

# BaZrO<sub>3</sub> 纳米晶添加的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 涂层 导体性能提升研究\*

吴文静<sup>1)</sup> 陈静<sup>1)2)</sup> 黄荣铁<sup>1)2)</sup> 李敏娟<sup>1)†</sup> 刘志勇<sup>1)2)</sup> 蔡传兵<sup>1)2)‡</sup>

1) (上海大学物理系, 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444)

2) (上海市上创超导科技有限公司, 上海 201401)

(2025 年 6 月 4 日收到; 2025 年 7 月 28 日收到修改稿)

为解决传统元素掺杂 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 薄膜时掺杂相尺寸不可控和分布不均匀的问题, 本文采用预制纳米晶添加技术在 YBCO 高温超导带材中引入了弥散分布的小尺寸 BaZrO<sub>3</sub> (BZO) 纳米晶作为磁通钉扎中心, 显著提高了 YBCO 薄膜在低温下的在场性能. 本文系统研究了原始尺寸约为 8 nm 的 BZO 纳米晶不同浓度的添加效果. 实验结果表明, 在 4.2, 30 和 77 K 温度条件下, BZO 纳米晶添加对 YBCO 的自场和在场性能提升的最佳摩尔百分比浓度为 8%. 在 30 K@3 T 时, BZO-8% 的  $F_p$  约为 92.06 GN/m<sup>3</sup>, 分别是 BZO-4% 和原始样品的 1.54 倍和 2.3 倍.

**关键词:** YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, 磁通钉扎, BaZrO<sub>3</sub> 添加, 临界电流密度

**PACS:** 74.78.-w, 68.37.-d, 68.37.Lp

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250728

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250728

## 1 引言

第二代高温超导带材 REBCO (REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, RE = Y 或稀土元素), 因其优异的临界电流密度 ( $J_c$ ) 和高不可逆场 ( $H_{irr}$ )<sup>[1]</sup>, 已成为高磁场磁体应用中的关键材料. 然而, 由于其相干长度较小<sup>[2]</sup>, 且热激活钉扎势垒较低, 导致在高磁场应用中临界电流密度 ( $J_c$ ) 随着穿过超导体的磁通线运动而迅速衰减. 因此有必要在 YBCO 超导涂层导体中引入人工缺陷作为磁通钉扎中心<sup>[3,4]</sup> 减缓磁通线的运动, 从而提高其在场载流性能.

目前常见的 REBCO 薄膜生长工艺有脉冲激光沉积法 (pulsed laser deposition, PLD)<sup>[5]</sup>、有机金属化学气相沉积法 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)<sup>[6]</sup>、金属有机沉积法 (metal-

organic deposition, MOD)<sup>[7]</sup> 和反应共蒸发法 (reactive co-evaporation, RCE)<sup>[8]</sup> 等. 金属有机沉积技术路线作为目前主流的 REBCO 化学制备方法之一, 具有成本低、高效率等特点. 这种基于溶液的方法能够通过原位化学掺杂或外加纳米颗粒的方式精确地引入纳米异质相 (例如 BaZrO<sub>3</sub>, BaHfO<sub>3</sub>, BaSnO<sub>3</sub>)<sup>[9]</sup> 等. 然而, 传统的元素掺杂策略形成的异质相受烧结条件波动影响较大, 形成的纳米异质相在高温下其成核和生长难以控制, 其特征是异质相尺寸较大 (10—50 nm) 和空间分布不均匀<sup>[10,11]</sup>, 特别是在高温处理条件下 (>700 °C). 掺杂相不必要的大尺寸和聚集会导致钉扎性能效率低下, 这就导致了异质相的引入对提升薄膜钉扎性能的作用非常有限. 因为磁通芯子尺寸 ( $\approx 2\xi$ ) 与太大的缺陷尺寸之间无法有效匹配<sup>[2,12]</sup>. 为了解决这个问题, 在 MOD 法制备的 YBCO 超导涂层导

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFE03150200) 和国家自然科学基金 (批准号: 52172271, 52307026, 52477022) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: minjuanli@shu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: cbcai@t.shu.edu.cn

体中引入单分散的小尺寸预制纳米晶<sup>[13,14]</sup>, 能有效地改善异质相尺寸和空间分布的不均匀性, 得到弥散分布的、尺寸可控的人工缺陷, 是提高磁通钉扎和在场临界电流密度的有效手段之一. 预制纳米晶添加技术需预先通过纳米制备工程技术制备所需尺寸的纳米晶, 该技术对纳米晶尺寸具有高度可控性, 接着对纳米晶进行表面改性, 使其能稳定单分散在 YBCO 前驱溶液和晶化薄膜中. 与传统的掺杂衍生异质相相比, 这些预先合成的纳米晶在 YBCO 基质中表现出更好的尺寸均匀性和更优的分散均匀性<sup>[15]</sup>. 我们前期的工作中, 预制纳米晶的尺寸和分布比元素掺杂的调节效果更好, 能够有效地改善 YBCO 薄膜的在场性能<sup>[15,16]</sup>. 但相关纳米晶添加浓度上跨度较大, 一般的研究摩尔百分比浓度是 5%, 10% 或者 15% 等<sup>[17]</sup>. 而在其他研究工作中, 往往采用的添加浓度跨度也比较大, 如 4%, 8% 以及 12%<sup>[15]</sup> 等. 这些研究不能体现预制纳米晶添加浓度在性能上详细的变化规律, 因此需要详细研究其中细化浓度的添加效果以获得准确的最优添加浓度. 而本研究工作中以摩尔百分比浓度为 1% 的增量研究了 4%→10% 不同浓度 8 nm 的 BZO 纳米晶的添加结果, 为纳米晶添加技术的发展提供了更准确的参考价值, 探索其对规模化制备的 MOD-YBCO 高温超导带材在 77 K 自场性能和低温 (4.2—30 K) 在场性能的影响规律. 结果表明, 摩尔百分比为 8% 的添加浓度在测试条件下都具有较优的性能提升效果, 这对预制纳米晶添加技术的开发和对将纳米晶添加技术引入产业化制造中具有较好的指导意义.

