

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜微结构的同步辐射三维倒空间扫描研究*

易栖如¹⁾ 熊沛雨²⁾ 王焕华³⁾ 李港¹⁾ 王云开¹⁾ 董恩阳¹⁾
陈雨³⁾ 沈治邦³⁾ 吴云²⁾ 袁洁²⁾ 金魁²⁾ 高琛^{1)†}

1) (中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 101408)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2022年9月12日收到; 2022年11月9日收到修改稿)

高温超导薄膜因其微波表面电阻低, 可用于尖端高温超导微波器件的制作. 然而由于高温超导材料特殊的二维超导机制和极短的超导相干长度, 高温超导材料的微波表面电阻对微结构特别敏感. 为了探究高温超导材料微结构和微波电阻的联系, 采用脉冲激光沉积 (PLD) 技术在 (001) 取向的 MgO 单晶衬底上生长了不同厚度的 YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) 薄膜. 电学测量发现不同厚度的样品超导转变温度、常温电阻差别不大, 但超导态的微波表面电阻差异很大. 同步辐射三维倒空间扫描 (3D-RSM) 技术对 YBCO 薄膜微结构的表征表明: CuO₂ 面平行于表面晶粒 (c 晶) 的多寡、晶粒取向的一致性造成超导态微波表面电阻差异的主要原因.

关键词: 三维倒空间扫描, YBCO 薄膜, 微结构

PACS: 61.05.cp, 68.65.-k, 74.78.-w

DOI: 10.7498/aps.72.20221776

1 引言

先进功能薄膜的性能不仅取决于成分、晶体结构, 还取决于微结构. 例如铌酸锂单晶的光学非线性并不强, 但通过构建极化方向相反的周期性铁电畴, 形成铌酸锂铁电超晶格, 可实现高效的准相位匹配^[1-3], 获得极强的光学非线性, 应用于光学超晶格集成光子芯片^[4]、高效非线性光束整形^[5-7]等. 再如, 通过织构化可以大幅提高无铅压电陶瓷的压电效应^[8-9]等. 高温超导薄膜的微波表面电阻属于这类性质: 高温超导薄膜的微波表面电阻不仅取决于由晶体结构决定的超导转变温度, 还强烈地依赖

于晶粒取向、晶界多寡等微结构特性.

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)^[10-12] 高温超导材料自 1987 年由美国休斯顿大学朱经武教授和中国科学院物理研究所赵忠贤院士发现以来, 在两个方面获得了应用: 一是以多晶线材输电为代表的强电应用^[13-17], 二是以薄膜微波器件为代表的弱电应用^[18-21]. 一方面, 超导薄膜的微波表面电阻低, 用其作为电极的微波器件具有插损小、品质因子高、抗邻频干扰能力强等优势; 另一方面, 相比传统超导材料工作的液氮温度, 高温超导材料的工作温度处于液氮温区, 因此, 所需的制冷机体积小、能耗低, 有望在下一代移动通信、卫星微波通信中获得广泛应用.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1603900)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: E1E40207X2) 和中国科学院大学高水平人才培养与稳定支持专项 (批准号: E1EG0210X2, 118900M018) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gaochen@ucas.edu.cn

由于超导体具有完全抗磁性, 通常认为超导体内不能建立电磁场. 但伦敦理论证明: 电磁场可以透入超导体一个有限的深度. 对于高温超导材料, 这个穿透深度在 100 nm 量级. 而根据超导的二流体模型, 超导体中既存在超导电子, 也存在正常态的电子. 对于静态场, 伦敦理论要求超导体内的电场为零, 正常态电子不参与导电, 超导体呈现出零电阻. 但对于交变电磁场, 超导体内的电场不再为零. 因此, 穿透深度内的正常态电子在交变的微波电场作用下将会形成正常态的电流, 带来能量耗散, 产生微波表面电阻.

对于 YBCO, 存在着强烈的超导各向异性: 平行于 CuO_2 面的相干长度 (1.2—1.5 nm) 远大于垂直于 CuO_2 面的相干长度 (0.1—0.3 nm)^[22], 这就使得平行于 CuO_2 面的微波表面电阻和垂直于 CuO_2 面的微波表面电阻差别很大. 在实际的薄膜中, 晶粒尺寸有限, 不可避免地存在晶界. 晶界的存在一方面散射正常态电子, 另一方面在晶界厚度与超导相干长度相当时 (YBCO 恰恰属于这种情况) 也会散射超导电子对, 抑制超导电流, 两种过程都会引起微波表面电阻的上升.

在晶体结构方面, 在 YBCO 的晶格常数 a , b , c 中, a , b 相当, c 约为 a 的 3 倍. 这就导致在微结构方面, YBCO 薄膜中既存在 c 轴垂直于表面 (CuO_2 面平行于表面, 微波表面电阻低) 的晶粒 (本文称为 c 晶), 也存在 a 轴、 b 轴垂直于表面 (CuO_2 面垂直于表面, 微波表面电阻大) 的晶粒 (本文分别称为 a 晶和 b 晶). 随着 YBCO 薄膜厚度的增大, c 晶的比例和薄膜的取向性会发生改变, 特别是在不同生长工艺下, 薄膜微结构随着厚度的变化各不相同, 临界电流密度也有较大差异^[23,24]. 现有研究表明当 YBCO 薄膜的厚度超过 1000 nm 时, 其临界电流密度急剧下降^[25–28]. 对于 c 晶, 晶粒在面内还可以有不同的取向, 主要存在 0° 和 45° 两种取向 (本文分别称为 $0^\circ c$ 晶、 $45^\circ c$ 晶), 以及少量的无规取向. 当两种面内取向的 c 晶都存在的时候, 它们之间必然会出现 45° 晶界, 而此大角晶界会对薄膜的输运性能产生较大的影响^[29–32]. 这样一来, 即使晶体结构相同、超导转变温度相近, 薄膜的微波表面电阻也可以随 c 晶的含量、面内取向的一致性差异而表现出很大的差别.

