

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜的 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备 及超导特性研究

陈明月, 颜志超, 陈 静, 李敏娟, 刘志勇, 蔡传兵

(上海大学 理学院, 物理系, 上海市量子与超导新物态前沿科学基地, 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444)

摘要: 传统三氟乙酸金属有机化学溶液沉积法(TFA-MOD)制备 YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)超导层, Ba 倾向于与 F 结合, 从而避免 BaCO₃ 的形成。本工作开展了新型基于 BaCl₂/BaF₂ 途径的化学溶液法生长 YBCO 超导薄膜的研究。重点研究了添加 Cl 对 YBCO 薄膜晶粒取向、微观结构和超导性能的影响, 并通过生长反应的热化学计算, 分析了 BaCl₂ 途径 YBCO 薄膜的物相转变机制。结果表明: 添加 Cl 有利于抑制 *a* 轴晶粒取向, 促进 *c* 轴晶粒成核。添加 Cl 的 YBCO 双层膜起始转变温度(*T*_{c-onset})没有明显变化, 约为 89.6 K, 其临界电流密度(*J*_c)显著提升, *J*_c 达到 2.07 MA/cm² (77 K, 自场)。此外, 生长反应过程的物相转变分析表明 Cl 优先与 Ba 结合形成 BaCl₂, 有效避免 BaCO₃ 的形成。本研究结果表明: 添加 Cl 对制备 YBCO 超导厚膜有促进作用, 这为 MOD 法制备 YBCO 提供了一种新思路。

关键词: YBCO 薄膜; MOD 法; Cl 添加; 物相转变

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

YBa₂Cu₃O_{7-δ} Thin Film: Preparation by BaCl₂/BaF₂-MOD Method and Superconducting Property

CHEN Mingyue, YAN Zhichao, CHEN Jing, LI Minjuan, LIU Zhiyong, CAI Chuanbing

(Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, Shanghai Frontiers Science Center of Quantum and Superconducting Matter States, Department of Physics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Conventional trifluoroacetic acid metal organic chemical solution deposition (TFA-MOD) method for the preparation of YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) superconducting layers follows the BaF₂ growth mechanism. In this work, a novel chemical solution method based on BaCl₂/BaF₂ pathway for the growth of YBCO superconducting thin films was carried out. The effects of Cl addition on grain orientation, microstructure and superconductivity of YBCO thin films were investigated, and mechanism of the phase transition of YBCO thin films in the BaCl₂ pathway was explored by thermochemical calculations of the growth reaction. The results show that the Cl addition inhibits *a*-axis grain orientation and promotes nucleation of *c*-axis grains. Onset transition temperature (*T*_{c-onset}) of the YBCO 2-layer film is about 89.6 K without significant change after Cl addition. But its critical current density (*J*_c) is significantly increased to 2.07 MA/cm² (77 K, self-field). Meanwhile, the phase transition of the growth reaction process shows that Cl is preferentially combined with Ba to form BaCl₂ as much as possible, effectively avoiding the formation of BaCO₃. All

收稿日期: 2022-05-29; 收到修改稿日期: 2022-06-24; 网络出版日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(52172271); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB25000000)

National Natural Science Foundation of China (52172271); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDB25000000)

作者简介: 陈明月(1996-), 女, 硕士研究生. E-mail: Chenmingyue@shu.edu.cn

CHEN Mingyue (1996-), female, Master candidate. E-mail: Chenmingyue@shu.edu.cn

通信作者: 蔡传兵, 教授. E-mail: cbcai@t.shu.edu.cn

CAI Chuanbing, professor. E-mail: cbcai@t.shu.edu.cn

results of this study indicate that Cl addition facilitates preparation of YBCO superconducting thick films, and provides a new idea for the preparation of YBCO by MOD method.