## 2 实验方法

### 2.1 实验步骤

本文采用多元醇溶剂热法合成 BZO 纳米晶. 首先, 在剧烈搅拌下将特定化学计量比的正丁醇锆 (质量分数为 80% 丁醇溶液) 和氢氧化钡溶解在聚乙二醇 (TEG) 和乙醇 (EtOH) 的混合溶液中<sup>[9,17]</sup>, 然后加入少量去离子水. 随后将混合物密封在高压釜中并放入烘箱, 在 200 °C 下反应 15 h. 反应结束后, 向溶液中加入过量乙酸乙酯使 BZO 纳米晶沉淀, 然后离心收集. 最后, 借助 [2-(2-甲氧基乙氧基) 乙氧基] 乙酸的表面改性作用, 使 BZO 纳米晶能够单颗粒稳定地分散在乙醇中, 并将浓度调整为 500 mmol/L. 采用低氟金属有机沉积 (LF-MOD)

方法制备了含有经修饰的 BZO 纳米晶的三氟乙酸 (TFA)-YBCO 前驱体溶液. 溶液化学计量比为 Y:Ba:Cu = 1:2:3, 得到阳离子浓度 2.5 mol/L TFA-YBCO 前驱体溶液. 在该方法中醋酸钪和醋酸铜分别溶解在丙酸中形成 Y-丙酸盐和 Cu-丙酸盐络合物. 同时, 将乙酸钡与过量的三氟乙酸反应合成 Ba-三氟乙酸. 将预先单分散的 BZO 分散液在剧烈搅拌下直接混合到 TFA-YBCO 前驱体溶液中, 可以实现 BZO 纳米晶的可控引入 (相对于 Y 的摩尔百分比含量为 4%—10%). YBCO 超导带材的工业规模制备采用连续卷对卷设备 (上海创科超导科技有限公司), 包含三个关键阶段: 溶液涂覆、热解和高温结晶. 衬底结构由 LaMnO<sub>3</sub>/MgO/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Hastelloy C276 组成<sup>[18]</sup>. 首先, 通过溶液涂层沉积 200—300 nm 的原始 TFA-YBCO 自种子层<sup>[19]</sup>, 然后在 350—450 °C 湿氧条件下进行热解. 随后, 将添加 BZO 纳米晶的前驱体溶液通过两个迭代沉积-热解循环依次涂覆在种子层上, 使超导层总厚度达到 1.5 μm. 结晶膜在可控气氛炉 (785—795 °C, 10<sup>-4</sup> bar (1 bar = 10<sup>5</sup> Pa) 中用 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气体混合物加工, 促进外延生长. 在纯 O<sub>2</sub> 气流下, 在 450 °C 下氧化 1 h, 确保其完全转变为超导正交相.

### 2.2 测试方法

为确保 BZO 纳米晶的单分散特性, 本研究通过动态光散射 (DLS) 对其分散状态进行验证. 薄膜物相分析采用配备 Cu-Kα 辐射源的 X 射线衍射仪 (XRD) 完成. YBCO 薄膜截面样品由 FEI 聚焦离子束 (FIB) 系统制备, 并通过高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 观测微观形貌. 纳米晶的微观形貌也通过 HRTEM 观测得到. YBCO 纳米复合薄膜的磁滞回线由 Quantum Design 物理性质测量系统 (PPMS) 测定, 临界电流密度 ( $J_c$ ) 通过 Bean 模型计算得出. 米级长度的 YBCO 带材的感应临界电流 ( $I_c$ ) 通过 Mcoder 临界电流测试仪采用非接触式交流感应法进行测量, 其原理基于交变磁场在超导层中激发环形感应电流并监测失超效应.

