

## NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子掺杂对单畴YBCO超导块材性能的影响

李国政 陈超

### Influence of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle doping on properties of single-domain YBCO bulk superconductors

Li Guo-Zheng Chen Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 237402 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201116

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201116>

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>

空心圆柱形永磁体内径对单畴GdBCO超导块材磁悬浮力的影响

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报. 2018, 67(7): 077401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

Ti:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>激光晶体的提拉法生长及性能表征

Growth and characterization of Ti:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> laser crystal by Czochralski method

物理学报. 2020, 69(1): 014210 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191150>

国产MOCVD-YBCO带材高温超导线圈研制与磁场温度特性研究

Development of a 4 T (46 K) 100 mm high-temperature superconducting coil made of homemade MOCVD-YBCO coated conductors

物理学报. 2018, 67(6): 068401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171491>

Mn掺杂Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>单晶微米尺度压电阵列的制备与铁电畴结构研究

Preparation and ferroelectric domain structure of micro-scale piezoelectric array fabricated by Mn doped Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> single crystal

物理学报. 2020, 69(18): 187701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200544>

引入籽晶层的物理溅射生长Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>外延薄膜特性研究

Characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films on seed layer grown by magnetron sputtering

物理学报. 2020, 69(22): 228103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200810>

# NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子掺杂对单畴 YBCO 超导块材性能的影响\*

李国政<sup>†</sup> 陈超

(天津师范大学物理与材料科学学院, 天津 300387)

(2020 年 7 月 13 日收到; 2020 年 8 月 3 日收到修改稿)

采用一种新型的顶部籽晶熔渗生长 (TSIG) 工艺制备了铁酸镍 (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NFO) 纳米粒子掺杂的 YBCO 超导块材, 并对其生长形貌、微观结构、超导性能进行了研究. 结果表明, 在低掺杂量下, YBCO 单畴体的正常生长不会受 NFO 掺杂的影响, 但是在高掺杂水平下样品边缘开始出现明显的随机成核. 磁悬浮力性能测试结果表明, 随着 NFO 掺杂量的增加, 样品的最大磁悬浮力先增大后减小, 掺杂重量百分比为 0.2% 的样品表现出最大的磁悬浮力 (33.93 N). 低温磁性测试结果表明, 随着 NFO 掺杂量的增加, 样品的  $T_c$  值逐渐降低, 而且超导转变宽度 ( $\Delta T_c$ ) 也逐渐变宽. 最佳掺杂下 (重量百分比为 0.2%) 样品的零场  $J_c$  值为  $8.68 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 比未掺杂样品提高了 31%. 电子探针微区分析 (EPMA) 结果表明, YBCO 体系中掺杂的纳米 NFO 在热处理过程中发生了分解, 而溶解出的 Ni 和 Fe 离子最终以元素替代的方式存在于 YBCO 块材内, 这可以在超导基体中引入晶格畸变和弱超导区作为有效的磁通钉扎中心, 从而提高样品的超导性能.

**关键词:** 单畴 YBCO, 顶部籽晶熔渗生长, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子掺杂, 超导性能

**PACS:** 74.62.Dh, 74.72.-h, 74.25.-q

**DOI:** 10.7498/aps.69.20201116

## 1 引言

利用单一籽晶引导生长的、具有单一生长畴区的 RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE 为稀土元素, 如 Y, Nd, Sm, Eu, Gd 等) 单畴超导块材可以避免多畴样品在晶界处的弱连接现象, 从而具有较高的磁悬浮力及捕获磁通能力, 在超导磁悬浮领域及高场磁体方面有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>. 而想要获得更高的磁悬浮和捕获磁通性能需要超导体具有更高的  $J_c$  性能和更大的单畴区尺寸 (对应更大的超导环流半径), 因此, 通过在 REBCO 中引入更有效的磁通钉扎中心以提高  $J_c$  和通过改进、优化工艺生长制备更大直径的单畴块材成为该领域的两个主要研究方向.