因此, 有必要深入研究 YBCO 薄膜的微结构, 构建 YBCO 薄膜微结构和微波表面电阻的关系,

更好地指导薄膜沉积工艺的改进和优化, 获得微波表面电阻更低的 YBCO 薄膜.

迄今为止, 已发展了很多微结构的表征方法, 分为实空间和倒空间两大类. 电子显微镜、原子力显微镜和扫描隧道显微镜是实空间表征技术的典型代表. 透射电子显微镜的分辨率可达亚原子量级, 并可直观地显示原子结构、晶界等信息^[33–36]. 但是, 电子显微镜的视场较小, 且制样时需要切割或打磨样品. 这样的制样过程有可能扰动样品原始的结构、微结构. 采用原子力显微镜、扫描隧道显微镜虽然可以获得高分辨率、无损的测量样品信息, 但只是样品的表面形貌^[37–40].

倒空间微结构表征技术的代表是 X 射线衍射^[41–45]. 同实空间的成像一样, 倒空间的 X 射线衍射不仅可用于多晶的物相分析、单晶的晶体结构解析, 也可用于微结构的表征, 而且具有视场大 (统计平均性好)、无需制样等优势. 近年来, 依托同步辐射发展了高分辨的快速二维倒空间扫描、三维倒空间扫描 (3D-RSM) 等 X 射线衍射技术^[46–50], 并将其用于 $\text{BiFeO}_3/\text{LaSrAlO}_4(001)$ 外延膜复杂的相演化^[51–52]、 $(\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3)_n/\text{SrTiO}_3$ 超晶格中 PbTiO_3 极化涡旋等的微结构^[53]、PMN-PT 单晶的电畴翻转类型及比例, 建立微结构和 loop 形式应变-电场曲线的关联^[54] 等的研究.

基于上述背景, 本文利用基于同步辐射的 3D-RSM 研究了 YBCO/MgO(001) 薄膜的微结构, 特别是取向关系、 c 晶含量, 并将其和薄膜的微波电阻联系起来, 有望对 YBCO 薄膜沉积工艺的改进、进而对高温超导微波器件性能的提升提供助力.

2 实验

实验使用的 YBCO 薄膜采用脉冲激光沉积 (PLD) 技术在 (001) 取向的 MgO 单晶衬底上生长得到. 所用靶材通过固相反应法合成, 生长所使用的系统为自行设计搭建, 具有较小的生长腔室, 方便在较短的时间内完成充氧过程. 轰击靶材的激光波长为 355 nm. 在沉积过程中, 衬底被加热到 750°C , 生长腔内维持 0.2—0.6 Torr 范围内的氧压. 沉积结束后, 腔体内充入一个大气压的纯氧, 同时样品被降温至 650°C , 并维持 20 min 后再降至室温取样. 薄膜厚度通过激光脉冲数控制, 预估的数值与通过扫描电子显微镜 (SEM) 观测样品截

面得到的结果基本一致. 本文中用到 400 nm 和 1000 nm 厚样品各一片, 分别称为#1 和#2 样品.

YBCO/MgO(001) 薄膜的 3D-RSM 表征在北京同步辐射装置 1W1A 实验站完成. 实验所用 X 射线的波长为 0.15438 nm, 主要实验装置有: Huber 五圆衍射、Pilatus 100 K 面阵探测器 (像素尺寸为 172 μm , 像素数目 487 \times 195). 样品放置在五圆衍射仪的中心, 样品-面阵探测器中心之间的距离约为 145 mm. 实验的衍射几何如图 1 所示, 通过衍射仪 ϕ 、 χ 、 ω 三个方向的转动, 可以带动样品转动, 使特定指数的倒格点与 Ewald 球相交. 面阵探测器一次可以采集倒易空间的一个弧面. 通过转动样品、面阵探测器, 可以获得一系列倒易空间的弧面, 由这些弧面可重构倒格点附近衍射强度的三维倒空间分布. 用此方法, 分别采集了 YBCO 薄膜 (006), (108), (109) 三个衍射位置附近的 3D-RSM.

3 结果和讨论

3.1 YBCO 薄膜超导电性的测量

对样品直流特性的测量基于四端子法在物理性质测量系统 (PPMS) 中进行, 通过样品电阻随温度的依赖关系, 进而确定超导转变温度 T_{c0} . #1, #2 样品的 T_{c0} 分别是 90 K 和 92 K (见图 2(a)). 根据 YBCO 氧含量和超导转变温度的物性相图, 两样品的氧含量都比较高, 相应的晶体结构都属于 OI 正交相^[12].