## 3 结果与讨论

### 3.1 薄膜物相表征

通常, 制备的 BZO 纳米晶的原始尺寸是纳米晶添加技术的重要参数. 图 1 显示了本研究制备

的 BZO 纳米晶的 HRTEM 测试结果. 图 1(a) 中 BZO 纳米晶尺寸均匀, 呈弥散分布, 且无明显聚集现象. 图 1(b) 的 XRD 图证实了所收集的纳米晶为 BZO, 与标准卡片 (PDF#06-0399) 匹配, 图谱中没有观察到明显的杂相峰, 证明其结晶度较好. 图 1(c) 是通过 TEM 测量得到的 BZO 纳米晶的尺寸分布, BZO 纳米晶的平均尺寸为  $(8 \pm 2)$  nm. 在确定制备的 BZO 纳米晶体的原始尺寸后, 纳米晶在 YBCO 前驱溶液中相应的分散状态对于将分布良好的非超导粒子引入 YBCO 薄膜至关重要. 纳米晶在溶液中的分散状态可以通过 DLS 测量来证实, 将制备的 BZO 纳米晶乙醇分散液直接加入高盐高酸 TFA-YBCO 前驱体溶液中. BZO 纳米晶在乙醇和 YBCO 溶液中的 DLS 尺寸分布分别如图 1(d) 所示, 单峰形态的曲线表明其在乙醇和 YBCO 溶液中均处于稳定的单分散状态. 将含有单分散 BZO 纳米晶的 YBCO 溶液涂覆在柔性衬底上并高温烧结以外延生长 YBCO 涂层导体.

图 2(a) 中不同摩尔百分比浓度 (4%—10%, 以

1% 增量) BZO-YBCO 纳米晶的 XRD 图谱表明, 所有的 YBCO 薄膜都具有良好的  $c$  轴取向. 如图 2(b) 和图 2(c) 所示, 当摩尔百分比浓度为 10% 时, YBCO(103)- $\varphi$  扫描峰和 YBCO(005)- $\omega$  扫描峰的半峰全宽 (FWHM) 分别为  $3.68^\circ$  和  $1.29^\circ$ , 显示出较好的面内和面外取向. 此外, 图 2(d) 所示的 FWHM 结果表明, 在不同 BZO 浓度下, 所有 YBCO 带的织构都保持良好状态, 这是高性能 YBCO 薄膜的基础.

图 3(a) 为添加摩尔百分比浓度 8% BZO 纳米晶的 YBCO 纳米复合膜微观结构的 HRTEM 图像, 可以看出膜均匀致密, 厚度约为  $1.5 \mu\text{m}$ . 图 3(b) 和图 3(c) 所示截面微结构的放大图清楚地显示了 BZO 纳米颗粒在 YBCO 基体中的随机分布. 图 3(d) 为高温处理后包埋在 YBCO 薄膜中的 BZO 纳米晶的尺寸分布, 平均尺寸为  $(12 \pm 4)$  nm. 结果表明, 在初始 BZO 颗粒中存在明显的粗化现象, 这是纳米晶添加技术中常见的效应, 如先前报道的文献 [15]. 然而, 经过高温薄膜生长过程后, BZO 纳米晶的尺寸

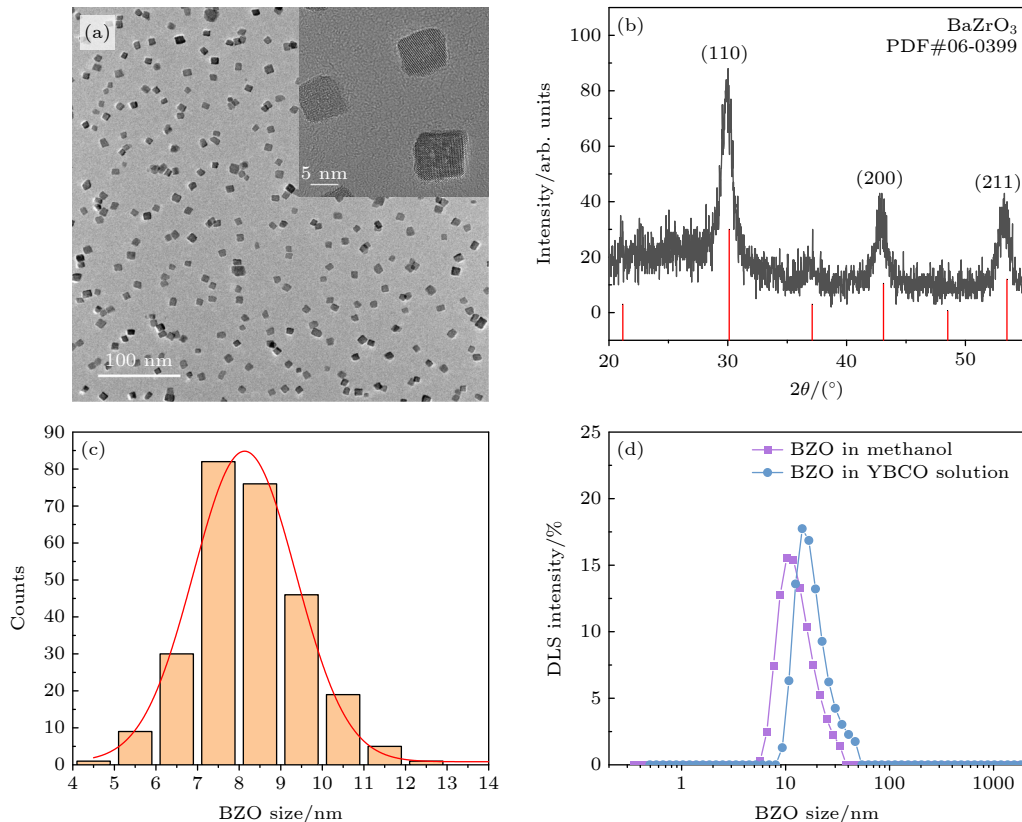


图 1 (a) BZO 纳米晶的 TEM 图像; (b) XRD 图谱; (c) 平均粒径为  $(8 \pm 2)$  nm 的粒径分布曲线; (d) BZO 纳米晶在乙醇和 YBCO 前驱体溶液中的动态光散射 (DLS) 粒径分布曲线

Fig. 1. (a) TEM image of BZO nanocrystals; (b) XRD pattern; (c) size distribution profile indicating an average particle size of  $(8 \pm 2)$  nm; (d) dynamic light scattering (DLS) particle size distribution curves of BZO nanocrystals in ethanol and YBCO precursor solutions.