通过化学掺杂在超导体内引入各种缺陷作为新型磁通钉扎中心是研究者们最常使用的途径<sup>[5,6]</sup>, 具体掺杂物种类繁多, 且它们在 REBCO 超导体内的转化、存在方式及其对磁通钉扎的作用机制也各不相同. 总体来说, 具体的掺杂效果与以下几个因素有关: 1) 新型掺杂物对块材内原有的 RE<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (RE-211) 粒子的粒径变化和空间分布有何影响, 如 CeO<sub>2</sub> 掺杂可以起到抑制 RE-211 粒子在 Ba-Cu-O 液相中的粗化长大, 最终起到细化 RE-211 的作用<sup>[7]</sup>; 2) 掺杂物在 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (RE-123) 超导基体中新引入的第二相粒子的形貌、粒径和分布情况如何, 掺杂物既有可能直接残留在基体内, 也有可能 REBCO 体系内发生反应, 转化为新的物相, 比如 Wang 等<sup>[8]</sup> 在 YBCO 超导块材内掺入了 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子, 结果发现其在热处理过程中

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51872199) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: ligz1984@126.com

转化成了  $Y_2Ba_4CuBiO_x$ , 且自发成纳米尺寸; 3) 掺杂物部分或全部溶解在 Ba-Cu-O 液相中, 溶解的金属离子进入 RE-123 晶格产生元素替代, 从而引发晶格畸变、低  $T_c$  弱超导区等. 如 Chen 等<sup>[9]</sup> 将纳米级 Y-211 粒子掺入 SmBCO 块材内, 结果在超导体基体中发现了具有 Y 元素成分起伏的 (Y, Sm)-Ba-Cu-O 区域.

含有 Fe, Ni, Co 元素的磁性化合物是最近受到研究者广泛关注的一类掺杂物. Tsuzuki 等<sup>[10]</sup> 分别将 Fe-B 合金、 $Fe_2O_3$  和 CoO 粒子掺杂到单畴 GdBCO 块材中, 发现 Fe-B 合金与  $Fe_2O_3$  掺杂的样品  $J_c$  和捕获磁通均得到显著提高, 而 CoO 的掺杂对提高  $J_c$  作用不大, 并导致了样品捕获磁通性能的下降. Hara 等<sup>[11]</sup> 将 Fe-Ni 合金粒子掺杂到 GdBCO 超导块材中, 结果发现, Fe-Ni 合金掺杂会引起样品  $T_c$  的降低, 由摩尔浓度为 0% 掺杂下的 93.1 K 降低到 6.0% 掺杂时的 88.0 K, 但样品的  $J_c$  却得到有效提高, 最佳掺杂摩尔浓度比为 0.5%. Guo 等<sup>[12]</sup> 将  $Ni_2O_3$  粒子掺杂到顶部籽晶熔渗生长 (top-seeded infiltration growth, TSIG) 方法制备的单畴 GdBCO 超导块材中, 同样观察到了样品  $T_c$  的降低, 由重量百分比为 0% 时的 92.5 K 下降到 0.50% 掺杂下的 86.5 K. 但在最佳掺杂量下, 样品的磁悬浮力和捕获磁通性能均得到有效提高. Zhang 等<sup>[13]</sup> 将  $BaFe_{12}O_{19}$  纳米微粒掺杂到单畴 GdBCO 超导块材中, 结果表明,  $BaFe_{12}O_{19}$  纳米微粒可以保持自身的化学组成残留在超导体基体内, 从而起到钉扎中心的作用, 并同时能改善 Gd-211 粒子的分布和细化 Gd-211 粒径, 进一步提高了超导块材的  $J_c$  和捕获磁场性能. 在前期的工作中<sup>[14]</sup> 报道了 TSIG 法制备的单畴 YBCO 超导块材在重量百分比为 0.2% 的铁酸镍 ( $NiFe_2O_4$ , NFO) 掺杂下磁悬浮力性能得到了有效提高, 样品的  $T_c$  有些许降低, 并且超导转变宽度展宽. 但单畴 YBCO 在更高 NFO 掺杂量下的生长行为和性能变化以及 NFO 纳米粒子如何在 YBCO 体系内转化及存在等问题目前尚不明确, 仍需进一步研究.

在我们的前期工作中提出了一种用于制备纳米复合 YBCO 超导块材的新型 TSIG 工艺, 该方法使用纳米  $Y_2O_3 + BaCuO_2$  取代传统熔渗方法中使用的 Y-211 作为固相源, 经热处理后可在超导体基体内引入大量 Y-211 纳米粒子, 从而有效提高超导性能<sup>[15]</sup>. 本文使用该新型 TSIG 方法, 通过在固

相块中添加不同重量比 (0—0.5%) 的 NFO 纳米粒子, 获得 NFO 掺杂的 YBCO 纳米复合超导块材, 研究不同 NFO 掺杂量对 YBCO 超导体生长、磁悬浮力、 $T_c$  和  $J_c$  性能的影响, 并通过微区成分分析明确 NFO 在 YBCO 基体内的存在方式.

