用创新性的制备方法。

2016 年, 中国的研究人员 Li 等人^[15]采用先位粉末装管法成功制备了 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 超导带材。他们将熔融获得的 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 作为前驱体, 并在前驱体粉末中加入了 10% (质量分数) 的 Ag 粉末, 目的是改善晶界的连通性, 选用 Cu/Nb 包套材料。研究发现 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理 25 min 工艺得到的样品性能最佳, 所得到的带材临界转变温度达到 15.7 K, 在 4.2 K、0.5 T 条件下临界电流密度达到 $1.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。这一数值是当时报道的 Fe(Te,Se)单芯线的最高临界电流密度值。同年, 西北有色金属研究院的冯建情等人^[16]采用粉末装管法结合高能球磨辅助烧结工艺制备了高超导相含量和高临界电流密度的 FeSe 超导带材。高能球磨工艺的引入不仅保证了前驱体粉末原子的均匀性, 而且大大缩短了 Fe 与 Se 原子之间的扩散距离, 从而有效避免了非超导六方相 $\delta\text{-FeSe}$ 的形成, 这样超导相 $\beta\text{-FeSe}$ 的晶界间 $\delta\text{-FeSe}$ 的数量大大减少, 增加了超导相 $\beta\text{-FeSe}$ 晶粒之间的连接性, 优化了 $\beta\text{-FeSe}$ 的化学组成, 极大程度上提高了载流性能。制得的 FeSe 带材的临界电流密度为 340 A/cm^2 。

2019 年, 俄罗斯研究人员 Vlasenko 等人^[17]对 PIT 法进行改善, 采用热气挤压法在钢护套中制备了 FeSe 丝样品, 再制成超导线材。通过研究发现低温退火使得样品晶界的连接性得到了改善, 由此临界电流密度得到了提升。他们还研究发现 FeSe 块体的精细研磨会使得线材的超导电性降低, 因为研磨会导致四方超导相到六方非超导相的转变。如图 4 所示。

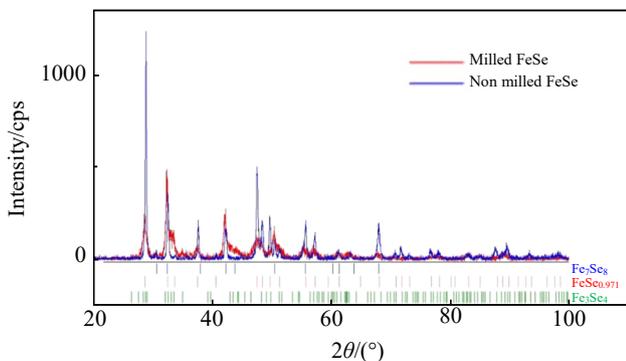


图 4 精细研磨前后 FeSe 块体的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of FeSe bulk before and after fine grinding^[17]

在 2021 年, 日本国立材料科学研究所的 Farisoğulları 等人^[18]采用先位粉末装管法制备了添加 Ag 的 $\text{FeSe}_{0.94}$ 超导线材。通过分析得到的 X 射线衍射图谱 (见图 5) 和微结构的表征发现 X 射线图谱中未观察到 Ag 的化合物, 说明 Ag 掺入了 FeSe 的晶体结构中, 微结构的表征发现 Ag 在反应层中不均匀地扩散, 这表明少量的 Ag 掺杂在一定程度上改善了晶间的连接, 并且 Ag 的添加还抑制了非超导的六方相的形成。他们认为若能进一步提高超导芯的密度, 那么 FeSe 超导线材的临界电流密度可以得到提高。

2022 年, 西北有色金属研究院的 Liu 等人^[19]对 Fe(Se,Te)多晶进行 Ag/O 共掺杂, 通过这种掺杂使得 Fe(Se,Te)多晶的超导性能显著提升。该组研究发现, Ag 的掺入改善了 Fe(Se,Te)晶界处的电子输运从而增强了多晶材料的晶间连接性, 提高了材料的临界电流密度, 如图 6 所示。而 O 元素氧化了间隙 Fe 并诱导间隙 Fe 以 Fe_2O_3 的形式析出, 一定程度上减小了间隙 Fe 对超导电性的不良影响, 同时形成了额外的钉扎中心, 优化了材料的超导性能。该组研究表明这种 Ag/O 的共掺杂方法