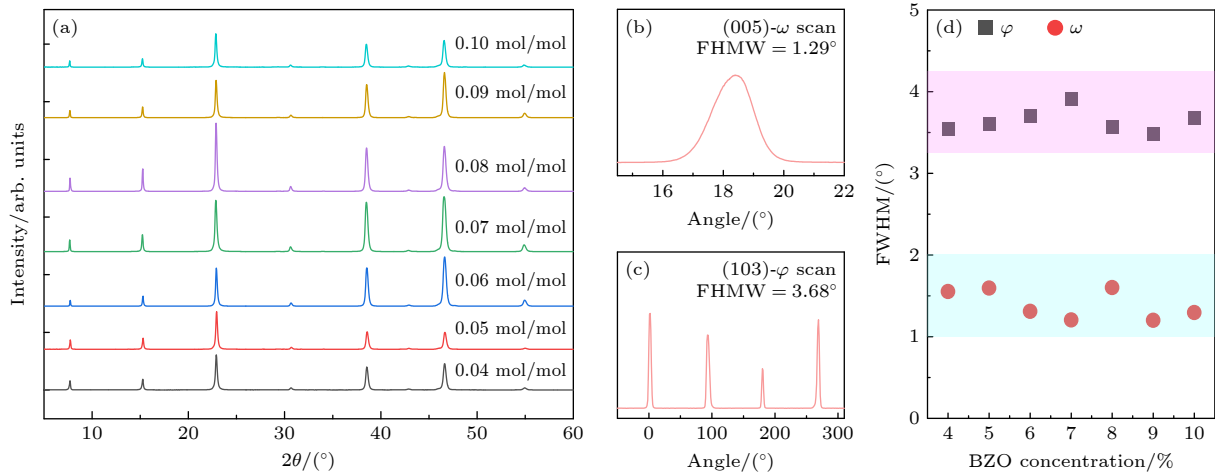


图 2 (a) 不同 BZO 浓度下 BZO-YBCO 膜的 XRD 谱图; (b) 添加摩尔百分比浓度为 10% BZO 纳米晶的 YBCO 膜的 (005)- $\omega$  扫描图和 (c) (103)- $\phi$  扫描图; (d) 添加不同 BZO 浓度下面外  $\omega$ -(005) 扫描图和面内  $\phi$ -(103) YBCO 膜的 FWHM 图

Fig. 2. (a) The XRD patterns of the BZO-YBCO films with different BZO concentrations and (b) the (005)- $\omega$  scan and (c) (103)- $\phi$  scan of the BZO nanocrystal added YBCO film with 0.10 mol/mol; (d) FWHM of out-of-plane  $\omega$ -(005) scan and in-plane  $\phi$ -(103) YBCO films added with different BZO concentrations.

