

插入二氧化铈薄膜提高MOD-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>厚膜超导性能的研究

丁发柱 古宏伟 王洪艳 屈飞 商红静 张慧亮 董泽斌 张贺 周微微

Enhanced superconducting properties in MOD-YBCO thick films with CeO<sub>2</sub> interlayer

Ding Fa-Zhu Gu Hong-Wei Wang Hong-Yan Qu Fei Shang Hong-Jing Zhang Hui-Liang Dong Ze-Bin Zhang He Zhou Wei-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 097401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.097401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[MgB<sub>2</sub> 超导膜的厚度与其 J<sub>c</sub>\(5K0T\) 的关系](#)

[Thickness dependence of critical current density in MgB<sub>2</sub> films fabricated by hybrid physical-chemical vapor deposition](#)

物理学报.2013, 62(19): 197401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.197401>

[掺杂 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 BaCeO<sub>3</sub> 提高 MOD-YBCO 超导性能的研究](#)

[Enhanced flux pinning in MOD-YBCO films with co-doping of BaCeO<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles](#)

物理学报.2013, 62(13): 137401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.137401>

[晶体相场法模拟异质外延过程中界面形态演化与晶向倾侧](#)

[Simulation of morphological evolution and crystallographic tilt in heteroepitaxial growth using phase-field crystal method](#)

物理学报.2012, 61(10): 108103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.108103>

# 插入二氧化铈薄膜提高MOD-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>厚膜超导性能的研究\*

丁发柱<sup>1)2)</sup> 古宏伟<sup>1)2)†</sup> 王洪艳<sup>1)2)</sup> 屈飞<sup>1)2)</sup> 商红静<sup>3)</sup> 张慧亮<sup>1)2)</sup>  
董泽斌<sup>1)2)</sup> 张贺<sup>1)2)</sup> 周微微<sup>1)2)</sup>

1)(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2)(中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190)

3)(青岛科技大学材料科学与工程学院, 青岛 266042)

(2016年1月11日收到; 2016年2月2日收到修改稿)

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>(YBCO)膜存在“厚度效应”: 随着厚度增加, YBCO薄膜的临界电流密度下降, 尤其是YBCO薄膜的厚度超过1 μm时, 它的临界电流密度急剧下降. 本文在YBCO薄膜之间引入极薄的二氧化铈(CeO<sub>2</sub>)薄膜, 成功制备出结构为YBCO/YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO的超导厚膜. 所制备的厚度为2 μm的YBCO膜临界电流密度为1.36 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 自场), 其性能比相同厚度的纯YBCO膜有了较大幅度的提升. 研究表明CeO<sub>2</sub>薄膜起到了传递织构、松弛应力的作用.

**关键词:** 钇钡铜氧, 二氧化铈插层, 厚膜

**PACS:** 74.78.Fk, 81.15.Lm

**DOI:** 10.7498/aps.65.097401

## 1 引言

以YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>(YBCO)涂层导体为代表的第二代高温超导带材由于其优异的本征性能(77 K下不可逆场达到7 T、临界电流密度达10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>), 吸引着人们不断探索和研究其实用成材技术. YBCO涂层导体具有广阔的应用前景和巨大的市场潜力, 可广泛用于能源、军事工业、医疗、交通及科学研究等方面, 是目前超导材料领域一个重要发展方向. 尤其是近年来YBCO超导带材取得了突破性的进展, 国内外至少有四家单位能够制备出长度达1000 m, 临界电流I<sub>c</sub>超过250 A/cm的YBCO带材<sup>[1-4]</sup>. 然而, 目前制备YBCO带材的成本极高. 由世界最早制备出千米级的二代制造商家美国SuperPower公司制备的YBCO超导带材的价格约为300美元/kA·m, 是铜线的40倍以上, 要

使其应用领域更加具有竞争力, 必须进一步提高它的性能、进而提高性价比才能满足广泛的需求. YBCO作为涂层导体能够在强电领域应用, 主要是由于它具有能够负载电流且不损耗的特性. 对超导带材来说, 在临界电流密度(J<sub>c</sub>)保持不变的情况下增加它的厚度也就提高了它的载流能力. 因此, 如何制备具有高临界电流密度的厚膜就成为当前YBCO高温超导涂层应用过程中亟待解决的关键问题.