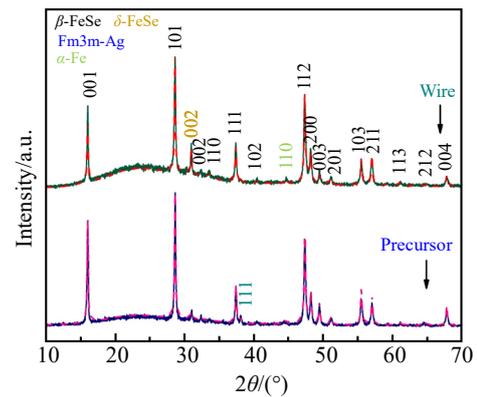


图 5 添加 Ag 的 FeSe 超导线材的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Ag-doped FeSe superconducting wires^[18]

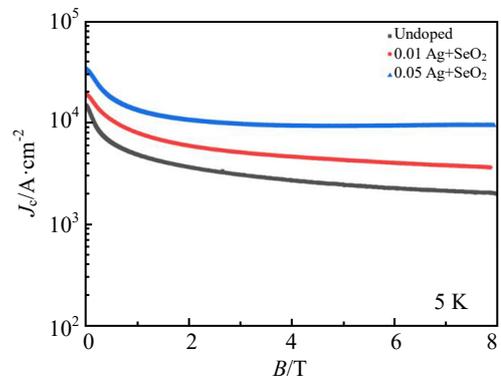


图 6 不同 Ag/O 掺杂样品的在 5 K 下的临界电流密度

Fig.6 Critical current density of different Ag/O doped samples at 5 K^[19]

是 Fe(Se,Te)线带材性能优化的有效方法,为线带材方面的研究提供了很好的思路。

目前 FeSe 超导线带材的研究较少,其应用难点主要集中在以下几点。

一是 FeSe 的相转变机理非常复杂^[20],在反应过程中会涉及 FeSe 四方相、FeSe 六方相、FeSe₂、Fe₃Se₄、Fe₇Se₈ 等互相转变,而只有在很小的一段温度成分区间,才能得到超导四方相 β-FeSe,这使得超导相的纯度提升非常困难。其他铁硒化合物非超导相杂质会在超导的四方相的晶界处聚集,从而减弱超导电性。可行的改进方法有 2 种:一种是控制制样的烧结时间和冷却速率^[21]或者改善退火工艺,从而减少第二相的含量;另一种是在原料中添加更多 Fe 来抑制杂相的生成。也有通过掺杂调控 Fe(Se,Te)多晶块体的相分离以及钉扎类型的报道^[22]。

二是对于 FeSe 多晶材料,间隙铁的存在也是一个难题,其存在会改变载流子的浓度并且抑制库伯对的配对,因而会严重破坏超导电性^[23],阻碍了研究人员对本征超导性质和机制的探索^[24]。因而如何去除间隙铁也是研究热点之一,例如中国科学院物理研究所的 Gu 等^[25]利用自助熔剂法,通过少量的 Mn 掺杂成功制备出不含间隙铁的高性能 Fe(Se,Te)晶体,其在 2 K、自场下的临界电流密度达到 4.5×10⁵ A/cm²,且在高场下的衰减很小。

总的来说,“11”体系的铁基超导线带材的性能还不能满足实用化的要求,还需要通过提高超导相的含量、增强晶间连接性、元素掺杂等方式进一步提高该体系线带材的性能,发挥出其在低温、高场下的应用潜力^[26]。

2 “11”体系涂层导体和薄膜的制备

FeSe 体系的铁基超导材料具有结构简单、毒性小等特性,可以通过多种方法来制备 FeSe 基的超导多晶薄膜和涂层导体,如激光脉冲沉积法 (PLD)、分子束外延法 (MBE) 等。超导薄膜对于超导材料的研究有重要的意义,在基础研究、弱电应用和强电应用等方面都能发