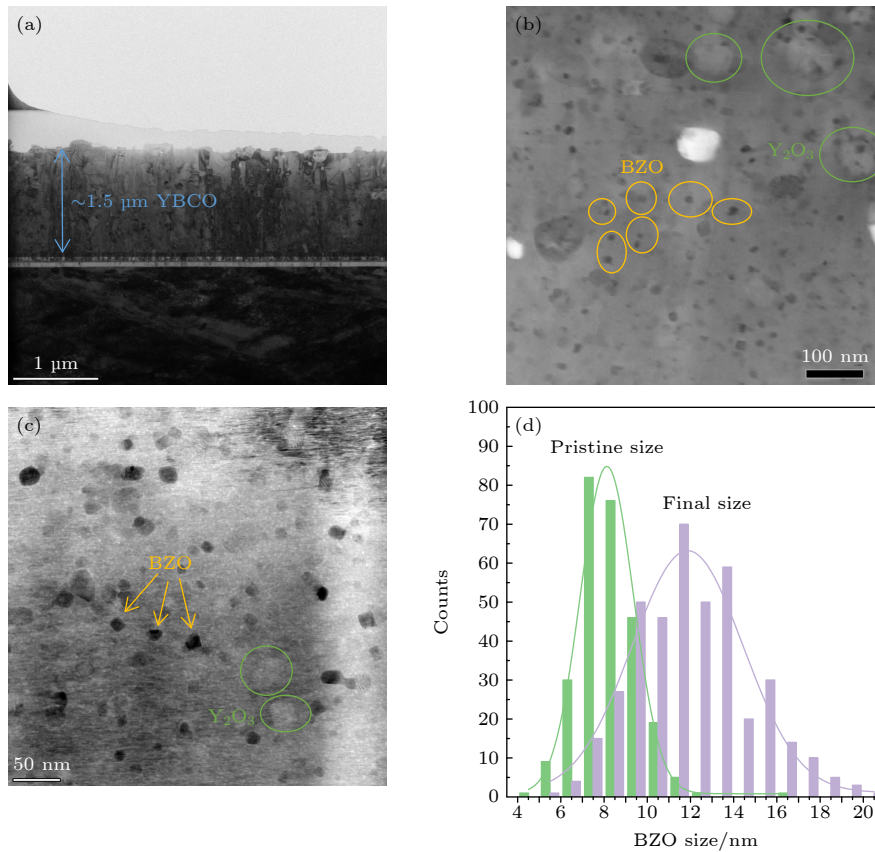


图 3 YBCO 纳米复合膜的组成与微观结构 (a) TEM 横截面图; (b), (c) 高分辨率 TEM 图像 (显示 YBCO 基体内孤立的、随机取向的 BZO 颗粒); (d) 粗化前后 BZO 纳米晶的粒径分布

Fig. 3. Composition and microstructure of the YBCO nanocomposite film: (a) TEM cross-sectional image; (b), (c) high-resolution TEM image showing isolated, randomly oriented BaZrO<sub>3</sub> particles within the YBCO matrix; (d) particle size distribution comparison of BZO nanocrystals before and after coarsening.

仍比化学元素掺杂形成的异质相颗粒要小. 与化学元素掺杂相比, 较小尺寸的 BZO 颗粒可以合理地

作为更有效的钉扎中心, 以阻止磁通涡流的运动, 从而提高 YBCO 薄膜的在场载流能力.

### 3.2 薄膜超导性能

77 K 下自场临界电流 ( $I_c$ ) 是评价 YBCO 带材性能较重要的参数之一. 图 4 显示了 77 K 时  $I_c$  与 YBCO 带中 BZO 纳米晶浓度的非单调关系, 这里所制备的 YBCO 带材均约有 1 m 长. 在添加 7% BZO 纳米晶时, 观察到从  $(500 \pm 10)$  A (原始 YBCO 带) 到  $(550 \pm 10)$  A 的明显  $I_c$  提高. 当 BZO 纳米晶摩尔百分比浓度小于 7% 时, 77 K 下  $I_c$  的增强随 BZO 的加入呈线性增加. 相比之下, 摩尔百分比浓度超过 7% 的临界阈值, BZO 纳米晶的添加诱导  $I_c$  逐渐下降, 添加量为 10% 时达到  $(380 \pm 10)$  A. 较高浓度下样品性能的下降可能源于两个相互竞争的机制: (i) 由于非超导相的增加而减少了超导相占比, 同时超导-非超导界面积大大增加; (ii) 当 BZO 浓度增加时, 由于分解了更小的 BZO 颗粒而释放了更多的 Zr 离子, 从而影响了膜的生长和膜的质量 (根据先前的研究文献 [16]). 这些发现证明了通过控制 BZO 纳米颗粒浓度的临界电流调制, 也表明了磁通钉扎增强和超导薄膜质量之间的潜在平衡. 77 K@self-field 处  $I_c$  由薄膜生长质量决定, 更少的缺陷将导致更高的  $I_c$  在 77 K @self-field. 在我们之前的研究中, 发现少量的元素掺杂有利于 MOD 衍生 YBCO 薄膜 [20] 的生长, 包括 Zr, Hf 和 Sn 等. 此外, 在 YBCO 薄膜中引入的小尺寸纳米晶在接近 800 °C 的高温下不稳定, 它们会分解并释放出 Zr 离子, 作为传统的元素掺

杂情况. 幸运的是, 在摩尔百分比浓度为 4%—7% 的情况下, Zr 离子的释放量有利于薄膜的生长, 添加 4%—7% BZO 纳米晶后, 77 K@self-field 的  $I_c$  比未添加 BZO 时高, 且在摩尔百分比浓度为 7% 时达到最高的改善. 然而, 当 BZO 摩尔百分比浓度增加到 9%—10% 时, Zr 离子的释放量超过了最佳浓度,  $I_c$  在 77 K@self-field 处下降. 另一方面, 在薄膜生长质量得到保证的情况下, 纳米晶的存在也能对自场下产生磁通线形成钉扎效果, 从而提升了自场临界电流性能, 这是一个薄膜质量和纳米缺陷密度之间的竞争结果.

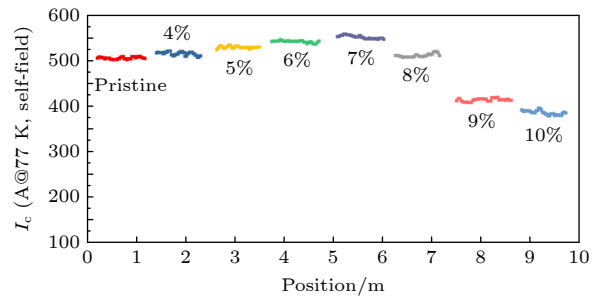


图 4 不同浓度 BZO 纳米晶的 YBCO 薄膜在 77 K 下的自场  $I_c$ . 每条 YBCO 带长约 1 m

Fig. 4. Self-field  $I_c$  of YBCO films with different BZO concentrations at 77 K. Each tape is about 1 m.