Key words: YBCO thin film; MOD method; Cl addition; phase transition

目前常采用化学溶液沉积法动态连续化制备 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (REBCO, RE=Y, Sm, Gd 等) 超导薄膜^[1]。Gupta 等^[2]首先使用含氟的三氟乙酸金属盐, 它在热解处理过程中形成一种氟化物的中间过渡相, 在湿氧、温度高于 650 °C 下有效排出 $\text{F}^{[3-5]}$, 避免 BaCO_3 的出现, 被称为三氟乙酸金属有机沉积法 (TFA-MOD)。不同氟含量的前驱液制备 YBCO 超导薄膜, 研究发现即使 F 含量很低, Ba 仍然更倾向于与 F 先结合, 同样可以起到避免 BaCO_3 形成的作用^[6-8]。TFA-MOD 技术制备 REBCO 带材效率较低, 各工艺参数有效控制窗口小, 且在商业化的实际应用中 YBCO 的载流能力仍有待提升。人们试图通过增加薄膜厚度^[9-11]、引入钉扎中心^[12-15]等手段提高超导载流能力, 但制备 YBCO 厚膜, 首先要解决“厚度效应”的问题^[16-19]。MOD 法制备 YBCO 厚膜时, 薄膜厚度仅是初始凝胶膜的一半左右, 在高温烧结过程中产生的干燥应力最终通过裂纹形式释放掉^[20]。此外, 采用 MOD 法制备的 YBCO 厚膜的 a 轴晶粒过多的现象也十分严重^[21]。

引入钉扎中心生成非晶态相的同时往往还会导致薄膜 c 轴取向退化和薄膜表面形貌变得粗糙。2014 年, Motoki 等^[22]报道了 Cl 掺杂 YBCO 薄膜, 其内部生长出小纳米晶体 $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ (简称 Ba2342), 不仅提高了 YBCO 薄膜的结晶度, 而且有效改善了薄膜的磁通钉扎特性。进一步研究表明, Cl 掺杂可以拓宽 YBCO 薄膜的合成条件, 在 740 °C 下成功烧结获得临界电流值 $J_c > 100 \text{ A/cm}$ (77 K, 0 T) 的薄膜。与无氟 MOD 工艺 (FF-MOD) 相比, Cl 掺杂样品的晶化温度可降低 ~50 °C^[23]。Setoyama 等^[24]研究发现在 YBCO 块材制备过程中引入氯离子, 可以有效提高 YBCO 超导相的结晶度并改善块体的均匀性。但 Cl 对 YBCO 成相的内在作用机理尚未明确, Cl 与 F 同是卤族元素, 二者具有相似的化学性质, Cl 是否也会优先与 Ba 结合从而避免 BaCO_3 的形成, 还有待进一步研究。

本工作在 MOD 法制备 YBCO 超导层的基础上, 开展了新型 $\text{BaCl}_2/\text{BaF}_2$ -MOD 法生长 YBCO 超导薄膜的研究。重点研究了添加 Cl 对 YBCO 薄膜晶粒取向、微观结构和超导性能的影响; 通过分析生长反应的吉布斯自由能变化, 探究 $\text{BaCl}_2/\text{BaF}_2$ -MOD 法 YBCO 薄膜的物相转变机制。

1 实验方法

本研究通过无氟钪盐、三氟乙酸钡和无氟铜盐配制成超低氟前驱液, 其中氟含量为 23%, 采用 MOD 法制备 Cl 添加 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜。溶液化学计量比为 Y : Ba : Cu : Cl = 1.0 : 2.1 : 3.15 : 0.1, 将乙酸钪和乙酸铜溶解于丙酸和去离子水中, 将乙酸钪溶解于三氟乙酸和去离子水中, 通过盐酸引入 Cl 离子, 搅拌和多次蒸馏后得到总阳离子浓度为 2.5 mol/L 的前驱液。在 Hastelloy/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{IBAD-MgO}/\text{Epi-MgO}/\text{LaMnO}_3$ 上用提拉法制备前驱膜, 然后进行低温热处理, 得到低温热解膜。重复一遍涂覆和低温热处理, 可得到双层膜。在 780 °C 进行高温处理, 单层厚膜保温 120 min, 双层厚膜保温 180 min。高温热解阶段在潮湿的氧分压为 150×10^{-6} 的混合氮气和氧气流动气氛中进行。气体流速控制在 0.2 L/min 左右, 水浴温度为 30 °C, 相应的水分压为 $4.24 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。最后降温到 450 °C, 在流动氧气中保温 90 min。升温/降温速率分别为 25、10 °C/min。最终得到单层 (0.6 μm 厚) 和双层 (1.2 μm 厚) 的超导薄膜。