挥作用,例如研制约瑟夫森结、超导量子干涉仪、超导滤波器等^[27]。此外,“11”体系的薄膜对于高温超导体的机制研究也极为重要。相较于“11”体系的线带材的制备,该体系薄膜制备的相关研究更多并且更为成功。

激光脉冲沉积法 (PLD) 是制备超导材料薄膜最常用的方法,该方法制得的薄膜化学计量比与预期的偏差极小,具有良好的保成分性。并且该方法的制备周期短,对衬底的要求较低,不仅沉积的效率高而且制备得到的薄膜较为均匀。该方法的一个缺陷是沉积出的薄膜中会存在杂质,会导致薄膜质量的降低。分子束外延法 (MBE) 制得的薄膜杂质和缺陷少,更容易制得高纯度的薄膜。并且该方法的薄膜生长速率低并且过程可控,可以在原子尺度精准控制薄膜的厚度、组分等。但该方法的投资极大,薄膜生长速率很低,经济效益差。

FeSe_{1-x}Te_x 薄膜首先由 Wu 等人^[28]利用 PLD 于 2009 年在 MgO(001)基底上制备出来,且该团队研究发现掺杂 Te 的 FeSe 薄膜在低温下都表现出锐利的超导转变,其中含 Te 量少的薄膜的临界转变温度明显低于块体样品,而 Te 的含量达到一定值时,薄膜材料的临界转变温度就非常接近块体。此外该小组还研究了 FeSe_{1-x}与 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 2 种超导薄膜材料的电阻率与温度的关系,所得实验结果如图 7 所示。图 7a 为 FeSe_{1-x} 的不同厚度的薄膜电阻率与温度的关系,由图中可见当薄膜厚度达到 300 nm 以上时,才出现零电阻现象。图 7b 为 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 不同厚度薄膜电阻率与温度的关系,当薄膜厚度达到 100 nm 以上时,才出现零电阻现象。这说明了 FeSe 体系薄膜的超导电性可能具有厚度依赖性。

随后在 2014 年,东南大学的 Zhuang 等人^[29]克服了 FeSe_xTe_{1-x} 的多晶样品存在相分离的问题,从而使得 0.6≤x≤0.8 这一范围的样品成功制备,从而可以构建出“11”体系超导材料的完整的电子相图,实现了重大的突破。该组还研究了不同 Se 含量对该体系薄膜材料超导电性的影响,根据所得的电子相图(见图 8),发现对

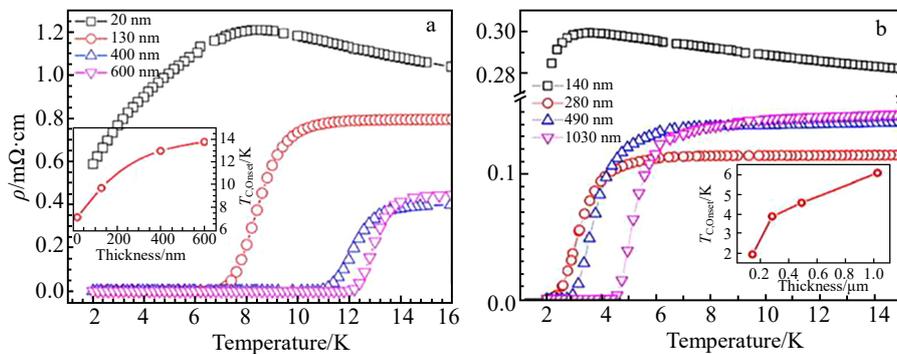


图 7 FeSe_{1-x} 和 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 不同厚度薄膜电阻率与温度的关系

Fig.7 Relationship between resistivity of FeSe_{1-x} (a) and FeSe_{0.5}Te_{0.5} (b) thin films with different thicknesses and temperature^[28]