## 2 实验

首先利用固态反应法通过多次烧结和球磨的方式制备  $BaCuO_2$  前驱粉, 所用原料为 BaO (99.5%) 和 CuO (99%). 将纳米  $Y_2O_3$  (99.99%, 平均粒径 50 nm) 和  $BaCuO_2$  按照 1:1 的摩尔比混合, 再添加重量比为 1% 的  $CeO_2$  (99.99%) 和  $x\%$  的纳米 NFO,  $x$  分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5, 然后用玛瑙研钵充分混合均匀, 作为固相粉. 本文使用的 NFO 纳米粉由北京德科岛金科技有限公司提供, 纯度 99.9%, 平均粒径 50 nm. 将  $Y_2O_3$  (99.99%) 和 BaO, CuO 按照 1:10:16 的摩尔比混合均匀, 作为液相源粉.

利用压片机将固相粉和液相源粉分别压制直径 16 mm 和 26 mm 的圆柱型坯块, 作为固相块和液相块. 再将  $Yb_2O_3$  (99.99%) 粉压制直径 26 mm、厚约 2 mm 的薄片, 作为支撑块. 固相块、液相块和支撑块的质量分别为 5, 15 和 3 g. 然后将前驱块按照图 1 所示的方式依次同轴排列好, 最后将一小块 NdBCO 籽晶放在固相块上表面的中心位置, 用于在高温下引导 YBCO 的成核与生长. 可以看出, 此处采用了较大直径的液相块来支撑和熔渗生长较小尺寸的固相块, 这种装配方式能有效避免样品在热处理过程中出现倾斜或坍塌的情况<sup>[16]</sup>.

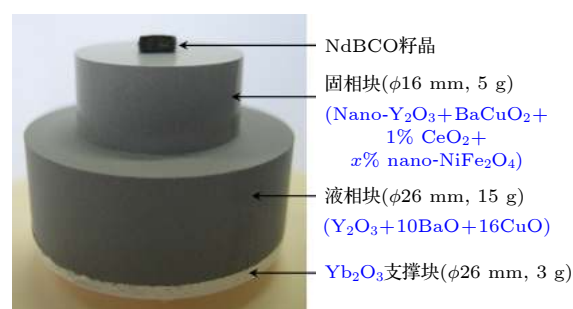


图 1 前驱坯块的装配方式

Fig. 1. Configuration pattern of the precursor pellets.

将配好的样品放入高温井式炉中, 以 240  $^{\circ}C/h$  的速率升温至 1035  $^{\circ}C$ , 然后保温 1 h, 完成液相块的熔化及液相向固相块的渗透转移. 然后以 60  $^{\circ}C/h$

的速率降温至 1005 °C, 再以 0.33 °C/h 的速率慢冷至 975 °C, 完成单畴样品的生长, 最后随炉冷却至室温. 完成 TSIG 过程后, 将样品放入石英管式炉中, 在流通氧气中、450—400 °C 的温区内慢冷 200 h, 完成渗氧处理, 最终获得纳米 NFO 掺杂的 YBCO 超导块材.

### 3 结果与讨论

图 2 为不同纳米 NFO 掺杂量下 YBCO 样品的表面形貌图. 由图可见, 在低掺杂量下 ( $x \leq 0.2$ ), Y-123 晶体的正常生长不受影响, 样品呈现出一个由中心籽晶引导生长的四分生长区域, 这是典型的单畴形貌. 而随着掺杂量的增大 ( $x = 0.3, 0.4$ ), 样品上表面边缘位置开始出现零星的自发成核区域, 但这些自发成核尺寸很小, 样品主体上仍可认为是单晶畴结构. 但当掺杂量增大到  $x = 0.5$ , 自发成核引导的生长区域尺寸显著变大 (如图中红圈内所示), 样品呈现出典型的多畴形貌. 更大的自发成核区域说明在样品慢冷生长阶段 Y-123 的同质成核出现的时间更早, 表明高掺杂量 NFO 杂质相的引入会提高 Y-123 的随机成核几率, 因此没有必要再进一步增加掺杂比例.