制备具有高载流能力的YBCO厚膜是个难题, 这是由YBCO超导材料的一个特点决定的: 当YBCO薄膜的厚度超过1 μm时, 它的临界电流密度急剧下降. 为此, 国内外多个科研小组开展了提高YBCO厚膜超导性能的研究<sup>[5-17]</sup>. 2009年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室Feldmann等<sup>[18]</sup>在钛酸锶单晶基体上采用脉冲激光法(PLD)制备了

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032702)、国家自然科学基金(批准号: 51577180, 51272250)和北京市自然科学基金面上项目(批准号: 2152035)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guhw@mail.iee.ac.cn

含有纳米锆酸钡 (BZO) 和纳米氧化钇 ( $Y_2O_3$ ) 的 YBCO 复合厚膜, 厚度达  $9\ \mu\text{m}$ , 临界电流达到  $1500\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-1}$  (75.5 K). 研究人员认为与纯 YBCO 厚膜相比, 含有纳米颗粒的 YBCO 复合厚膜的膜层与基体界面处的第二相沉积物阻止了 YBCO 膜随厚度增加临界电流密度急剧下降的趋势, 同时纳米 BZO 和  $Y_2O_3$  起到了磁通钉扎的作用并改善了 YBCO 厚膜的微观结构, 所以制备的 YBCO 厚膜临界电流很高. 2010 年, 该实验室用  $Y_2O_3$  作为隔离层, 制备了织构为 YSZ/CeO<sub>2</sub> (40 nm)/YBCO(0.6  $\mu\text{m}$ )/  $Y_2O_3$  (40 nm)/YBCO(0.6  $\mu\text{m}$ )  $Y_2O_3$ (40 nm)/ YBCO(0.6  $\mu\text{m}$ ) 的 YBCO 厚膜, 总厚度为  $1.8\ \mu\text{m}$ , 临界电流密度达到  $4.3\ \text{MA}/\text{cm}^2$  (75.6 K, self-field)<sup>[18]</sup>. 2010 年, Sarkara 等<sup>[19]</sup> 用非超导相的  $YBa_2Cu_3O_x$  纳米点作为中间层, 通过 PLD 法制备出  $5\ \mu\text{m}$  的 YBCO 多层厚膜,  $J_c$  达到  $1.66\ \text{MA}/\text{cm}^2$ ,  $I_c$  达到  $830\ \text{A}/\text{cm-w}$ (77 K)<sup>[19]</sup>.

然而, 目前通过原位生长的 PLD 法制备 YBCO 多层厚膜的研究较多, 但 PLD 法制备 YBCO 膜的工艺不仅非常复杂而且沉积速率慢, 也不易推广到规模化生产. 而通过低成本的化学溶液法制备 YBCO 多层厚膜的研究较少<sup>[20-23]</sup>. 2008 年, 美国休斯顿大学 Ghalsasi 等<sup>[24]</sup> 采用三氟乙酸盐-金属有机沉积法 (TFA-MOD) 制备了厚度为  $1\ \mu\text{m}$  的五层 YBCO 厚膜, 临界电流密度超过  $1.6\ \text{MA}/\text{cm}^2$ , 临界电流达到  $160\ \text{A}/\text{cm}$ . 2014 年, Shu 等<sup>[25]</sup> 通过低氟 MOD 法制备了  $1.7\ \mu\text{m}$  的 YBCO 超导膜, 临界电流密度达到  $10^5\ \text{A}/\text{cm}^2$ . TFA-MOD 法制备 YBCO 厚膜存在很大挑战, 这是因为 TFA-MOD 法在制备 YBCO 膜的热处理阶段是个剧烈的放热反应, 有大量气体逸出, 前驱膜的厚度会降低一半左右, 这种体积的巨大变化会产生应力进而导致生成裂纹. 另一个问题是化学溶液法在制备多层厚膜时界面问题复杂, 此外插层的制备条件也是限制 YBCO 厚膜超导性能的关键因素. 本文采用三氟乙酸盐-金属有机沉积法 (TFA-MOD) 与磁控溅射相结合的方法开展了二氧化铈作为插层的 YBCO 多层厚膜的研究.

## 2 实验过程

实验采用 TFA-MOD 工艺在  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) 单晶衬底上制备两层掺杂  $\text{BaTiO}_3$  (BTO) 的 YBCO 薄膜, 然后采用射频磁控溅射法制备二氧化铈

( $\text{CeO}_2$ ) 薄膜, 最后采用 TFA-MOD 法再制备一层 YBCO 薄膜.

TFA-MOD 法具体工艺如下. 配制前驱液: 按照金属元素  $Y : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : (2+x) : 3$  的摩尔比例把  $Y(\text{CH}_3\text{COO})_3$ ,  $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  和  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  混合 ( $x$  取决于此后加入乙铈丙酮钛的量), 室温溶于含 25% 的三氟乙酸的去离子水溶液中配成溶液; 配制的混合物在  $75\ ^\circ\text{C}$  用磁力搅拌器搅拌 4 h 提高溶液均匀性, 然后采用真空旋转蒸发仪把溶液蒸发为蓝色的溶胶, 在蓝色的溶胶中加入甲醇经磁力搅拌后再次用真空旋转蒸发仪把溶液蒸发为蓝色的溶胶, 把溶胶溶于适量的甲醇后加入  $x\ \text{mol}$  的乙铈丙酮钛中制成金属离子总浓度为  $1.5\ \text{mol}/\text{L}$  的前驱液. 把前驱液用匀胶机涂覆在超声清洗过的 LAO 单晶基体 (转速为  $3000\ \text{r}/\text{min}$ , 加速时间为  $0.4\ \text{s}$ , 匀胶时间是  $2\ \text{min}$ ) 上, 将样品放在石英板上迅速送入管式石英炉里进行低温热分解和高温热处理, 低温热分解在  $400\ ^\circ\text{C}$  下进行, 其目的是为了使三氟乙酸盐分解, 形成无定形的前驱膜并排出有害的残余物质, 而高温热处理一般在  $700\text{--}900\ ^\circ\text{C}$ 、湿润的氩气和氧气氛围下进行, 所形成的无定形前驱物形成四方相的 YBCO, 然后在干燥的氧气环境下冷却到  $500\ ^\circ\text{C}$ , 使四方相的 YBCO 吸氧转变为具有超导性能的 YBCO 正交相, 随后样品在氧气氛围下炉冷至室温. 射频磁控溅射法制备  $\text{CeO}_2$  薄膜采用  $\text{CeO}_2$  陶瓷靶, 靶材的尺寸是  $\Phi 74.8\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ , 基片温度  $500\ ^\circ\text{C}$ , 溅射气压  $26\ \text{Pa}$ , 溅射功率为  $180\ \text{W}$ , 溅射气氛是  $\text{Ar} : \text{O}_2 = 80 : 2.0$  的混合气体, 靶基距  $14\ \text{cm}$ .