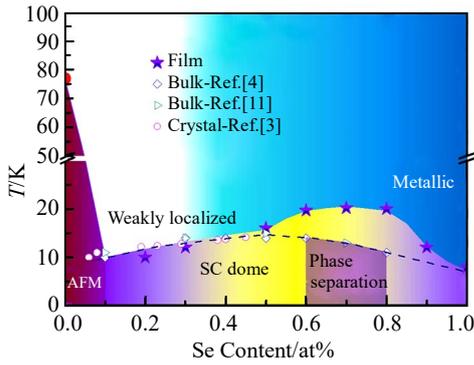


图 8 不同 Se 浓度的 FeSe_xTe_{1-x} 电子相图

Fig.8 Electronic phase diagram of FeSe_xTe_{1-x} with different Se contents^[29]

于 FeSe_xTe_{1-x} 薄膜材料，在 $x=0.6\sim 0.8$ 时样品具有最高的临界转变温度，大约 20 K。同年，该研究小组研究了 Fe 的含量对“11”体系的超导薄膜材料的临界转变温度的影响^[30]。该组利用 PLD 制备了 Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} ($x=0.8\sim 1.0$) 薄膜，并测试出各成分薄膜的电阻率与温度的关系，所得结果如图 9 所示。研究得到 2 个重要结论：一是 Fe 空位的薄膜可以人为控制地制备出来；二是 Fe 含量更低的 Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} ($x=0.8\sim 1.0$) 薄膜具有更高的临界转变温度，该组通过分析微结构的表征结果发现 Fe 含量较少的薄膜中有较多的 Fe 空位，Fe 空位在晶格内形成了晶格应变，临界转变温度的提高与晶格应变有很强的关联性。

2016 年，澳大利亚伍伦贡大学的 Qiu 等人^[31]研究发现 Mg 掺杂会对 FeSe 薄膜的超导电性产生影响。该小组利用 PLD 并控制沉积时间制备出不同 Mg 含量的 FeSe 薄膜（各薄膜厚度相同）。Mg 属于碱土金属，通过掺杂 Mg 可以提供丰富的电子载流子，从而显著影响 FeSe 薄膜的最终超导性能。不同 Mg 含量的 FeSe 薄膜的临界转变温度及电子浓度如图 10 所示。随着 Mg 含量的增加，

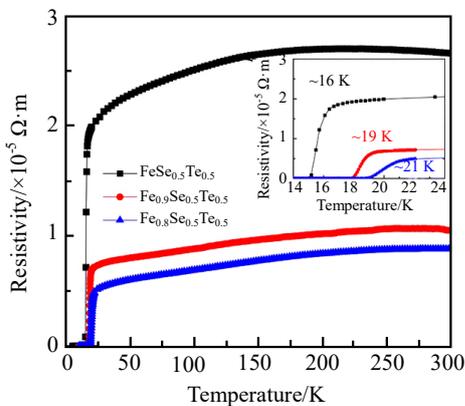


图 9 Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} 电阻率与温度的关系

Fig.9 Relationship between resistivity of Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} and temperature^[30]

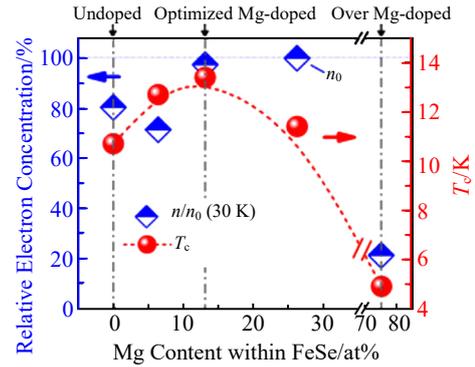


图 10 不同 Mg 含量的 FeSe 薄膜的临界转变温度及电子浓度

Fig.10 Critical transition temperatures and electron concentrations of FeSe thin films with different Mg contents^[31]

FeSe 薄膜的临界转变温度先上升后下降。研究发现 Mg 在 FeSe 薄膜掺杂会进入 FeSe 晶格，而不会与 FeSe 发生反应生成新相。Mg 进入 FeSe 晶格占据 Fe 空位，从而使得晶格参数增大，同时引入了额外的载流子，从而提升了超导电性；随着 Mg 掺杂量的进一步增加，FeSe 超导晶格中部分 Fe 位很可能被过量的 Mg 取代，导致超导结构被破坏，因而超导电性下降。