在 77 K 的液氮温度条件下, 利用自行设计的三维磁力与磁场测试装置<sup>[17]</sup> 测量了 YBCO 样品的悬浮力性能, 结果如图 3 所示, 其中内插图给出了样品的最大磁悬浮力与 NFO 掺杂量之间的关系. 由图可见, 未掺杂样品 (0%) 的最大磁悬浮力

为 28.81 N, 对应应力密度 14.33 N/cm<sup>2</sup>. 随着掺杂量的增大, 最大磁悬浮力逐步增加, 在质量比为 0.2% 时增大到 33.93 N, 对应应力密度 16.88 N/cm<sup>2</sup>, 这比未掺杂的样品提高了约 18%. 此后随着 NFO 掺杂量的进一步增大, 最大磁悬浮力逐步减小, 在重量比 0.4% 的掺杂水平下值为 26.24 N, 对应应力密度 13.05 N/cm<sup>2</sup>, 甚至已低于未掺杂的样品. 因此, 质量比 0.2% 可被视为纳米 NFO 的最佳掺杂量.

为了测量 NFO 掺杂的 YBCO 样品的  $T_c$  性能, 在离籽晶约 3 mm 距离处, 从每块 YBCO 样品的上表面切割下一尺寸约为 2 mm × 2 mm × 1 mm 的小试样, 然后用振动样品磁强计 (VSM) 进行直流磁化率测量. 首先, 将小试样零场冷却至低于  $T_c$  的温度 (77 K), 然后施加平行于样品  $c$  轴的磁场 (大小 20 Oe), 再将温度从 77 K 升高到 95 K, 同时测量直流磁化强度, 结果如图 4 所示. 由图可见, 所有样品都表现出典型的超导转变特征. 根据这些曲线, 可以确定超导转变的起始温度  $T_c^{\text{onset}}$ , 并且可以估算其转变宽度  $\Delta T_c$ . 显然, 未掺杂的样品显示出最高的  $T_c^{\text{onset}}$  值, 高于 90 K,  $\Delta T_c$  宽度约为 2 K. 随着掺杂量的增大,  $T_c^{\text{onset}}$  逐渐降低, 并且  $\Delta T_c$  逐渐展宽. 对于具有质量比 0.4% 的 NFO 掺杂的样品, 其呈现出最低的  $T_c^{\text{onset}}$  值, 约为 85 K, 并且  $\Delta T_c$  已经扩大到约 8 K. 这表明, 少量的 NFO 掺杂会抑制 YBCO 块材的超导电性, 但并没有完全破坏超导电性. 该结果与以前研究报道的磁性杂质通常抑制超导电性的结论相一致<sup>[11]</sup>.

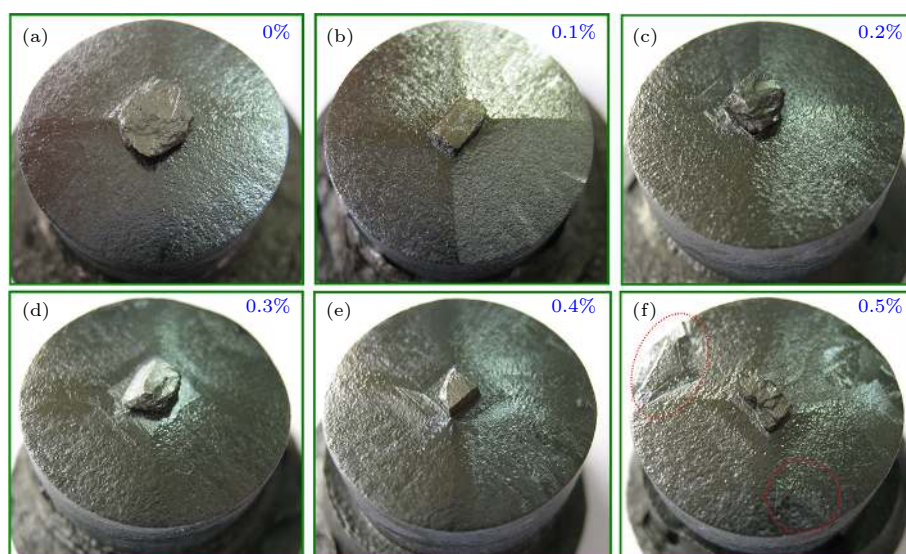


图 2 不同纳米 NFO 掺杂量下 YBCO 样品的表面形貌图

Fig. 2. Top surface morphology of the YBCO samples with different nano-NFO additions.