采用场发射扫描电镜 (FESEM, ZEISS) 进行薄膜表面形貌的观察. 采用 X 射线衍射仪 (XRD, Philips X' Pert MRD) 进行结构和成分分析. 超导临界电流密度用  $J_c$ -scan Leipzig 系统测量.

## 3 结果与讨论

### 3.1 在 $\text{CeO}_2$ 薄膜上制备 YBCO 超导薄膜

由于含有插层的 YBCO 多层厚膜的界面关系复杂, 我们首先研究了在  $\text{CeO}_2$  薄膜上制备 YBCO 超导薄膜的工艺参数. 图 1 是结构为 LAO/ $\text{CeO}_2$ (RF-sputtering)/BTO-YBCO (TFA-MOD) 薄膜的 XRD 的  $\theta$ - $2\theta$  扫描谱. 从图中可以看出, 除了衬底 LAO 基体衍射峰和  $\text{CeO}_2$  的 (200) 和 (400) 衍射峰之外, 没有其他杂质相的衍射

峰, YBCO 完全呈现 (00*l*) 取向的晶相生长. 说明通过 TFA-MOD 法可以在射频溅射制备的 CeO<sub>2</sub> 薄膜上制备出 *c* 轴取向的 YBCO 薄膜, 并没有其他杂相形成. 对样品 ω(005) 进行了半高宽分析, 如图 1 中插图所示. 样品 (005) 峰的半高宽仅为 0.665°, 说明在 CeO<sub>2</sub> 上制备的 YBCO 超导薄膜具有非常好的面外生长取向.

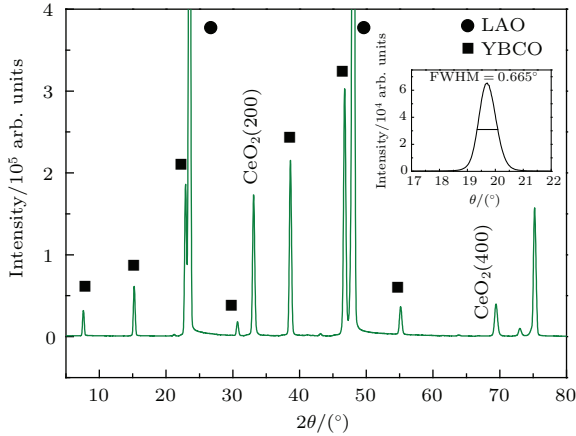


图1 制备的 LAO\CeO<sub>2</sub>(RF-sputtering)\BTO-YBCO(TFA-MOD) 薄膜的 XRDθ-2θ 扫描谱和 (005)ω 扫描图

Fig. 1. XRD  $\theta$ -2 $\theta$  patterns and (005)  $\omega$ -scan for LAO\CeO<sub>2</sub> (RF-sputtering)\BTO-YBCO (TFA-MOD) film prepared by TFA-MOD process.

图 2 所示为在 CeO<sub>2</sub> 薄膜所制备的 YBCO 薄膜的临界电流密度 (77 K, 0 T) 分布 (CeO<sub>2</sub> 薄膜的制备工艺参数为基片温度 500 °C、溅射气压 26 Pa、溅射功率 180 W、溅射气氛是 Ar : O<sub>2</sub> = 80 : 2.0 的混合气体、靶基距 14 cm、溅射时间为 15 min). 从图中可以看出, 样品的临界电流密度约为 7.5 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 自场), 与在 LAO 单晶衬底上制备的 BTO-YBCO 超导性能接近, 说明所制备的 CeO<sub>2</sub> 薄膜能够很好地起到传递结构的作用.