在超导薄膜材料的制备中，衬底的选择也是非常关键的因素。有 2 个角度可以解释该原因：一是不同的衬底往往会导致不同程度的晶格错配，从而很大程度地影响超导薄膜的超导电性；二是不同的衬底会在薄膜中引入不同的应力，而 FeSe 材料性质对压力非常敏感，从而导致超导电性的差异^[32]。2018 年，中国科学院物理研究所的 Feng 等人^[33]利用 PLD 在 CF、LF、STO 等 12 种衬底上制备了超导 FeSe 薄膜，系统地研究了不同衬底材料的晶格参数对 FeSe 薄膜超导电性的影响，所得不同衬底的薄膜的临界转变温度如图 11 所示。由图中可知，在薄膜厚度一定的情况下，FeSe 薄膜的临界转变温度与衬底材料的 c 轴参数有一定关系， c 轴参数越大，该衬底材料上的 FeSe 薄膜临界转变温度越高，临界转变温度最高的衬底材料是 CaF₂，约为 14 K。

衬底的温度也是制备“11”体系铁基超导薄膜时不可忽视的一个因素。2022 年上海交通大学的 Ye 等人^[34]研究了 Fe(Se,Te)薄膜的超导电性随温度的变化。该组利用 PLD 在金属带上沉积了 Fe(Se,Te)薄膜，在不同衬底温度下沉积得到的薄膜的电阻率与温度的变化关系如图 12 所示。由图可见随着衬底温度的升高薄膜的超导电性先升高后降低，在中间温度 330 °C 下制得的薄膜超导电性最好。该组分析原因是在较低的衬底温度下，由于薄膜的织构较差，薄膜中的双轴压应变作用较弱。在较高的衬底温度下，随着晶粒排列的改善，双轴压缩应变效

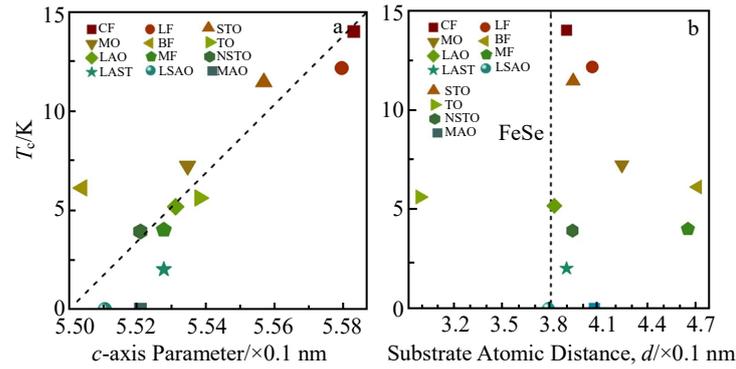


图 11 不同衬底的 FeSe 薄膜的临界转变温度

Fig.11 Critical transition temperatures of FeSe thin films on different substrates^[33]

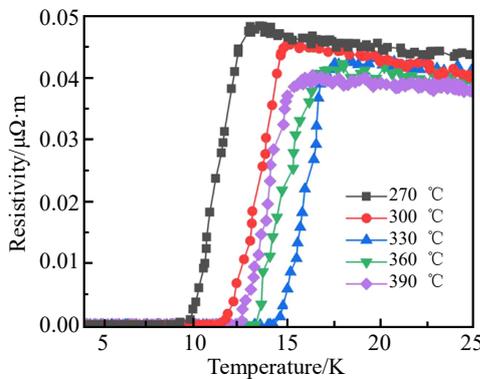


图 12 不同衬底温度下沉积的薄膜的电阻率与温度的关系

Fig.12 Temperature dependence of the resistivities of thin films deposited at different substrate temperatures^[34]

应变得更加显著，并在 330 °C 时达到最大。当进一步提高衬底温度时，由于 Se 含量的增加，晶格常数减小，双轴压缩应变逐渐减弱。因此，对于 Fe(Se,Te)薄膜材料，为了获得优异的超导电性，衬底温度应该适中。