表面电阻测量在谐振中心 9.375 GHz 的蓝宝石介质腔中进行. 该腔体在室温下的品质因数 Q 为 45000, 蓝宝石圆柱体的中心有一个小孔, 专

门设计用于 TE₀₁₁ 模式下的小样品测量. 尺寸为 1—1.5 mm 的样品放在孔的中间, 由一根非常细的蓝宝石柱支撑, 但与圆柱体隔离. 空腔密封在浸有液氮的真空室中, 蓝宝石柱 (即样品) 的温度可控制在 77—100 K 之间, 稳定性约为 ± 1 mK, 同时空腔保持在 77 K. 通过矢量网络分析仪 (Agilent N5230C) 测量薄膜和相同衬底上没有薄膜样品的谐振频率及品质因数 Q 的温度依赖性, 根据两者的品质因数差得出微波表面电阻 (详细测量原理和方法可参考文献 [55, 56]):

$$R_s = (Q_{\text{withsample}}^{-1} - Q_{\text{withoutsample}}^{-1}) / A_s, \quad (1)$$

其中 $A_s=0.00036 \Omega^{-1}$ 是样品的几何因子, 由样品在温度大于 T_{c0} 时的电阻率值进行校准. 图 2(b) 是由 (1) 式得到的 #1 和 #2 样品在 10 GHz 频率下的微波表面电阻随温度的变化情况. 在 $T=77$ K 时, #1 和 #2 样品的表面电阻 R_s 分别为 17.65 m Ω 和 1.06 m Ω , 相差超过一个量级, 远大于正常态时的差异. 暗示了两者的微结构可能存在较大的差异.

3.2 YBCO 薄膜中 c 晶的面内取向

YBCO 薄膜中可能存在着 a 晶、b 晶和 c 晶. 由于 YBCO 的二维超导机制, 对微波电流而言, c 晶晶粒因 CuO_2 面平行于微波电流的方向而表现出极低的微波表面电阻. 相反地, a 晶晶粒和 b 晶晶粒中的微波电流垂直于 CuO_2 面, 故表现出较大的微波表面电阻. 基于这一考虑, 首先选择 c 晶特有的 (108) 衍射, 分析 c 晶的面内取向.

图 3(a) 和 (b) 分别给出了 400 nm 和 1000 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜 (108) 衍射峰的 3D-RSM. 图 3(c) 和 (d) 分别是图 3(a) 和 (b) 在水平面上的

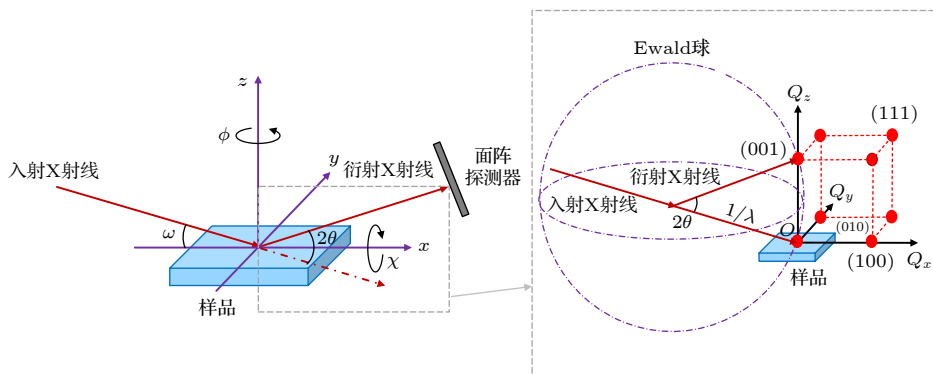


图 1 3D-RSM 衍射几何的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of 3D-RSM.

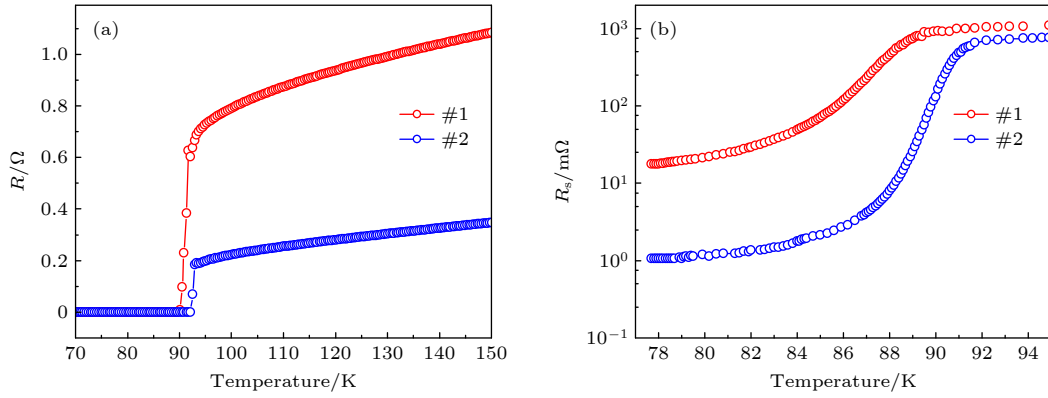


图 2 1#样品和2#样品 (a) 直流电阻 R 和 (b) 微波表面电阻 R_s 对温度的依赖关系

Fig. 2. Dependence of (a) DC resistance R and (b) microwave surface resistance R_s on temperature for sample 1# and sample 2#.