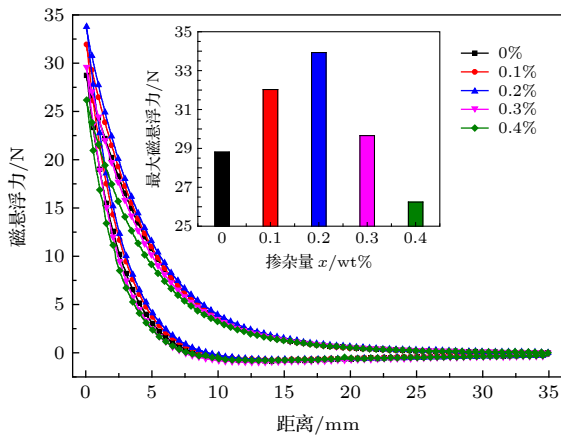


图3 不同纳米 NFO 掺杂量下 YBCO 样品的磁悬浮力曲线  
Fig. 3. The levitation force of the YBCO samples with different nano-NFO additions.

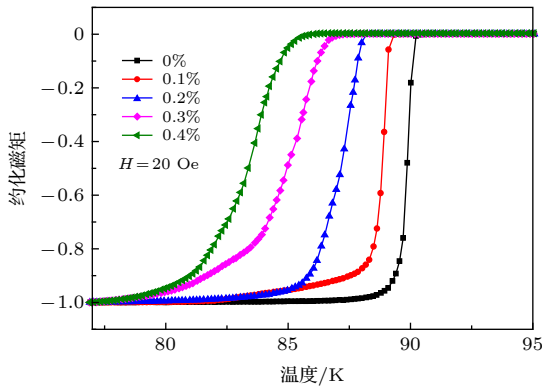


图4 不同纳米 NFO 掺杂量下 YBCO 样品的超导转变温度曲线  
Fig. 4. Superconducting transition temperature of the YBCO samples with different nano-NFO additions.

纳米 NFO 掺杂导致 YBCO 样品  $T_c$  的降低以及  $\Delta T_c$  的展宽, 这均表明在 Y-123 超导体中出现了弱超导区, 其原因有两种可能的机制. 第一种, NFO 纳米粒子保持了自身的化学组成, 最终残留在 YBCO 块材内, 其铁磁性破坏了样品的局部超导电性, 造成  $T_c$  降低; 第二种, 在 TSIG 过程中, NFO 纳米粒子自身分解, Ni 和 Fe 离子溶入液相中并参与了 Y-123 晶体的生长, 最终以元素替代的方式进入 Y-123 超导相的晶格. 前期研究表明<sup>[18-21]</sup>, Ni 和 Fe 离子都会占据 RE-123 晶格的 Cu 位, 从而引起  $T_c$  的下降. 纳米 NFO 掺杂具体涉及哪一种机制需要通过进一步的测试来证明.

为了观察样品的显微结构并检测样品内 NFO 纳米粒子 (或 Fe, Ni 元素) 的分布, 从重量比 0.2% 纳米 NFO 掺杂的 YBCO 大样品上表面的边缘位置解理下一尺寸约 2 mm × 2 mm 的小晶片,

然后用扫描电子显微镜 (SEM) 在解理面上进行显微结构分析, 结果如图 5 所示. 可见, 在 Y-123 基体中分布着两种类型的第二相内含物: 一种是尺寸主要介于 0.5—2.0  $\mu\text{m}$  的大颗粒, 另一种是弥散分布的纳米级小颗粒, 其尺度主要分布在几十纳米至几百纳米. 这种微观结构与文献<sup>[15]</sup>中未掺杂样品中观察到的结果非常相似. 由于这种新型的 TSIG 工艺使用的是纳米  $\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{BaCuO}_2$  的固相块, 在热处理过程中可以在样品内原位反应生成纳米级 Y-211 粒子并保留在 Y-123 超导体中. 而纳米 NFO 的尺寸也在此范围之内, 因此, 仅从纳米级颗粒的形貌是无法判断样品的微观结构中是否含有 NFO 纳米粒子的.