通过 X 射线衍射仪的 θ - 2θ 和 ω 扫描表征 YBCO 薄膜的相纯度和织构取向。采用拉曼光谱确定其内部成分和取向, 并使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 检查薄膜表面形貌。基于超导体自身完全抗磁性的特点, 使用临界电流密度扫描仪测量样品在 77 K 自场下的临界电流密度 J_c 值。借助磁学测量系统 MPMS 进一步测量薄膜的 M - T 曲线和 M - H 曲线, 并用 Bean 模型计算出样品在不同外加磁场下的临界电流密度 J_c 值。

2 结果与讨论

2.1 $\text{BaCl}_2/\text{BaF}_2$ -MOD 法 YBCO 薄膜物相表征

采用 XRD 对样品进行物相分析, 由图 1 可见 YBCO (00 l) 择优取向生长, 未检测到二次相如 $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ 晶粒的相关衍射峰。随着薄膜厚度的增加, 未添加 Cl 的双层膜出现 a 轴取向 (200) 峰, 而添加 Cl 双层膜依旧保持良好的 c 轴取向。通过薄膜的平面外 ω 扫描来检测其双轴织构质量, 图 2(a) 中未添加和添加 Cl 的 YBCO 双层膜 (005) 的 ω 扫描的半

高宽(FWHM)值分别为 1.44°和 1.08°, 说明了添加 Cl 的双层膜具有高度定向的 *c* 轴织构。此外, 采用拉曼图谱来确定其内部成分和取向, 如图 2(b)所示, 其结果说明添加 Cl 的 YBCO 双层膜具有很好的 *c* 轴取向优势。

图 3(a, b)中未添加 Cl 的低温热解膜表面比较光滑且无裂纹, 而添加 Cl 的 YBCO 单层膜表面容易形成褶皱、气泡等不良形貌。图 3(c, d)是高温晶化后表面形貌, 未添加 Cl 的样品表面较为平整。而添加 Cl 的样品表面较粗糙, 未发现大颗粒物如 Ba₂Cu₃O₄Cl₂

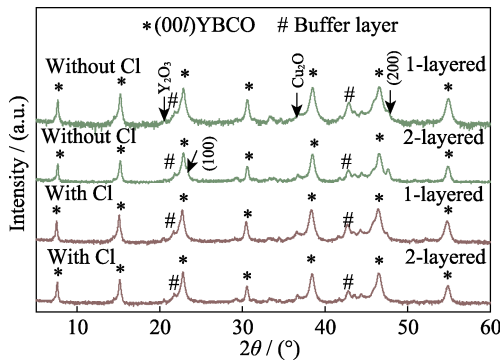


图 1 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 单层和双层膜的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of YBCO 1- and 2-layered films prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