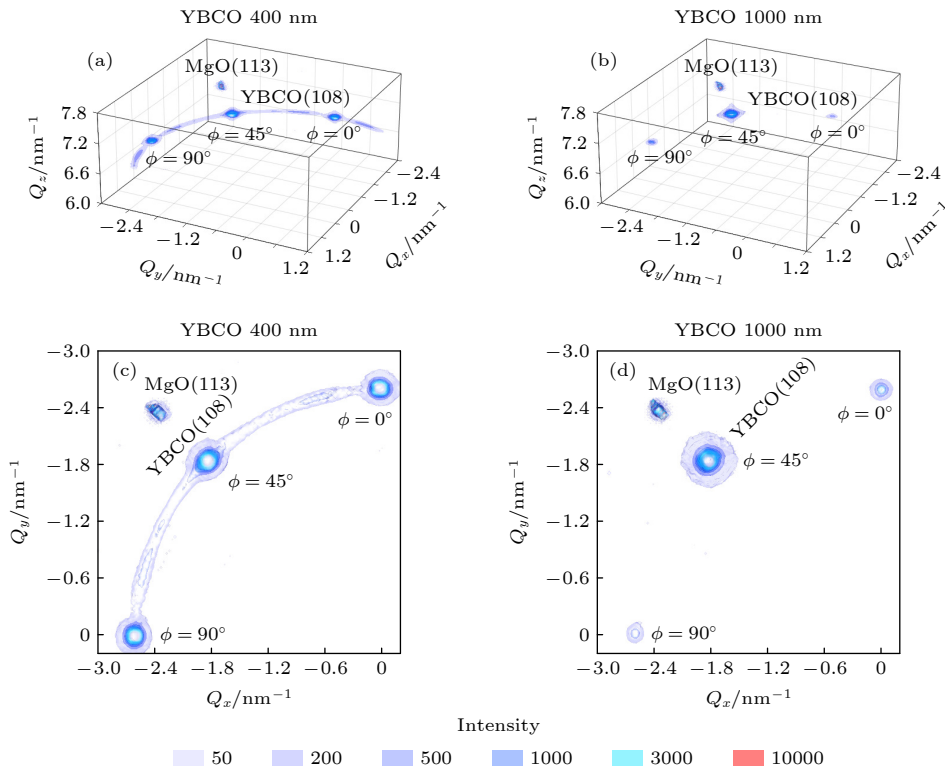


图 3 (a) 1#样品和(b)2#样品 (108) 衍射峰的 3D-RSM; (c) 1#样品和 (d)2#样品 (108) 衍射峰 3D-RSM 在水平面上的投影

Fig. 3. (a) 3D-RSM of (108) diffraction peaks for sample 1#, and (b) sample 2#; (c) projection of (108) 3D-RSM of sample 1#, and (d) sample 2# on the horizontal plane.

投影. 从图 3(c) 和 (d) 可以看出两点: 1) 应变已经释放. 根据 YBCO(108) 衍射峰位置计算出来的面内晶格常数 (0.387 nm) 和 YBCO 体相的值 ($a_{\text{YBCO}}=0.382$ nm, $b_{\text{YBCO}}=0.389$ nm) 非常接近, 而和 MgO 的 0.420 nm 差别较大. 2) 尽管应变已经释放, 但薄膜和衬底间保持了较好的取向关系. 在 400 nm 厚 YBCO 薄膜中, 存在 0° 、 45° 方向两个强度接近的衍射斑, 并有一个较弱的衍射环, 表明薄膜中主要有 YBCO[100]||MgO[100] 和 YBCO[110]||MgO[100]

两种不同取向的晶粒 (即 0° 晶和 45° 晶) 和少量无规取向的晶粒; 而对 1000 nm 厚的 YBCO 薄膜, 衍射环消失, 且两个方向衍射斑的强度也表现出明显的差异, 主要集中到了 45° 的方向上, 表明薄膜中的晶粒基本都按 YBCO[110]||MgO[100] 进行取向, 已不存在无规取向的晶粒.

利用 3D-RSM 衍射峰的三维积分强度估算了几种取向晶粒的含量. 400 nm 膜中, 无规取向、 0° 方向和 45° 方向晶粒分别占比 12%、34% 和 54%;

而 1000 nm 膜中, 0° 方向和 45° 方向晶粒则分别占 3% 和 97%. 由此可见, 和 400 nm 厚 YBCO 薄膜相比, 1000 nm 厚薄膜中的 45° 晶粒明显增多, 相应地 45° 晶界一定会明显减少, 这是其表面微波电阻低的原因.

3.3 YBCO 薄膜中的 a 晶占比

采用 YBCO 的 (200) 衍射峰分析 a 晶的占比. 如图 4 所示, 400 nm 和 1000 nm 厚 YBCO 薄膜 (200) 衍射的 3D-RSM 都表现出两个峰, 其中 $q_z = 5.24 \text{ nm}^{-1}$ 处的弱峰则对应 a 晶的 (200), 而 $q_z = 5.14 \text{ nm}^{-1}$ 处的强峰对应于 c 晶的 (006) 和 b 晶的 (020). 由于 c 晶的 (006) 和 b 晶的 (020) 过于接近, 本实验的条件无法将其区分开.

同样根据 3D-RSM 衍射峰的三维积分强度估算: 400 nm 厚 YBCO 薄膜中, a 晶的占比为 2.7%, b 晶、c 晶合起来占 97.3%; 1000 nm 厚 YBCO 薄膜中 a 晶的占比 3.0%, b 晶、c 晶合起来占 97.0%. a 晶的占比随着膜厚的增大变化不大.

3.4 YBCO 薄膜中的 c 晶/b 晶比

为了能够获得 c 晶/b 晶的含量比, 进而推算出 c 晶的占比, 进一步分析了 YBCO(109) 的 3D-RSM. 图 5(a) 和 (b) 分别是 400 nm, 1000 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜 (109) 的 3D-RSM. 图中同时给出了 (108) 的 3D-RSM. 同 3.3 节的分析一样, 由于 YBCO 晶胞参数 b 和 c 差别非常小, $q_z = 7.71 \text{ nm}^{-1}$ 处的衍射峰包含着 c 晶 (109) 和 b 晶 (130) 的贡献. 但是 (108) 只来自于 c 晶, 这就有可能通过 YBCO(108), (109) 衍射强度的比值, 由 (108) 峰

的强度推算 (109)/(130) 衍射峰中 (109) 的贡献, 进而分离出 (130) 的强度、确定 c 晶/b 晶的相对含量.

表 1 列出了标准卡片 (PDF Card 00-038-1433^[57]) 给出的相关衍射峰 (及其对称峰) 的相对强度, 可以看出: (108) 和 (018) 峰的相对强度分别为 13 和 5, 而 (109), (019) 和 (130) 峰的相对强度分别为 6, 4 和 5. 表 1 同时给出了不同厚度样品各个衍射峰的实测强度.