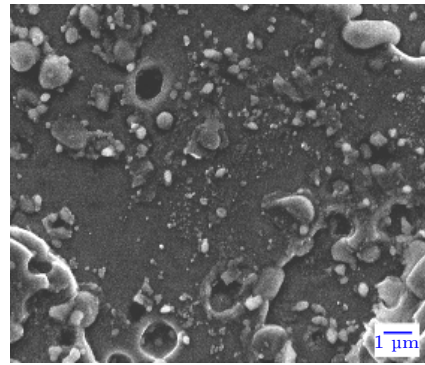


图5 掺杂重量比 0.2% 纳米 NFO 的 YBCO 样品的微观结构图  
Fig. 5. Microstructure of the YBCO sample doped with weight percent of 0.2% nano-NFO.

采用电子探针微区分析 (EPMA) 对小晶片的微区成分进行了测试. 图 6 展示了掺杂重量比 0.2% 纳米 NFO 的 YBCO 样品中 Y, Ni 和 Fe 元素的分布. 对于左图中的 Y 元素地图, Y 含量较高的区域代表 Y-211 粒子, 而低 Y 含量区域则表示 Y-123 超导体. 中图为 Ni 元素分布, 可以看出, Ni 元素的浓度与 Y 元素的浓度呈近似相反分布, 说明 Ni 元素主要存在于 Y-123 基体中. 而对于右图所示的 Fe 元素分布, 可以看出, Fe 元素几乎均匀分布, 这说明 Fe 元素同样也存在于 Y-211 粒子中. Ni 和 Fe 元素的不同分布趋势表明纳米尺寸的 NFO 颗粒在热处理过程中已发生分解, 从而导致 Ni 和 Fe 的分离, 并且通过元素替代的途径存在于 YBCO 块材内, 而不是以纳米 NFO 颗粒的形式被捕获. Ni 和 Fe 进入 Y-123 晶格会引起超导体中出现晶格畸变和弱超导区, 导致样品的  $T_c$  值降低. 但作为一种缺陷, 晶格畸变可充当有效的磁

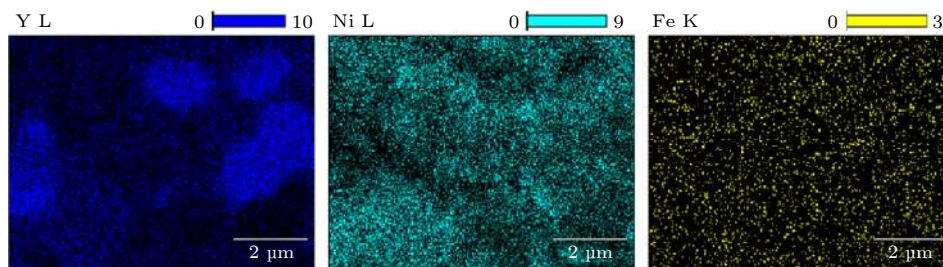


图 6 掺杂重量比 0.2% 纳米 NFO 的 YBCO 样品的微区成分分析

Fig. 6. Microarea composition analysis of the YBCO sample doped with weight percent of 0.2% nano-NFO.

通钉扎中心<sup>[12]</sup>, 提高样品的  $J_c$  性能, 这解释了在最佳掺杂量下 YBCO 样品磁悬浮力性能得到提高的原因。

对 NFO 掺杂重量比为 0%(代表未掺杂样品) 和 0.2% (代表最佳掺杂样品) 的 YBCO 上切割下的小试样进行  $J_c$  性能测量. 首先, 将小试样零场冷却至 77 K, 然后加与样品  $c$  轴平行的外磁场, 测量磁场从 -5 T 变化到 +5 T 时样品的磁滞回线. 最后使用扩展的 Bean 模型计算样品的  $J_c$  值<sup>[22]</sup>, 结果如图 7 所示. 可见, 未掺杂样品的零场  $J_c$  值为  $6.63 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 而具有最佳 NFO 掺杂的样品表现出了更高的零场  $J_c$  值, 为  $8.68 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 大约提高了 31%. 此外, 最佳掺杂的样品在 1 T 外场下呈现出更明显的第二峰值现象,  $J_c$  值为  $4.37 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 说明样品中有更强的  $\delta T_c$  型钉扎<sup>[16]</sup>, 这应该归因于样品内由于 Fe, Ni 对 Cu 位替代而出现的低  $T_c$  弱超导区的贡献. 但随着外场的进一步升高, 掺杂样品的  $J_c$  值迅速降低, 在大于 3 T 的外场下, 其值已低于未掺杂样品. 在约 4 T 的外场下, 其  $J_c$  值降为零, 即样品的不可逆场 ( $H_{irr}$ ) 约为