图 5(a) 为在 4.2 K 和 30 K 不同温度下 BZO-YBCO 复合薄膜临界电流密度 ( $J_c$ ) 对磁场的依赖关系. 由图 5(a) 可以观察到, 在 4.2 K 和 30 K 低温条件下, 加入 BZO 纳米晶后, 研究中所有添加

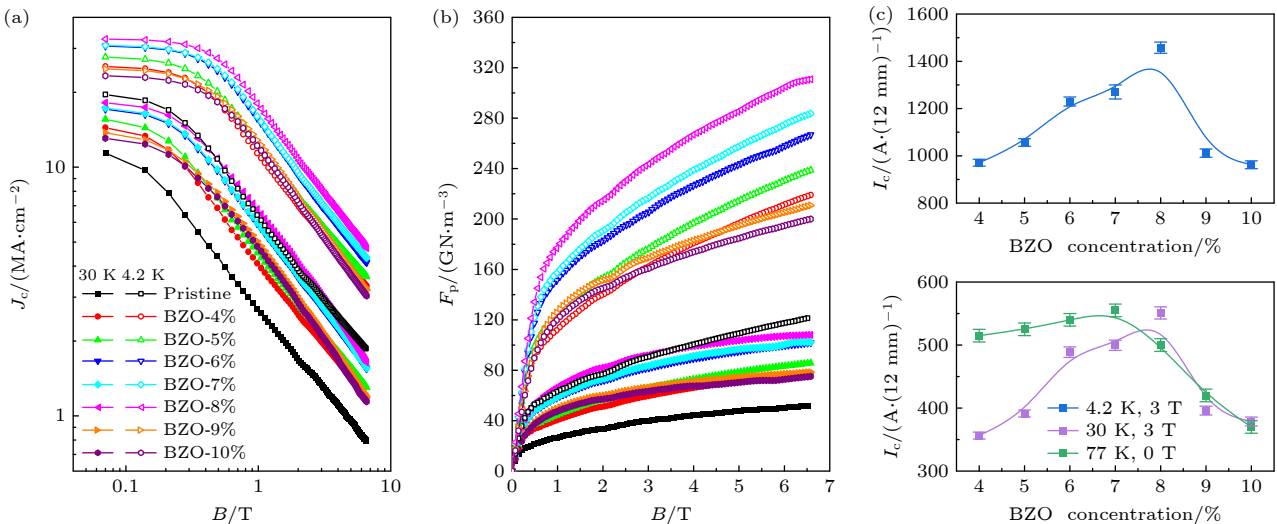


图 5 不同温度下添加不同浓度 BZO 纳米晶的 YBCO 薄膜的临界电流密度 ( $J_c$ ) 和钉扎力 ( $F_p$ ) 随磁场的变化 (a) 4.2 K; (b) 30 K. (c) 不同温度和磁场条件下加入不同浓度 BZO 的 YBCO 薄膜的临界电流 ( $I_c$ ) 的变化趋势

Fig. 5. Variation of critical current density ( $J_c$ ) and pinning force ( $F_p$ ) with magnetic field for YBCO films with different concentrations of BZO nanocrystals at various temperatures: (a) 4.2 K; (b) 30 K. (c) Variation trend of critical current ( $I_c$ ) for YBCO films with different concentrations of BZO addition under various temperatures and magnetic field conditions.

BZO 纳米晶的 YBCO 带的在场  $J_c$  都得到了显著的改善. 其中, 添加摩尔百分比浓度为 6%—8% BZO 纳米晶的效果较好, 且添加摩尔百分比浓度为 8% BZO 纳米晶的 YBCO 复合薄膜  $J_c$  在测试磁场范围内最高. 低温下的  $J_c$  趋势与 77 K 自场时的  $I_c$  相似, 即随着 BZO 纳米晶添加浓度的增加,  $J_c$  先升高后降低. 以往的研究通常以广泛的增量 (例如摩尔百分比浓度为 5%—10%) 来研究纳米晶的添加浓度, 本研究对中间浓度进行了系统的研究, 结果表明其中摩尔百分比浓度为 8% 的 BZO 纳米晶添加对低温在场性能的提升效果更优, 这些细化的结果为超导材料的纳米缺陷工程提供了有价值的指导. 为进一步研究磁通钉扎特性, 图 5(b) 显示了不同浓度 BZO 纳米晶在 4.2 K 和 30 K 下 YBCO 薄膜的钉扎力密度  $F_p$  随磁场  $B$  的变化. 由图 5(b) 可以观察到, BZO-8% 的 YBCO 薄膜的  $F_p$  在整个低温 30 K 范围内都有明显的改善. 在 30 K@3 T 时, BZO-8% 的  $F_p$  约为 92.06 GN/m<sup>3</sup>, 分别是 BZO-4% 和原始样品的 1.54 倍和 2.3 倍. 当 BZO 纳米晶摩尔百分比浓度为 9%—10% 时, 外加磁场在 30 K 和 4.2 K 下分别高于 4 T 和 3 T 时, 此时的钉扎力  $F_p$  比 BZO-4% 时要小.