根据以上分析, 根据表中 (108) 峰的实测强度 I_{108} , 可由:

$$I_{109/108} = \frac{I_0(109) + I_0(019)}{I_0(108) + I_0(018)} I_{108},$$

计算出 (109)/(130) 峰中 (109) 的贡献 $I_{109/108}$. 分离后 (109) 和 (130) 峰的强度列于表 2. 式中 $I_0(hkl)$ 是卡片上衍射峰的相对强度. 有了两个峰的实测强度, 结合卡片上的相对强度, 即可由:

$$\frac{P_b}{P_c} = \frac{I_b/I_0(130)}{I_c/2[I_0(019) + I_0(018)]},$$

解算出 c 晶/b 晶比列于表 2. 由此推算出在 400 nm, 1000 nm YBCO 薄膜的 b 晶和 c 晶中, c 晶的占比分别为 85% 和 82%.

综合起来, 1000 nm 厚 YBCO 薄膜中 45° c 晶占比可由: c 晶和 b 晶的总含量, 结合其中的 c 晶的占比, 以及 45° 方向的比例确定, 约为 $97\% \times 82\% \times 97\% = 77\%$, 而 400 nm 厚 YBCO 薄膜中相应的比例为 $97.3\% \times 85\% \times 54\% = 45\%$. 因此, 可以得出: 1000 nm YBCO 薄膜中 c 晶取向一致性好、相应的晶界少是其微波表面电阻低的主要原因, 而进一步提高 c 晶的含量也有进一步降低微波表面电阻的潜力.

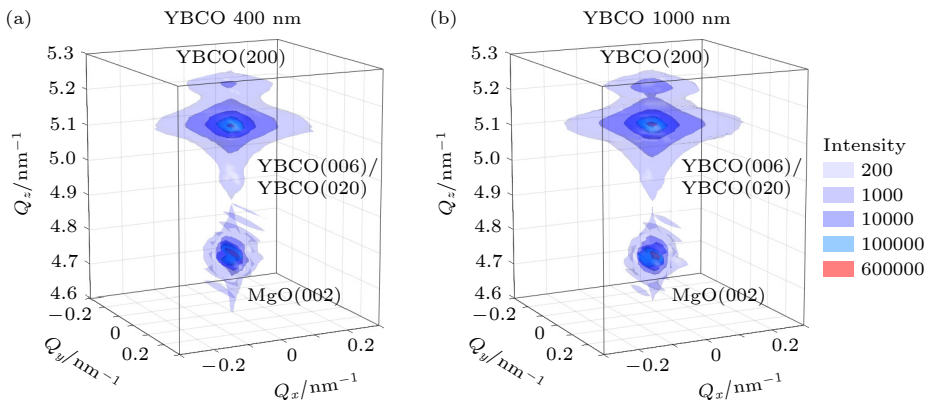


图 4 (a) 1#样品和 (b) 2#样品 (200) 衍射峰的 3D-RSM

Fig. 4. 3D-RSM of (a) sample #1, and (b) sample #2 around the (200) diffraction peak.

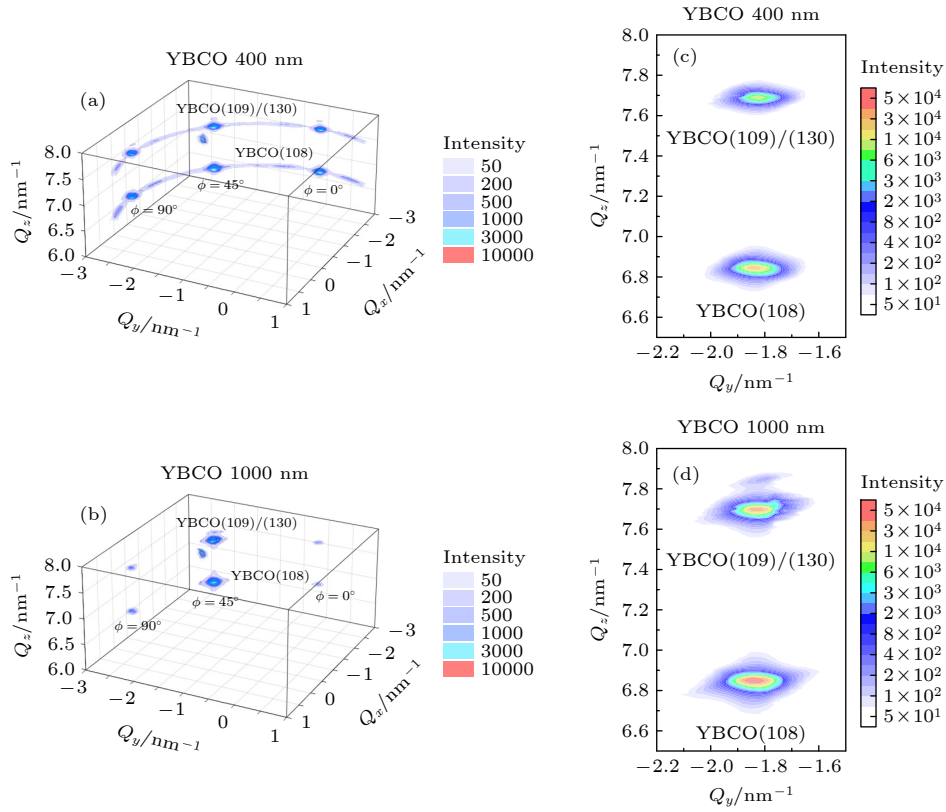


图5 (a) 1#样品和 (b) 2#样品 (109) 衍射峰的 3D-RSM, 图中同时画出了 (108) 的 3D-RSM; (c) 和 (d) 是 (a) 和 (b) 在 45°方向的垂直截面

Fig. 5. (a) 3D-RSM of sample 1#, and (b) sample 2# around the (109) diffraction peak, while 3D-RSM of the diffraction peak of (108) are plotted in the figure; (c) and (d) are vertical cross sections of (a) and (b) in the 45° direction.