4 T, 但未掺杂样品的  $H_{irr}$  约为 5 T. 这些现象说明在高场下, 样品内磁性离子的铁磁性越来越强烈, 对超导电性的压制作用越来越显著, 从而导致了较低的  $J_c$  性能.

## 4 结 论

本文研究了纳米 NFO 掺杂对新型 TSIG 工艺制备的单畴 YBCO 超导块材性能的影响. 结果表明: 1) 在低掺杂量下, YBCO 单畴体的正常生长不会受 NFO 掺杂的影响, 但是在高掺杂水平下样品边缘开始出现明显的随机成核; 2) 随着 NFO 掺杂量的增大, 样品的最大磁悬浮力先增大后减小, 掺杂重量比为 0.2% 的样品表现出最大的磁悬浮力 (33.93 N); 3) 随着 NFO 掺杂量的增大, 样品的  $T_c$  值逐渐降低, 而且超导转变宽度 ( $\Delta T_c$ ) 也逐渐变宽; 4) 最佳掺杂下 (重量比为 0.2%) 样品的零场  $J_c$  值为  $8.68 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 比未掺杂样品提高了 31%; 5) EPMA 结果表明, 纳米 NFO 在热处理过程中发生了分解, 而溶解出的 Ni 和 Fe 离子最终以元素替代的方式存在于 YBCO 块材内, 这可以在超导基体中引入晶格畸变和弱超导区作为有效的磁通钉扎中心, 从而提高样品的超导性能. 本文结果对加深理解磁性纳米粒子与 REBCO 超导体的复合方式及其对超导电性的影响有重要意义.

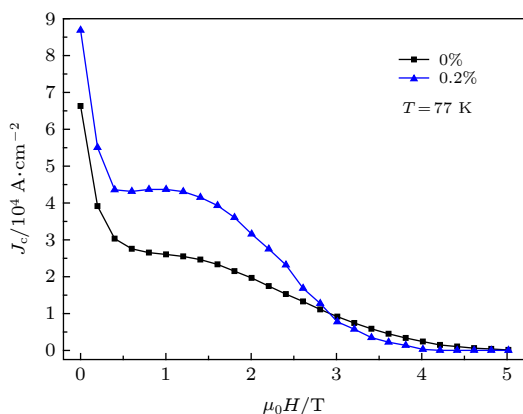


图 7 掺杂重量比为 0% 和 0.2% 纳米 NFO 的 YBCO 样品的  $J_c$  性能

Fig. 7.  $J_c$  property of the YBCO samples doped with weight percent of 0% and 0.2% nano-NFO.

## 参考文献

- [1] Tomita M, Murakami M 2003 *Nature* **421** 517
- [2] Yang W M, Li G Z, Ma J, Chao X X, Li J W 2010 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** 2317
- [3] Kenfaui D, Sibaud P F, Louradour E, Chaud X, Noudem J G 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 3996
- [4] Namburi D K, Durrell J H, Jaroszynski J, Shi Y, Ainslie M, Huang K, Dennis, A R, Hellstrom E E, Cardwell D A 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 125004
- [5] Wang M, Yang W M, Zhang X J, Tang Y N, Wang G F 2012