通常, YBCO 薄膜中作为磁通钉扎中心的纳米缺陷不仅是添加的 BZO 颗粒, 还包括薄膜生长过程中的生长缺陷. 当复合薄膜中加入摩尔百分比浓度为 10% 的 BZO 纳米晶时, BZO 纳米晶浓度越高, 界面面积越大, 从而影响 YBCO 膜的生长和质量, 这一点在 77 K 自场的  $I_c$  结果中得到了证明. 因此高磁场下 BZO 纳米晶摩尔百分比浓度为 9%—10% 时的在场钉扎力  $F_p$  低于其他添加浓度的原因是由于薄膜质量较差, 不利于低温下的磁通钉扎. 图 5(c) 总结了不同 BZO 纳米晶浓度添加的 YBCO 带在 77 K 自场以及 30 K@3 T 和 4.2 K@3 T 下的  $I_c$  对比, 在 4.2 K 和 30 K 低温下,  $I_c$  的变化趋势与 BZO 浓度一致. 由图 5(c) 可以看出, 在 4.2—30 K 的温度范围内, 引入的 BZO 颗粒作为钉扎中心表现出相似的钉扎效果. 在场性能由 YBCO 薄膜的有效钉扎位点决定, 8%-BZO 纳米晶的添加刚好是纳米晶对薄膜质量破坏性和小尺寸 BZO 有效钉扎位点密度之间的平衡结果. 这一发现可以指导我们进一步调制高性能的 YBCO 超导薄膜, 以适应不同的应用条件, 如大电流电缆和高场磁体应用.

## 4 结 论

本研究采用多元醇溶剂热法成功合成了初始尺寸约为 8 nm 的 BZO 纳米晶, 并将其掺入 YBCO 薄膜中, 探讨了其不同浓度对 YBCO 涂层导体性能的影响. 实验结果表明, 当 BZO 纳米晶摩尔百分比浓度为 8% 时, 在 4.2 K 和 30 K 时, YBCO 薄膜的性能增强最为显著. 其中, BZO 纳米晶摩尔百分比添加量为 8% 的 YBCO 薄膜在 4.2 K, 3 T 和 30 K, 3 T 条件下的临界电流 ( $I_c$ ) 最高, 表现出优异的低温在场性能. 这表明摩尔百分比浓度为 8% 的 BZO 提供了最佳的磁通钉扎效果, 显著地提高了低温下整个磁场范围内的载流能力. 这些发现对于高性能超导材料的设计和应用至关重要, 特别是需要在低温条件下运行的领域, 如超导磁体和电缆.

## 参考文献

- [1] Obradors X, Puig T 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 044003
- [2] Kwok W K, Welp U, Glatz A, Koshelev A E, Kihlstrom K J, Crabtree G W 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 116501
- [3] MacManus-Driscoll J L, Foltyn S R, Jia Q X, et al. 2004 *Nat. Mater.* **3** 439
- [4] Foltyn S R, Civale L, MacManus-Driscoll J L, Jia Q X, Maiorov B, Wang H, Maley M 2007 *Nat. Mater.* **6** 631
- [5] Maiorov B, Bailly S A, Zhou H, et al. 2009 *Nat. Mater.* **8** 398
- [6] Zhang S, Xu S, Fan Z, Jiang P, Han Z, Yang G, Chen Y 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 125002
- [7] Araki T, Hirabayashi I 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** R71
- [8] Matias V, Rowley E J, Coulter Y, Maiorov B, Holesinger T, Yung C, Glyantsev V, Moeckly B 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 014018
- [9] Li Z, Coll M, Mundet B, et al. 2019 *Sci. Rep.* **9** 5828
- [10] Miura M, Yoshizumi M, Izumi T, Shiohara Y 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 014013
- [11] Miura M, Maiorov B, Balakirev F F, Kato T, Sato M, Takagi Y, Izumi T, Civale L 2016 *Sci. Rep.* **6** 20436
- [12] Tinkham M, Emery V 1996 *Phys. Today* **49** 74
- [13] Rijckaert H, Pollefeyt G, Sieger M, et al. 2017 *Chem. Mater.* **29** 6104
- [14] Díez-Sierra J, López-Domínguez P, Rijckaert H, et al. 2020 *ACS Appl. Nano Mater.* **3** 5542
- [15] Huang R, Chen J, Liu Z, Dou W, Zhang N, Cai C 2023 *Supercond. Sci. Technol.* **36** 125002
- [16] Yang L, Huang R, Zhou X, Chen J, Liu Z, Li M, Wang G, Cai C 2024 *Supercond. Sci. Technol.* **37** 065017
- [17] Obradors X, Puig T, Li Z, et al. 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 044001
- [18] Fan F, Lu Y, Liu Z, Zhou D, Guo Y, Bai C, Li M, Cai C 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 055003
- [19] Chen J, Huang R, Zhou D, Li M, Bai C, Liu Z, Cai C 2022 *J. Eur. Ceram. Soc.* **42** 6542
- [20] Chen J, Zhou X, Huang R, Li M, Liu Z, Cai C 2024 *Thin Solid Films* **804** 140502

# Research on enhancing the performance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductor through the incorporation of $\text{BaZrO}_3$ nanocrystals\*