表 1 YBCO(108), (018), (109), (019), (130) 衍射峰的相对强度

Table 1. Relative intensities of YBCO (108), (018), (109), (019), (130) diffraction peaks.

	衍射峰实测三维积分强度	
	(108)(018)	(109)(019)(130)
卡片上的相对强度	13 5	6 4 5
YBCO 400 nm	9.136×10^6	5.974×10^6
YBCO 1000 nm	11.503×10^6	7.769×10^6

表 2 由 (109), (019), (130) 衍射峰的强度计算出的 c 晶/b 晶比

Table 2. The c-crystal to b-crystal ratio calculated from the intensities of the (109), (019), and (130) diffraction peaks.

样品厚度	衍射峰三维积分强度		c晶/b晶比
	(109), (019)	(130)	
YBCO 400 nm	1.015×10^6	0.180×10^6	5.639:1
YBCO 1000 nm	1.278×10^6	0.276×10^6	4.630:1

4 结 论

本文利用同步辐射 3D-RSM 技术研究了不同

厚度 YBCO/MgO(001) 薄膜的微结构, 研究发现 400 nm 和 1000 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜中 c 晶的含量分别为 85% 和 82%; 相对于 MgO 衬底, c 晶又有 0°、45°和随机三种面内取向. 400 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜中, 三种面内取向的晶粒分别占比 34%, 54% 和 12%, 而 1000 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜中, 0°、45°取向的晶粒占比 3%、97%, 随机取向的晶粒消失. 结合微波表面电阻测量, 分析认为: c 晶取向一致性好、相应的大角晶界少是 1000 nm 厚 YBCO/MgO(001) 薄膜微波表面电阻低的主要原因. 因此, 改进薄膜沉积工艺, 进一步提高 c 晶的占比及其取向的一致性有望获得更低微波表面电阻的 YBCO 薄膜.

参考文献

- [1] Feng D, Ming N B, Hong J F, Yang Y S, Zhu J S, Yang Z, Wang Y N 1980 *Appl. Phys. Lett.* **37** 607
- [2] Zhu S N, Zhu Y Y, Zhang Z Y, Shu H, Wang H F, Hong J F, Ge C Z 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 5481
- [3] Zhu S N, Zhu Y Y, Ming N B 1997 *Science* **278** 843
- [4] Jin H, Liu F M, Xu P, Xia J L, Zhong M L, Yuan Y, Zhou J