- Acta Phys. Sin.* **61** 196102 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 张晓菊, 唐艳妮, 王高峰 2012 物理学报 **61** 196102]
- [6] Wang M, Yang W M, Yang P T, Wang X M, Zhang M, Hu C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 227401 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 杨芑焘, 王小梅, 张明, 胡成西 2016 物理学报 **65** 227401]
- [7] Delamare, M P, Monot I, Wang J, Provost J, Desgardin G 1996 *Supercond. Sci. Technol.* **9** 534
- [8] Wang M, Yang W M, Ma J, Tang Y N, Zhang X J, Wang G F 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 346 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 马俊, 唐艳妮, 张晓菊, 王高峰 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 346]
- [9] Chen S Y, Chen I G, Wu M K 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** 916
- [10] Tsuzuki K, Hara S, Xu Y, Morita M, Teshima H, Yanagisawa O, Noudem J, Harnois C, Izumi M 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 2714
- [11] Hara S, Zhou D, Li B, Izumi M 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 7200804
- [12] Guo L P, Yang W M, Guo Y X, Chen L P, Li Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077401 (in Chinese) [郭莉萍, 杨万民, 郭玉霞, 陈丽平, 李强 2015 物理学报 **64** 077401]
- [13] Zhang X J, Zhang Y F, Peng L Q, Zhou W L, Xu Y, Zhou D F, Izumi M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 247401 (in Chinese) [张晓娟, 张玉凤, 彭里其, 周文礼, 徐燕, 周迪帆, 和泉充 2015 物理学报 **64** 247401]
- [14] Li G Z, Dong L, Deng X Y 2016 *J. Am. Ceram. Soc.* **99** 388
- [15] Li G Z, Dong L, Deng X Y 2015 *J. Am. Ceram. Soc.* **98** 2707
- [16] Li G Z, Yang W M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037401 (in Chinese) [李国政, 杨万民 2011 物理学报 **60** 037401]
- [17] Chen S L, Yang W M, Li J W, Yuan X C, Ma J, Wang M 2014 *Physica C* **496** 39
- [18] Shang M, Feng Q, Jiao Y L, Xiao L, Zheng M H, Yan Q Z, Ge C C 2010 *Physica C* **470** 491
- [19] Chen Z, Xue R, Li T, Dai H, Zhang Z 2013 *J. Alloy. Compd.* **553** 53
- [20] Zhou Y X, Scruggs S, Salama K 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** S556
- [21] Huhtinen H, Awana V P S, Gupta A, Kishan H, Laiho R, Narlikar A V 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** S159
- [22] Chen D X, Goldfarb R B 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 2489

# Influence of $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ nanoparticle doping on properties of single-domain YBCO bulk superconductors\*

Li Guo-Zheng<sup>†</sup> Chen Chao*(College of Physics and Materials Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)*

( Received 13 July 2020; revised manuscript received 3 August 2020 )

## Abstract

$\text{NiFe}_2\text{O}_4$  (NFO) nanoparticle doped YBCO bulk superconductors are fabricated by using a novel top-seed infiltration growth (TSIG) technique. The growth morphology, microstructure and superconducting properties are investigated. The results show that at low doping levels, the normal growth of YBCO single domain is not affected by the NFO doping, but at high doping levels, obvious random nucleation appears at the edge of the sample. The measurement of levitation force indicates that the maximum levitation force on the sample first increases and then decreases with the increase of the NFO doping amount, and the largest levitation force is obtained to be 33.93 N for the sample with a doping level of 0.2% (weight percent). Low-temperature magnetization measurement shows that the YBCO sample exhibits that  $T_c$  value decreases with NFO amount increasing, and the superconducting transition width ( $\Delta T_c$ ) also broadens gradually. The sample with the optimal doping (0.2% weight percent) presents an enhanced zero-field  $J_c$  value of  $8.68 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, which is 31% higher than the sample without dopant. In addition, a more obvious secondary peak of  $4.37 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> at a field of 1 T is observed for the 0.2 wt.% NFO doped sample, which indicates the existence of enhanced  $\delta T_c$  pinning in the bulk. The SEM measurement shows that two types of particles are trapped in the Y-123 matrix for YBCO sample doped with 0.2% weight percent NFO: one is the large particle with a size mainly ranging from 0.5  $\mu\text{m}$  to 2.0  $\mu\text{m}$ , and the other is small nano-inclusion mainly ranging from dozens of nanometers to about several hundreds of nanometers. Such a microstructure is very similar to the microstructure of the undoped sample we reported earlier. So whether the NFO nanoparticles exist in the microstructure cannot be judged just from the morphology of the nano-inclusions. The electron probe microarea analysis (EPMA) result shows that different concentration distributions of Ni and Fe elements are observed in the sample doped with 0.2% weight percent NFO, which indicates the separation of NFO nanoparticles in the heat treatment process, and the dissolved Ni and Fe ions finally exist in the form of element substitutions in the YBCO bulk. Such element substitutions can introduce local lattice distortions and weak-superconducting regions into the superconducting matrix, which can act as effective flux pinning centers, and hence improving the properties of the samples.

**Keywords:** single-domain YBCO, top-seeded infiltration growth,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticle doping, superconducting property

**PACS:** 74.62.Dh, 74.72.-h, 74.25.-q

**DOI:** 10.7498/aps.69.20201116

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51872199).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ligz1984@126.com](mailto:ligz1984@126.com)