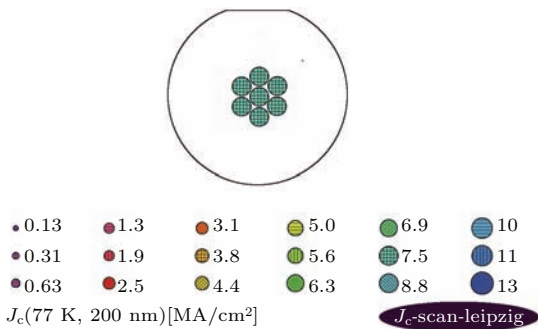


图2 (网刊彩色) 制备的 LAO\CeO<sub>2</sub>(RF-sputtering)\BTO-YBCO(TFA-MOD) 超导薄膜的临界电流密度

Fig. 2. (color online) Critical current density for YBCO film prepared on CeO<sub>2</sub> film.

### 3.2 CeO<sub>2</sub> 插层的厚度对 YBCO 超导厚膜结构和性能的影响

在上述工作的基础上, 首先在 LAO 单晶衬底上采用 TFA-MOD 法制备了 YBCO 双层膜, 然后射频磁控溅射 CeO<sub>2</sub> 薄膜. 随后在 CeO<sub>2</sub> 薄膜上用 TFA-MOD 法再沉积一层 YBCO 超导膜, 整个厚膜的结构为 LAO/YBCO/YBCO/CeO<sub>2</sub>(RF-sputtering)/YBCO. 其中, CeO<sub>2</sub> 薄膜的厚度对整个 YBCO 多层超导膜的微观结构和超导性能都有直接的影响. 而 CeO<sub>2</sub> 薄膜的厚度与射频磁控溅射时间成正比. 为此, 我们在保持其他工艺参数不变的前提下 (溅射功率 180 W, 靶基距 14 cm, Ar : O<sub>2</sub> = 80 : 2.0, 溅射温度 500 °C), 分别制备了溅射时间为 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 min 的多个样品, 并系统地研究了其微观结构与超导性能的变化关系.

图 3 为不同溅射时间制备的 CeO<sub>2</sub> 薄膜的 YBCO 多层厚膜样品表面的扫描电镜 (SEM) 照片. 从图中可以看出, 在溅射时间为 2 min 和 5 min 沉积的 CeO<sub>2</sub> 薄膜上制备的 YBCO 膜有少量裂纹出现, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 而在溅射时间大于 10 min 沉积的 CeO<sub>2</sub> 薄膜上所制备的 YBCO 膜表面都比较平整、致密, 没有出现明显的裂纹, 如图 3(c)—(f) 所示. 但在溅射时间大于 60 min 沉积的 CeO<sub>2</sub> 薄膜上所制备的 YBCO 膜表面晶粒明显变得比较粗糙. 可以推断溅射时间短, 沉积的 CeO<sub>2</sub> 薄膜比较薄, 甚至不连续. 不连续的 CeO<sub>2</sub> 薄膜不能起到传递结构的作用, 但当 CeO<sub>2</sub> 膜厚度较大时, CeO<sub>2</sub> 膜的结构会下降, 导致在其沉积的 YBCO 膜结晶性较差.

图 4 为在不同溅射时间沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上所制备的 YBCO 多层厚膜的 XRD  $\theta$ -2 $\theta$  扫描谱. 从图中可以看出, 所有的样品都有 (00*l*) 取向的 YBCO 相和 LAO 基体相, 说明 YBCO 厚膜都具有较好的 *c* 轴生长取向. 从图中还可以看出, 在采用溅射时间为 2 min 时所沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上制备的 YBCO 膜没有出现 CeO<sub>2</sub> 的 (200) 衍射峰, 当溅射时间增加至 10 min 时, 才开始出现 CeO<sub>2</sub> 的 (200) 衍射峰, 并且随着溅射时间的逐渐增加, (200) 衍射峰的强度也在逐渐增强. 可以推断溅射时间较长所制备的 CeO<sub>2</sub> 薄膜有良好的 *c* 轴取向.

为了进一步研究 YBCO 薄膜的面外取向状况, 用 Philips X'Pert 型 XRD 分别对在不同溅射时间沉积的 CeO<sub>2</sub> 薄膜所制备的样品做了 (005) 面的

$\omega$  扫描, 其峰值半高宽(FWHM)可以反映其面外取向性, FWHM越小, 表明其面外取向一致性越好. 图5是不同溅射时间沉积的CeO<sub>2</sub>薄膜所制备的YBCO多层厚膜样品的XRD的(005)面的 $\omega$ 扫描的FWHM. 从图中可以看出, 在溅射时间2 min

沉积的CeO<sub>2</sub>样品的 $\omega$ 扫描的FWHM为1.675°, 随着溅射时间的增加至5 min, FWHM值开始降低至1.407°, 在溅射时间10, 15 min所沉积的样品的FWHM分别为1.386°和1.343°. 而随着溅射时间的进一步增加, 样品的FWHM值又变大, 表明