- W, Gong Y X, Wang W, Zhu S N 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 103601
- [5] Wei D Z, Wang C W, Wang H J, Hu X P, Wei D, Fang X Y, Zhang Y, Wu D, Hu Y L, Li J W, Zhu S N, Xiao M 2018 *Nat. Photonics* **12** 596
- [6] Xu T X, Switkowski K, Chen X, Liu S, Koynov K, Yu H H, Zhang H J, Wang J Y, Sheng Y, Krolikowski W 2018 *Nat. Photonics* **12** 591
- [7] Wei D Z, Wang C W, Xu X Y, Wang H J, Hu Y L, Chen P C, Li J W, Zhu Y Z, Xin C, Hu X P, Zhang Y, Wu D, Chu J R, Zhu S N, Xiao M 2019 *Nat. Commun.* **10** 1
- [8] Saito Y, Takao H, Tani T, Nonoyama T, Takatori K, Homma T, Nagaya T, Nakamura M 2004 *Nature* **432** 84
- [9] Li P, Zhai J W, Shen B, Zhang S J, Li X L, Zhu F Y, Zhang X M 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705171
- [10] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, Hor P H, Meng R L, Gao L, Huang Z J, Wang Y Q, Chu C W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 908
- [11] Zhao Z X, Chen L Q, Yang Q S, Huang Y Z, Chen G H, Tang R M, Liu G R, Cui C G, Chen L, Wang L Z, Guo S Q, Li S L, Bi J Q 1987 *Chin. Sci. Bull.* **6** 412 (in Chinese) [赵忠贤, 陈立泉, 杨乾声, 黄玉珍, 陈庚华, 唐汝明, 刘贵荣, 崔长庚, 陈烈, 王连忠, 郭树权, 李山林, 毕建清 1987 科学通报 **6** 412]
- [12] Jorgensen J D, Veal B W, Paulikas A P, Nowicki L J, Crabtree G W, Claus H, Kwok W K 1990 *Phys. Rev. B* **41** 1863
- [13] Bondarenko S I, Koverya V P, Krevsun A V, Link S I 2017 *Low Temp. Phys.* **43** 1125
- [14] Foltyn S R, Civale L, Macmanus-Driscoll J L, Jia Q X, Maiorov B, Wang H, Maley M 2007 *Nat. Mater.* **6** 631
- [15] Obradors X, Puig T 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 044003
- [16] Larbalestier D, Gurevich A, Feldmann D M, Polyanskii A 2001 *Nature* **414** 368
- [17] Cai C B, Chi C X, Li M J, Liu Z Y, Lu Y M, Guo Y Q, Bai C Y, Lu Q, Dou W Z 2018 *Chin. Sci. Bull.* **64** 827 (in Chinese) [蔡传兵, 池长鑫, 李敏娟, 刘志勇, 鲁玉明, 郭艳群, 白传易, 陆齐, 豆文芝 2018 科学通报 **64** 827]
- [18] Newman N, Lyons W G 1993 *J. Supercond.* **6** 119
- [19] Sun L, Li H, Zhang X Q, Li C G, Zhang Q, Wang J, Bian Y B, He Y S 2012 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **42** 767 (in Chinese) [孙亮, 黎红, 张雪强, 李春光, 张强, 王佳, 边勇波, 何豫生 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 767]
- [20] Bian Y B, Guo J, Gao C Z, Li C G, Li H, Wang B C, He X F, Li C, Li N, Li G Q, Zhang Q, Zhang X Q, Meng J B, He Y S 2010 *Physica C* **470** 617
- [21] He X F, Zhang X Q, Wang Y H, Gao L, Wang J, Cui B, Bian Y B, Yu Tao, Zhang Q, Li H, Li C G, Li J J, Gu C Z, He Y S 2009 *Physica C* **469** 1925
- [22] Fuchs D, Brecht E, Schweiss P, Loa I, Thomsen C, Schneider R 1997 *Physica C* **280** 167
- [23] ZOU C M, ZOU C M, Lu S B, Cui X M, Ji H 2007 *J. Funct. Mater. Dev.* **13** 301 (in Chinese) [邹春梅, 左长明, 路胜博, 崔旭梅, 姬洪 2007 功能材料与器件学报 **13** 301]
- [24] Shi D Q, Ko K R, Song K J, Chung J K, Choi S J, Park Y M, Shin K C, Yoo S I, Park C 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** S42
- [25] Li X, Rupich M W, Kodenkandath T, Huang Y 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 3553
- [26] Foltyn S R, Jia Q X, Arendt P N, Kinder L, Fan Y, Smith J F 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 3692
- [27] 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
- [28] Jia Q X, Foltyn S R, Arendt P N, Smith J F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1601
- [29] Eom C B, Marshall A F, Suzuki Y, Geballe T H 1992 *Phys. Rev. B* **46** 11902
- [30] Mastuda J S, Oba F, Murata T, Yamamoto T, Ikuhara Y 2004 *J. Mater. Res.* **19** 2674
- [31] Tang C Y, Cai Y Q, Yao X, Rao Q L, Tao B W, Li Y R 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 076203
- [32] Wang X, Cai Y Q, Yao X, Wan W, Li F H, Xiong J, Tao B W 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 165405
- [33] Krivanek O L, Dellby N, Hachtel J A, Idrobo J C, Hotz M T, Plotkin-Swing B, Bacon N J, Bleloch A L, Corbin G J, Hoffman M V, Meyer C E, Lovejoy T C 2019 *Ultramicroscopy* **203** 60
- [34] Wang Y, Qiu L, Zhang L L, Tang D M, Ma R X, Wang Y Z, Zhang B S, Ding F, Liu C, Cheng H M 2020 *ACS Nano.* **14** 16823
- [35] Zheng H, Cao F, Zhao L G, Jiang R H, Zhao P L, Zhang Y, Wei Y J, Meng S, Li K X, Jia S F, Li L Y, Wang J B 2019 *Microscopy* **68** 423
- [36] Tang M, Yuan W T, Ou Y, Li G X, You R Y, Li S D, Yang H S, Zhang Z, Wang Y 2020 *ACS Catal.* **10** 14419
- [37] Binning G, Rohrer H, Gerber C, Weibel E 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 178
- [38] Binning G, Quate C F, Gerber C 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 930
- [39] Song B, Zhao S, Shen W, Collings C, Ding S Y 2020 *Front. Plant Sci.* **11** 479
- [40] Beekman C, Siemons W, Ward T Z, Chi M, Howe J, Biegalski M D, Balke N, Maksymovych P, Farrar A K, Romero J B, Gao P, Pan X Q, Tenne D A, Christen H M 2013 *Adv. Mater.* **25** 5561
- [41] Zeches R J, Rossell M D, Zhang J X, Hatt A J, He Q, Yang C H, Kumar A, Wang C H, Melville A, Adamo C, Sheng G, Chu Y H, Ihlefeld J F, Erni R, Ederer C, Gopalan V, Chen L Q, Schlom D G, Spaldin N A, Martin L W, Ramesh R 2009 *Science* **326** 977
- [42] Chen Z H, Prosandeev S, Luo Z L, Ren W, Qi Y J, Huang C W, You L, Gao C, Kornev I A, Wu T, Wang J L, Yang P, Sritharan T, Bellaiche L, Chen L 2011 *Phys. Rev. B* **84** 094116
- [43] Chen Z H, Luo Z L, Huang C W, Qi Y J, Yang P, You L, Hu C S, Wu T, Wang J L, Gao C, Sritharan T, Chen L 2011 *Adv. Funct. Mater.* **21** 133
- [44] Luo Z, Chen Z, Yang Y, Liu H J, Huang C, Huang H, Wang H, Yang M M, Hu C, Pan G, Wen W, Li X, He Q, Sritharan T, Chu Y H, Chen L, Gao C 2013 *Phys. Rev. B* **88** 064103
- [45] Fewster P F 1997 *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* **22** 69
- [46] Li Y L, Hu S Y, Liu Z K, Chen L Q 2002 *Acta Mater.* **50** 395
- [47] Xu G, Zhong Z, Hiraka H, Shirane G 2004 *Phys. Rev. B* **70** 174109
- [48] Mariager S O, Schlepütz C M, Aagesen M, Sørensen C B, Johnson E, Willmott P R, Feidenhans'l R 2009 *Phys. Status Solidi A* **206** 1771
- [49] Cornelius T W, Carbone D, Jacques V L R, Schillli T U, Metzger T H 2011 *J. Synchrotron Radiat.* **18** 413
- [50] Cornelius T W, Davydok A, Jacques V L R, Grifone R, Schillli T, Richard M I, Beutier G, Verdier M, Metzger T H, Pietsch U, Thomas O 2012 *J. Synchrotron Radiat.* **19** 688
- [51] Luo Z L, Huang H, Zhou H, Chen Z H, Yang Y, Wu L, Zhu C, Wang H, Yang M, Hu S, Wen H, Zhang X, Zhang Z, Chen L, Fong D D, Gao C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 182901
- [52] Xu H, Chen Z H, Zhang X Y, Dong Y Q, Hong B, Zhao J T,