东京大学的 Kobayashi 等人^[35]在 2022 年利用 PLD 在 SrTiO₃ 衬底上制备了不同厚度的 FeSe 薄膜。在他们的研究中，所有 FeSe 薄膜均采用 KrF 激光器在绝缘 SrTiO₃(001)衬底上 PLD 生长，将 SrTiO₃ 衬底在空气中 1000 °C 下退火，然后用水冲洗，得到具有台阶结构的 TiO₂ 终端表面，他们认为这对于 FeSe 在 SrTiO₃ 表面上实现超导电性至关重要。所得各厚度薄膜的电阻率与温度的关系如图 13 所示。由图可见 10 nm 的薄膜临界转变温度最高，超过了 20 K，这一数值远高于 FeSe 块体的临界转变温度。

缓冲层对 Fe(Se,Te)薄膜的超导电性的影响也不容忽视。2023 年上海交通大学的 Mou 等人^[36]研究了不同缓冲层对 Fe(Se,Te)性能的影响。该组利用 PLD 并选取不同缓冲层，在 IBAD 基底上制备了 Fe(Se,Te)薄膜。该

组研究发现缓冲层的类型对 Fe(Se,Te)薄膜的结晶质量、化学组成和超导电性有重要影响，其中缓冲层与 Fe(Se,Te)薄膜之间的晶格失配是主要原因。在结晶性最好的 CeO₂缓冲层上生长的 Fe(Se,Te)薄膜在 4.2 K 时具有最高的自场 J_c 为 2.26 MA/cm²，并且在 9 T 时仍能保持 0.40 MA/cm² 的临界电流密度，其上临界场高达 53 T，对于制备 Fe(Se,Te)长超导带材有重要意义。

虽然“11”体系的研究在外延薄膜上取得了许多进展，但是该体系在高场的应用却进展较慢，而涂层导体的成功制备让其有了突破。

2011 年美国布鲁克海文国家实验室 Si 等人^[37]首先在 IBAD-MgO 金属基带上制备了 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 涂层导体，虽然该涂层导体的临界温度只有约 11 K，低于同成分的块材；但该涂层导体在 25 T 的高场下临界电流密度仍然超过 10⁴ A/cm²，并且该临界电流密度几乎与场方向无关，近乎各向同性。2023 年中国科学院等离子体物理研究所的 Wei 等人^[38]成功制备并测试了 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 涂层导体混合线圈，该组在自场和背景场从 0 增加到 10 T 的过程中测量了 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 线圈的临界电流，在 4.2 K 和 10 T 场下线圈的运输临界电流密度达到了 1.42×10⁵ A/cm²。

有关涂层导体的研究充分表明该体系具有显著的高场优势，在液氦温区的高场应用具有十分良好的应用前景。目前关于“11”体系涂层导体的研究要显著少于薄膜材料，还有待研究人员的进一步研究。

总的来说，“11”体系的薄膜材料的制备较为成功，并且仍具备相当大的潜力，但仍存在难以控制化学计量比、薄膜的空间均匀性不佳等影响薄膜性能的问题^[39-40]。通过改善薄膜沉积工艺、降低各向异性^[41]以及引入有效的人工钉扎中心都可以提高薄膜的超导性能，另外探究 FeSe 的金属掺杂机制也被证实是一种有效方法^[42]。随着该体系薄膜材料的性能不断提升，“11”体系的铁基超导材料的应用前景一定是令人期待的。

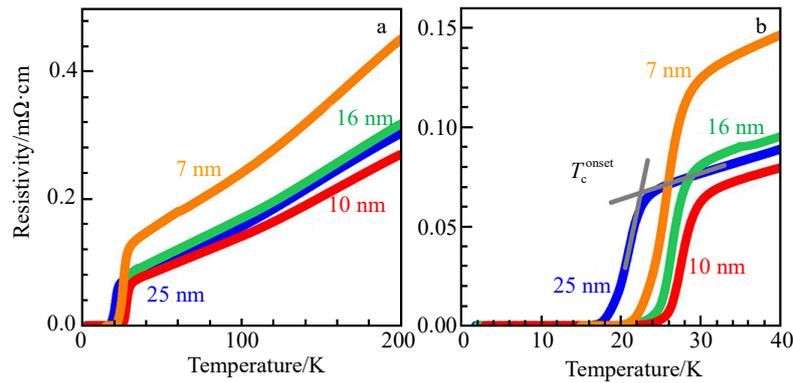


图 13 不同厚度 FeSe 薄膜电阻率与温度的关系

Fig.13 Relationship between resistivity of FeSe thin films with different thicknesses and temperature^[35]