WU Wenjing<sup>1)</sup> CHEN Jing<sup>1)2)</sup> HUANG Rongtie<sup>1)2)</sup> LI Minjuan<sup>1)†</sup>  
 LIU Zhiyong<sup>1)2)</sup> CAI Chuanbing<sup>1)2)‡</sup>

<sup>1)</sup> (*Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductor, Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

<sup>2)</sup> (*Shanghai Creative Superconductor Technologies Co. Ltd., Shanghai 201401, China*)

( Received 4 June 2025; revised manuscript received 28 July 2025 )

## Abstract

Introducing nano heterogeneous phases into  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) superconducting films is a common way to improve its flux pinning properties and in-field performances. The heterogeneous phases generated through traditional element doping strategies is highly sensitive to the sintering conditions, making the growth of the nano inclusions difficult to control under high-temperature environments. Unintended large-scale growth and aggregation of the doped phases can significantly reduce the efficiency of flux pinning of YBCO superconducting films, thereby limiting the overall enhancement of pinning performance in superconducting thin films. This occurs because the size of the vortex core ( $\approx 2\xi$ ) cannot be effectively matched with excessively large defects. To address this challenge, the incorporation of monodisperse, small-sized prefabricated nanocrystals into YBCO superconducting coated conductors fabricated by the metal organic deposition (MOD) method offers an effective solution. This method can significantly improve the uniformity of heterogeneous phase size and spatial distribution, enabling the formation of dispersed and size-controllable artificial flux pinning centers. Such a strategy represents one of the most promising methods of enhancing magnetic flux pinning and increasing the critical current density under applied magnetic fields through MOD route. In this study, the prefabricated nanocrystals addition technology is adopted to introduce the mono-dispersed small-sized  $\text{BaZrO}_3$  (BZO) nanocrystals as flux pinning centers in YBCO high-temperature superconducting tapes, resulting in the significant enhancement of the in-field performance of YBCO films at low temperatures. This study systematically examines the effects of adding BZO nanocrystals with an initial size of approximately 8 nm at various mol concentrations from 4% to 10%. The results indicate that the optimal mole concentration for improving both self-field and field properties of YBCO is 8% BZO under temperature conditions of 4.2, 30, and 77 K. At 30 K and 3 T, the  $F_p$  value for the sample with a mole concentration of 8% BZO is approximately  $92.06 \text{ GN/m}^3$ , which is 1.54 times higher than that of the mole concentration of 4% BZO sample and 2.3 times higher than that of the original sample.

**Keywords:**  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , flux pinning,  $\text{BaZrO}_3$  addition, critical current

**PACS:** 74.78.-w, 68.37.-d, 68.37.Lp

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250728](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250728)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250728](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250728)

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFE03150200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52172271, 52307026, 52477022).

† Corresponding author. E-mail: [minjuanli@shu.edu.cn](mailto:minjuanli@shu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [cbcai@t.shu.edu.cn](mailto:cbcai@t.shu.edu.cn)

## BaZrO<sub>3</sub>纳米晶添加的YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>涂层导体性能提升研究

吴文静 陈静 黄荣铁 李敏娟 刘志勇 蔡传兵

## Research on enhancing the performance of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> coated conductor through the incorporation of BaZrO<sub>3</sub> nanocrystals

WU Wenjing CHEN Jing HUANG Rongtie LI Minjuan LIU Zhiyong CAI Chuanbing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 197401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250728

CSTR: 32037.14.aps.74.20250728

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250728>

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

#### MgO衬底上YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>台阶边沿型约瑟夫森结的制备及特性

Fabrication and characterization of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> step-edge Josephson junctions on MgO substrate for high-temperature superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(3): 037401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201291>

#### YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>薄膜微结构的同步辐射三维倒空间扫描研究

Microstructure study of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> thin film with synchrotron-based three-dimensional reciprocal space mapping

物理学报. 2023, 72(4): 046101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221776>

#### 瞬态液相辅助无氟化学法制备YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>与完全[Ba-Cu-O]<sub>L</sub>液相膜: 中高温热处理过程中的相转变

Transient liquid phase-assisted fluorine-free chemical fabrication of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> and complete [Ba-Cu-O]<sub>L</sub> liquid phase films: Phase transformations during intermediate-high temperature heat treatment

物理学报. 2025, 74(10): 107401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250037>

#### EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>超导带材中掺杂相对He<sup>+</sup>离子辐照缺陷演化及超导电性的影响

Effect of doping on evolution of He<sup>+</sup> ion irradiation defects and superconductivity in EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> superconducting strips

物理学报. 2024, 73(8): 087401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240124>

#### H<sup>+</sup>离子辐照Y<sub>0.5</sub>Gd<sub>0.5</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>超导层中的缺陷演化

Defect evolution in Y<sub>0.5</sub>Gd<sub>0.5</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> superconducting layer irradiated by H<sup>+</sup> ions

物理学报. 2022, 71(23): 237401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221612>

#### Cu<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>9</sub>/MoO<sub>3</sub>纳米复合材料制备及三甲胺气敏性能研究

Research on synthesis of Cu<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>9</sub>/MoO<sub>3</sub> nanocomposite and trimethylamine gas sensing properties

物理学报. 2023, 72(16): 168103 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230720>