- Chen L, Das S, Gao C, Zeng C G, Wen H D, Luo Z L 2019 *AIP Adv.* **9** 205114
- [53] Wang R X, Xu H, Yang B, Luo Z L, Sun E W, Zhao J T, Zheng L M, Dong Y Q, Zhou H, Yang R, Gao C, Cao W W 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 152905
- [54] Yang L F, Zhao Y G, Zhang S, Li P S, Gao Y, Yang Y J, Huang H L, Miao P X, Liu Y, Chen A T, Nan C W, Gao C 2014 *Sci. Rep.* **4** 4591
- [55] Sridhar S, Kennedy W L 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 531
- [56] Barannik A A, Cherpak N T, He Y, Sun L, Zhang X, Vovnyuk M V, Wu Y 2018 *Low Temp. Phys.* **44** 247
- [57] Wong-Ng W, McMurdie H F, Paretzkin B, Zhang Y M, Davis K L, Hubbard C R, Dragoo A L, Stewart J M 1987 *Powder Diffr.* **2** 3

Microstructure study of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film with synchrotron-based three-dimensional reciprocal space mapping*

Yi Qi-Ru¹⁾ Xiong Pei-Yu²⁾ Wang Huan-Hua³⁾ Li Gang¹⁾ Wang Yun-Kai¹⁾
 Dong En-Yang¹⁾ Chen Yu³⁾ Shen Zhi-Bang³⁾ Wu Yun²⁾
 Yuan Jie²⁾ Jin Kui²⁾ Gao Chen^{1)†}

1) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Science, Beijing 101408, China*)

2) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 12 September 2022; revised manuscript received 9 November 2022)

Abstract

High-temperature superconducting films can be used for fabricating the cutting-edge high-temperature superconducting microwave devices because of their low microwave surface resistances. However, the microwave surface resistances of high-temperature superconducting materials are particularly sensitive to microstructure due to their special two-dimensional superconducting mechanisms and extremely short superconducting coherence lengths. To investigate the correlations between microstructure and microwave surface resistance of high-temperature superconducting materials, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) films with different thickness are grown on (001)-oriented MgO single-crystal substrates by using the pulsed laser deposition (PLD) technique. Electrical measurements reveal that their superconducting transition temperatures and room temperature resistances do not show significant difference. However, their microwave surface resistances in superconducting state display a significant difference. The characterizations of the microstructures of YBCO films by synchrotron radiation three-dimensional reciprocal space mapping(3D-RSM) technique show that the number of the grains with CuO_2 face parallel to the surface (c crystals), and the consistency of grain orientation are the main causes for the difference in microwave surface resistance.

Keywords: three-dimensional reciprocal space mapping, YBCO films, microstructures

PACS: 61.05.cp, 68.65.-k, 74.78.-w

DOI: 10.7498/aps.72.20221776

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2022YFA1603900), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. E1E40207X2) and UCAS (Grant Nos. E1EG0210X2, 118900M018).

† Corresponding author. E-mail: gaochen@ucas.edu.cn

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜微结构的同步辐射三维倒空间扫描研究

易栖如 熊沛雨 王焕华 李港 王云开 董恩阳 陈雨 沈治邦 吴云 袁洁 金魁 高琛

Microstructure study of YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin film with synchrotron-based three-dimensional reciprocal space mapping

Yi Qi-Ru Xiong Pei-Yu Wang Huan-Hua Li Gang Wang Yun-Kai Dong En-Yang Chen Yu Shen Zhi-Bang Wu Yun Yuan Jie Jin Kui Gao Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 046101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221776

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221776>

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

低能离子对高温超导YBa₂Cu₃O_{7-δ}薄膜的表面改性和机理

Low-energy ion beam modified surface property and mechanism of high temperature superconductor YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin film
物理学报. 2018, 67(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20170822>

快重离子辐照对薄膜微观结构及载流特性的影响

Effect of swift heavy ions irradiation on the microstructure and current-carrying capability in YBa₂Cu₃O_{7-δ} high temperature superconductor films
物理学报. 2020, 69(7): 077401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191914>

硫离子注入纳米金刚石薄膜的微结构和电化学性能

Microstructural and electrochemical properties of sulfur ion implanted nanocrystalline diamond films
物理学报. 2019, 68(14): 148101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190394>

交变力磁力显微镜: 在三维空间同时观测静态和动态磁畴

Alternating magnetic force microscopy: simultaneous observation of static and dynamic magnetic field in three-dimensional space
物理学报. 2019, 68(16): 168502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190510>

He离子辐照对石墨烯微观结构及电学性能的影响

Effect of He ion irradiation on microstructure and electrical properties of graphene
物理学报. 2020, 69(1): 016101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191344>

纳米流体液膜蒸发自组装双尺度沉积结构三维模拟

Three-dimensional simulation of dual-scale deposition structures from evaporative self-assembly of nanofluid films
物理学报. 2019, 68(14): 140205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190270>