3 结 语

铁基超导材料正处于快速发展阶段, 小的各向异性、高的上临界磁场等特点使得其在超导材料大家族中有着独特的地位, 其中“11”体系因其结构简单以及毒性小等特点备受研究人员的青睐, 是研究超导材料的基础理论和实用化方向的不二选择。但是该体系实用化方面的研究仍存在一些问题, 未来这些难题仍是研究的重点。

首先是 FeSe 基超导材料的晶界弱连接的问题, 这是影响该体系超导带材性能的主要因素之一。该问题的成因主要是前文提到的 FeSe 材料成相机理复杂以及难以制得高致密度的材料。因而一方面需要进一步对 FeSe 相变机理进行研究, 另一方面可以尝试化学掺杂或开发新工艺, 解决这一难题。除此之外间隙铁的存在、力学性能较差也是限制“11”体系铁基超导材料实用化的重要因素, 对间隙铁形成和消去机理的研究、改善材料力学性能也是提高该体系材料超导性能的有效途径。相信通过研究人员的不断努力, 一定能开辟出一片属于铁基超导材料的新天地。

参考文献 References

- [1] Cui Lijun, Yang Fan, Hou Fanyou *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2022, 51(11): 3998
- [2] Wen Haihu. *Advanced Materials*[J], 2008, 20(19): 3764
- [3] Biswal G, Mohanta K L. *Materials Today: Proceedings*[J], 2021, 35: 207
- [4] Yao Chao, Ma Yanwei. *iScience*[J], 2021, 24(6): 102541
- [5] Hsu Fongchi, Luo Jiuyong, Yeh Kuowei *et al. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*[J], 2008, 105(38): 14262
- [6] Cheng Jinguang, Sun Jianping. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*[J], 2021, 51(4): 047403
- [7] McQueen T M, Huang Q, Ksenofontov V *et al. Physical Review B*[J], 2009, 79(1): 014522
- [8] Kurokawa H, Nakamura S, Zhao J *et al. Physical Review B*[J], 2021, 104(1): 014505
- [9] Viennois R, Giannini E, Van Der Marel D *et al. Journal of Solid State Chemistry*[J], 2010, 183(4): 769
- [10] Huang Yujia, Xing Yan, Pan Wei *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2021, 50(2): 425
- [11] Liu Qiuhong. *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2021, 1786: 012007
- [12] Mizuguchi Y, Deguchi K, Tsuda S *et al. Applied Physics Express*[J], 2009, 2(8): 083004
- [13] Izawa H, Mizuguchi Y, Takano Y *et al. Physica C: Superconductivity and Its Applications*[J], 2014, 504: 77
- [14] Palombo M, Malagoli A, Pani M *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2015, 117(21): 213903
- [15] Li Xiong, Liu Jixing, Zhang Shengnan *et al. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*[J], 2016, 29: 1755
- [16] Feng Jianqing, Zhang Shengnan, Liu Jixing *et al. Materials Letters*[J], 2016, 170: 31
- [17] Vlasenko V A, Pervakov K S, Eltsev Y F *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2019, 29(3): 1
- [18] Farisoğulları D, Babij M, Karadağ F *et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2021, 32: 2887
- [19] Liu Jixing, Shao Botao, Liu Xueqian *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2022, 14(1): 2246
- [20] Pallecchi I, Tropeano M, Lamura G *et al. Physica C: Superconductivity and Its Applications*[J], 2012, 482: 68
- [21] Herbirowo S, Yuwono A H, Sofyan N *et al. AIP Conference*