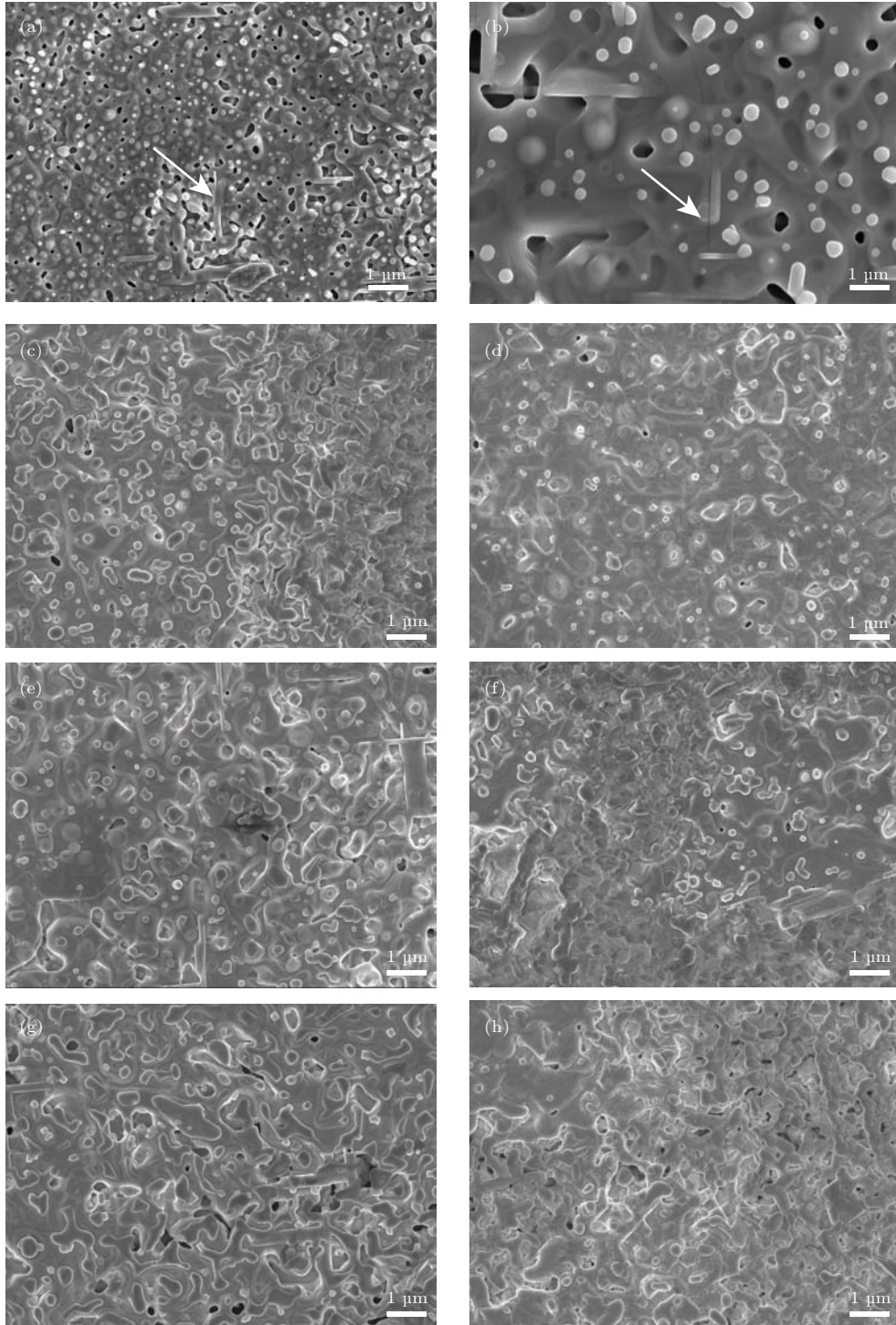


图3 在不同溅射时间沉积的CeO<sub>2</sub>插层膜上制备的YBCO厚膜的SEM照片 (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min; (g) 25 min; (h) 25 min

Fig. 3. SEM of the YBCO multi-layer films with CeO<sub>2</sub> interlayer prepared under different sputtering time: (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min; (g) 25 min; (h) 25 min.

YBCO 厚膜的面外取向变差. 综合分析, 在溅射时间为 10—15 min 制备的 CeO<sub>2</sub> 插层的 YBCO 厚膜具有良好的面外生长取向.

图 6 为在不同溅射时间沉积的 CeO<sub>2</sub> 隔离层上制备的 YBCO 多层厚膜样品的临界电流密度曲线. 从图中可以看出, 在采用溅射时间为 2 min 时所沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上制备的 YBCO 膜的  $J_c$  为 0.8 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 自场); 而在溅射时间为 5 min 时所沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上制备的 YBCO 膜的  $J_c$  为 1.1 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 自场); 随着溅射 CeO<sub>2</sub> 插层膜的时间进一步延长, 在其上制备的 YBCO 膜的最大  $J_c$  达到 1.36 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, 自场), 样品厚度为 2 μm, 换算成临界电流  $I_c$  为 272 A/cm, 比无插层的 BTO-YBCO 厚膜的  $I_c$  最优值的 200 A/cm 有了较大幅度的提升. 说明 CeO<sub>2</sub> 作为插层膜起到了提高 YBCO 厚膜超导性能的作用.