- Proceedings*[C]. Depok: AIP Publishing, 2023: 2538
- [22] Sun Qiao, Xu Zhongtang, Dong Chiheng *et al. Materials Today Advances*[J], 2023, 17: 100354
- [23] Zhang Xianping, Ma Yanwei. *Physics*[J], 2020, 49(11): 737
- [24] Sun Yue, Pan Yongqiang, Zhou Nan *et al. Physical Review B*[J], 2021, 103(22): 224506
- [25] Gu Yadong, Zhou Menghu, Zhang Mengdi *et al. Science China Materials*[J], 2022, 65(9): 2472
- [26] Slimani Y, Hannachi E. *Superconducting Materials: Fundamentals, Synthesis and Applications*[M]. Singapore City: Springer Nature Singapore, 2022: 271
- [27] Sakoda M, Iida K, Naito M. *Superconductor Science and Technology*[J], 2018, 31(9): 093001
- [28] Wu Mawkuen, Hsu Fongchi, Yeh Kaiwei *et al. Physica C: Superconductivity*[J], 2009, 469(9-12): 340
- [29] Zhuang Jincheng, Yeoh Waikong, Cui Xiangyuan *et al. Scientific Reports*[J], 2014, 4(1): 7273
- [30] Zhuang Jincheng, Yeoh Waikong, Cui Xiangyuan *et al. Applied Physics Letters*[J], 2014, 104(26): 262601
- [31] Qiu Wenbin, Ma Zongqing, Liu Yongchang *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2016, 8(12): 7891
- [32] Han Y, Li W Y, Cao L X *et al. Physical Review Letters*[J], 2010, 104(1): 017003
- [33] Feng Zhongpei, Yuan Jie, He Ge *et al. Scientific Reports*[J], 2018, 8(1): 4039
- [34] Ye Jiachao, Mou Shaojing, Zhu Rongji *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2022, 132(18): 183910
- [35] Kobayashi T, Ogawa H, Nabeshima F *et al. Superconductor Science and Technology*[J], 2022, 35(7): 07LT01
- [36] Mou Shaojing, Ye Jiachao, Zhu Rongji *et al. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*[J], 2023, 36(3): 793
- [37] Si Weidong, Zhou Juan, Jie Qing *et al. Applied Physics Letters*[J], 2011, 98(26): 262509
- [38] Wei Shaoqing, Liu Xiao, Zhang Zhan *et al. Superconductor Science and Technology*[J], 2023, 36(4): 04LT01
- [39] Jiao Xiaotong, Gong Guanming, Zhang Zhiyu *et al. Physical Review Materials*[J], 2022, 6(6): 064803
- [40] Obata Y, Karateev I A, Pavlov I *et al. Micromachines*[J], 2021, 12(10): 1224
- [41] Ozaki T, Jaroszynski J, Li Q. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2019, 29(5): 1
- [42] Ma Qingshuang, Gao Qiuzhi, Li Xinhua *et al. Solid State Communications*[J], 2023, 360: 115026

Research Progress of Practical Application of 11 System Iron-Based Superconducting Materials

Yan Chen¹, Yang Fang¹, Liu Jixing², He Yixuan¹, Zhang Shengnan², Wang Dayou³, Yan Guo^{1,3}, Zhang Pingxiang^{1,2}

(1. Institute of Superconducting Materials and Applied Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(3. Xi'an Jueneng Medical Engineering Technologies Co., Ltd, Xi'an 710028, China)

Abstract: Iron-based superconductor has attracted extensive attention from scientists due to its high critical current density, low anisotropy and extremely high upper critical magnetic field since it was discovered. It has excellent application prospects and is also one of the keys to study the mechanism of high temperature superconductivity. As the simplest iron-based superconducting material, the 11 system iron-based superconductor has become a research hotspot in the field due to its characteristics of free of toxic element As and sensitivity to doping. In this paper, the research progress of the practical application of 11 system iron-based superconducting materials was reviewed from two perspectives: wire and strip as well as coated conductor and thin film.

Key words: iron-based superconductor; wire and strip; thin-film material

Corresponding author: Yang Fang, Ph. D., Professor, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: yangfang@nwpu.edu.cn