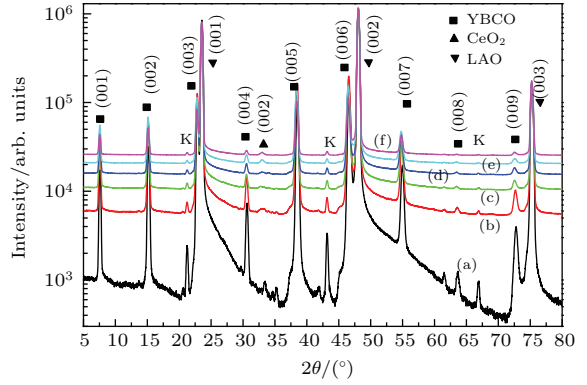


图 4 (网刊彩色) 在不同溅射时间沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上制备的 YBCO 厚膜的 XRD  $\theta$ - $2\theta$  扫描谱 (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min

Fig. 4. (color online) XRD  $\theta$ - $2\theta$  patterns of the YBCO multi-layer films with CeO<sub>2</sub> interlayer prepared under different sputtering time: (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min.

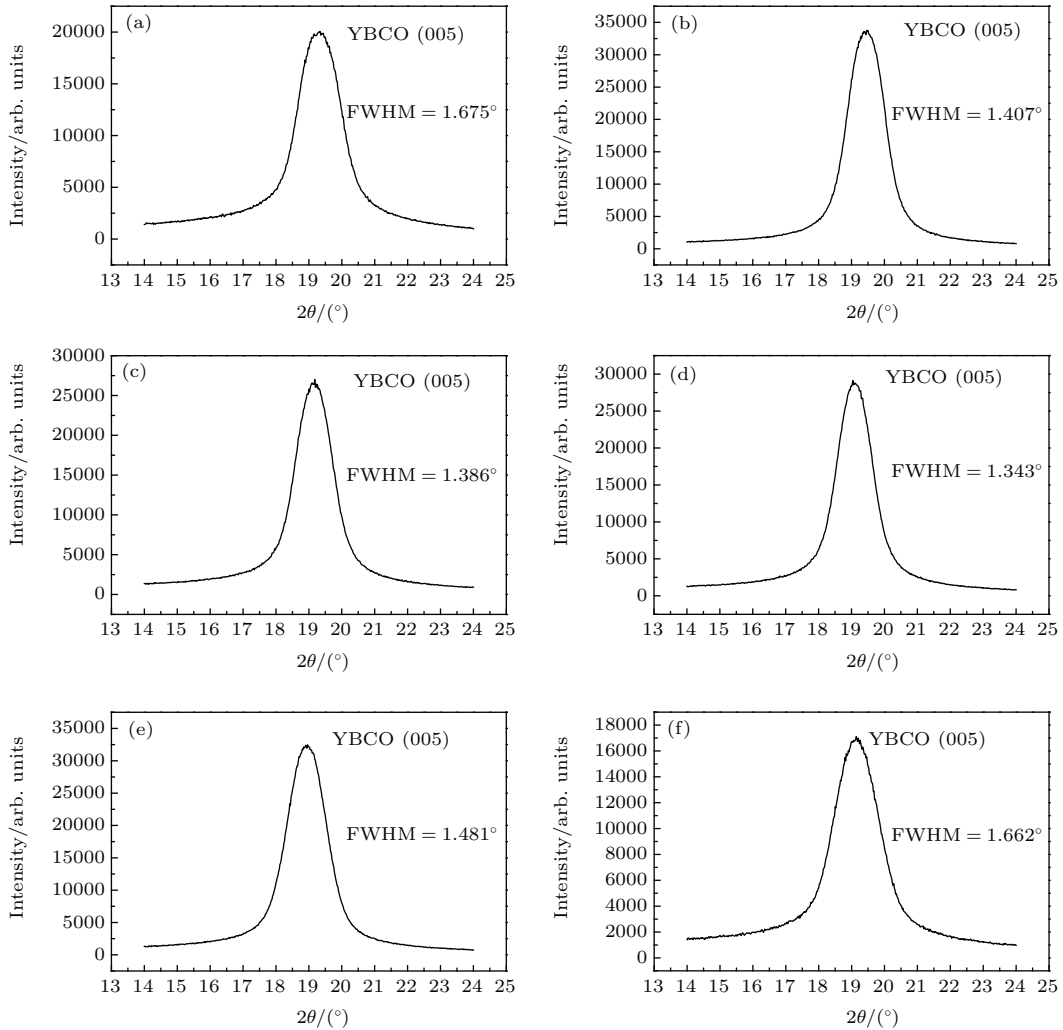


图 5 在不同溅射时间沉积的 CeO<sub>2</sub> 插层膜上所制备的 YBCO 厚膜的 XRD(005) $\omega$  扫描 (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min

Fig. 5. XRD  $\theta$ - $2\theta$  patterns of the YBCO multi-layer films with CeO<sub>2</sub> interlayer prepared under different sputtering time: (a) 2 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 15 min; (e) 20 min; (f) 25 min.

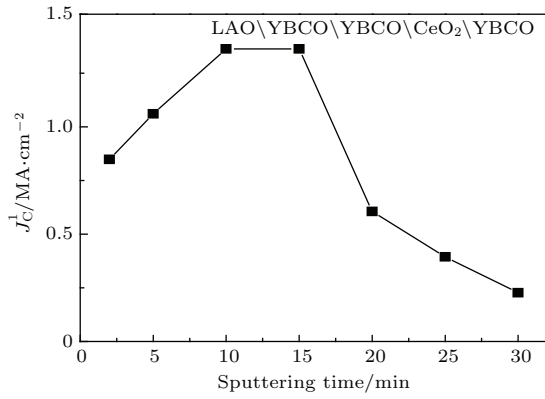


图6 在不同溅射时间沉积的 $\text{CeO}_2$ 插层膜上制备的YBCO厚膜的临界电流密度

Fig. 6. Critical current density for the YBCO multi-layer films with  $\text{CeO}_2$  interlayer prepared under different sputtering time.

综合上述对YBCO样品的形貌和结构分析,含有 $\text{CeO}_2$ 插层膜的YBCO厚膜与无插层的YBCO厚膜相比,表面平整致密、没有裂纹,说明 $\text{CeO}_2$ 插层膜起到了松弛应力的作用.此外,含有 $\text{CeO}_2$ 插层膜的YBCO厚膜(005) $\omega$ 扫描的半高宽最小仅为 $1.395^\circ$ ,表明 $\text{CeO}_2$ 插层在YBCO多层厚膜中起到了传递织构、改善YBCO厚膜面外外延生长的作用.这是因为 $\text{CeO}_2$ 为立方晶体萤石型结构,晶格常数为 $0.5412 \text{ nm}$ ,与YBCO晶格失配度为 $0.12\%$ ,具有良好的晶格匹配度.并且 $\text{CeO}_2$ 高温下化学稳定性好、结构致密,不容易与YBCO膜发生反应,能为YBCO超导层的外延生长提供一个连续、光滑、平整、致密、无化学反应界面和一个良好的双轴织构模板.

## 4 结 论

通过在YBCO膜之间引入 $\text{CeO}_2$ 插层,采用化学溶液法和磁控溅射法相结合的方式成功制备了结构为LAO/YBCO/YBCO/ $\text{CeO}_2$ /YBCO的厚膜. $\text{CeO}_2$ 插层的厚度对YBCO厚膜的结构和性能都有较大影响.在溅射 $15 \text{ min}$ 沉积的 $\text{CeO}_2$ 样品上制备的YBCO厚膜的临界电流最大达到 $272 \text{ A/cm}$  ( $77 \text{ K}$ ).插层 $\text{CeO}_2$ 薄膜在YBCO多层厚膜中起到了松弛应力、传递织构、改善其面外外延生长、从而进一步提高YBCO厚膜超导性能的作用.

## 参考文献

[1] Fukushima T, Nakasaki R, Zhang Y, Brownsey P, Sundaram A, Kasahara M, Kuraseko H, Hazelton D,

Sakamoto H 2015 *Performance and Reliability of 2G-HTS Wires for High-Field Magnet Applications*, 28th International Symposium on Superconductivity Tokyo, Japan, November 16–18, 2015

[2] Moon S H, Su Nam 2013 *Developed New Process Named RCE-DR: The Practical Highest Throughput Process*. European Conference on Applied Superconductivity Genova, Italy, September 15–19, 2013

[3] Iijima Y, Adachi Y, Igarashi M, Kakimoto K, Fujita S, Daibo M, Ohsugi M, Takemoto T, Nakamura N, Kurihara C, Machida K, Hanyu S, Kikutake R, Nagata M, Tatano F, Itoh M 2014 *Development for Mass Production of Homogeneous RE123 Coated Conductors by Hot-Wall PLD Process on IBAD Template Technique*, Applied Superconductivity Conference Charlotte NC, USA, August 10–15, 2014

[4] Malozemoff A P 2015 *Progress in American Superconductor's HTS Wire and Optimization for Fault Current Limiting Systems*, 28th International Symposium on Superconductivity Tokyo, Japan, November 16–18, 2015

[5] Ibi A, Iwai H, Takahashi K, Muroga T, Miyata S, Watanabe T, Yamada Y, Shiohara Y 2005 *Physica C: Superconductivity* **426–431** 910

[6] Li X, Rupich M W, Kodenkandath T, Huang Y 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 3553

[7] Teranishi R, Matsuda J, Nakaoka K, Fuji H, Aoki Y, Kitoh Y, Nomoto S, Yamada Y, Yajima A, Izumi T, Shiohara Y 2005 *Physica C: Superconductivity* **426–431** 959

[8] Matsui H, Tsukada K, Tsuchiya T, Sohma M, Yamaguchi I, Manabe T, Kumagai T 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 2933

[9] Jia Q X, Foltyn S R, Arendt P N, Smith J F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1601

[10] Suenaga M, Li Q, Ye Z, Iwakuma M, Toyota K, Funaki F, Foltyn S R, Wang H, Clem J R 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 208

[11] Feldmann D M, Holesinger T G, Maiorov B, Zhou H, Foltyn S R, Coulter J Y, Apodoca I 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 115016

[12] Rupich M W, Li X P, Sathyamurthy S, Thieme C L H, DeMoranville K, Gannon J, Fleshler S 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 6601205

[13] Takahashi K, Kobayashi H, Yamada Y, Ibi A, Fukushima H, Konishi M, Miyata S, Shiohara Y, Kato T, Hirayama T 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 924

[14] Foltyn S R, Jia Q X, Arendt P N, Kinder L, Fan Y, Smith J F 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 3692

[15] Pahlke P, Hering M, Sieger M, Lao M, Eisterer M, Usoskin A, Strömer J, Holzapfel B, Schultz L, Hühner R 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 3

[16] Ding F Z, Gu H W, Wang H Y, Zhang H L, Zhang T, Qu F, Dong Z B, Zhou W W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 057401

[17] Foltyn S R, Wang H, Civale L, Jia Q X, Arendt P N, Maiorov B, Li Y, Maley M P, MacManus-Driscoll J L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 162505

- [18] Feldmann D M, Holesinger T G, Maiorov B, Zhou H, Foltyn S R, Coulter J Y, Apodoca I 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 115016
- [19] Sarkara A, Danga V S, Mikheenko P, Awang Kechik M M, Abell J S, Crisan A 2010 *Thin Solid Film* **519** 876
- [20] Teranishi R, Matsuda J, Nakaoka K, Fuji H, Aoki Y, Kitoh Y, Izumi T, Yamada Y, Shiohara Y 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 2663
- [21] Matsui H, Tsukada K, Tsuchiya T, Sohma M, Yamaguchi I, Manabe T, Kumagai T 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 2933
- [22] Zhu Y B, Zhou Y L, Wang S F, Liu Z, Zhang Q, Chen Z H, Lü H B, Yang G Z 2004 *Chin. Phys. B* **13** 238
- [23] Ding F Z, Lü X D, Gu H W, Li T, Cao J L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1631
- [24] Ghalsasi S, Zhou Y X, Chen J, Lü B, Salama K 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 045015
- [25] Shu G Q, Li M J, Boubeche M, Liu Z Y, Bai C Y, Cai C B 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 5

## Enhanced superconducting properties in MOD-YBCO thick films with CeO<sub>2</sub> interlayer\*

Ding Fa-Zhu<sup>1)2)</sup> Gu Hong-Wei<sup>1)2)†</sup> Wang Hong-Yan<sup>1)2)</sup> Qu Fei<sup>1)2)</sup> Shang Hong-Jing<sup>3)</sup>  
Zhang Hui-Liang<sup>1)2)</sup> Dong Ze-Bin<sup>1)2)</sup> Zhang He<sup>1)2)</sup> Zhou Wei-Wei<sup>1)2)</sup>

1) (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

( Received 11 January 2016; revised manuscript received 2 February 2016 )

### Abstract

In YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO) film there exists “thickness effect”: the critical current density of YBCO film drops precipitously as the coating thickness increases, especially in the case that the thickness of YBCO film exceeds 1 μm. In this paper, we introduce very thin layers of CeO<sub>2</sub> into YBCO layers and successfully fabricate the structure of YBCO/YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO superconducting thick film. Firstly, YBCO films with two layers are fabricated on a LaAlO<sub>3</sub> substrate by a multiple coatings process using a trifluoroacetate metal organic deposition method. Secondly, CeO<sub>2</sub> thin films are deposited on YBCO films by RF-sputtering. Finally, we prepare the third YBCO film on CeO<sub>2</sub> interlayer. No cracks are observed in scanning electron microscopy images of these films; further, the majority of the grains in the films are well-textured and *c*-axis oriented. The full-width-half-maximum of the out-of-plane texture is measured to be 1.395° for the multilayer YBCO film at a thickness of 2 μm. Using this multilayer technology, we achieve *J<sub>c</sub>* values of up to 1.36 MA/cm<sup>2</sup> (77 K, self-field) in films as thick as 2 μm, for an extrapolated critical current of 272 A/cm. We attribute the enhanced performance of the thick YBCO film to the CeO<sub>2</sub> interlayer which plays an important role in transmission texture and stress relaxation.

**Keywords:** YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>, CeO<sub>2</sub> interlayer, thick film

**PACS:** 74.78.Fk, 81.15.Lm

**DOI:** 10.7498/aps.65.097401

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032702), the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 51577180, 51272250) and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 2152035).

† Corresponding author. E-mail: [guhwh@mail.iee.ac.cn](mailto:guhwh@mail.iee.ac.cn)