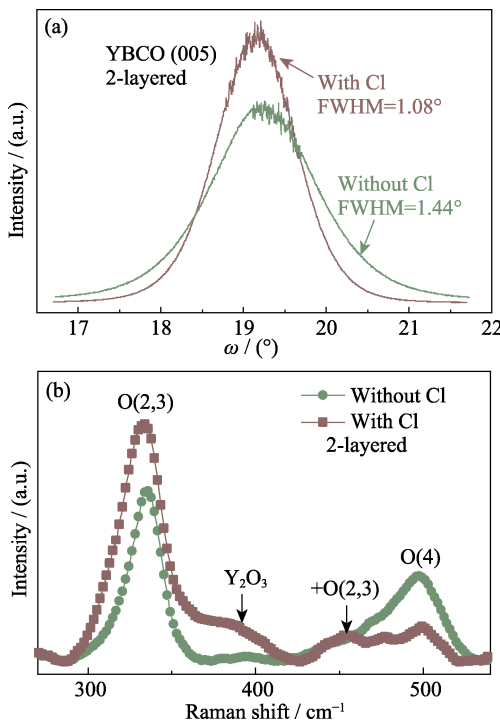


图 2 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 双层膜的(a) ω 扫描 XRD 谱图和(b)拉曼光谱图

Fig. 2 (a) ω scan XRD patterns and (b) Raman spectra of YBCO 2-layered films prepared by BaCl₂/BaF₂-MOD method

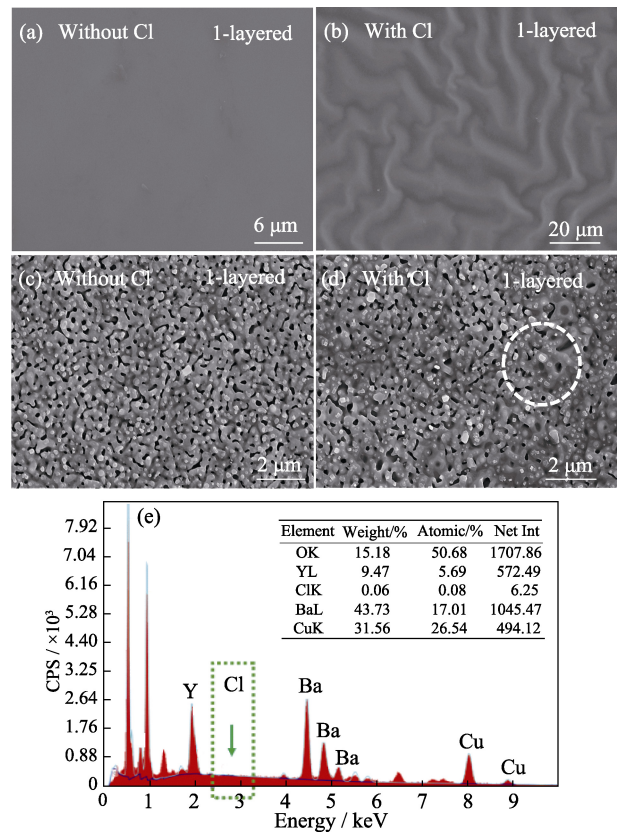


图 3 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 单层膜和晶化膜的 SEM 照片(插图为 EDS 扫描结果)

Fig. 3 SEM images of 1-layered and crystallized YBCO film prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

Low-temperature pyrolysis film of (a) Cl free and (b) Cl addition; YBCO crystallized film of (c) Cl free and (d) Cl addition, (e) corresponding EDS result of the white cycle area in Fig(d)

晶粒, 这与 XRD 分析结果一致。对图 3(d) 添加 Cl 的 YBCO 单层膜的白色圆圈区域进行 EDS 元素分析, 结果如图 3(e)所示, Cl 元素的含量几乎为零。Cl 在热解过程中可能以氯化钡固溶体的形式存在, BaCl₂ 与水蒸气反应, Cl 最终以 HCl 的形式被排出材料体系。Cl 与 F 是化学性质相似的卤族元素, BaCl₂ 作为中间相的作用机制类似于 BaF₂ 过程。

图 4(a, c)显示, 未添加 Cl 的 YBCO 双层膜在高温烧结的过程中会产生干燥应力, 并且膜的厚度越大干燥应力就越大, 最终需要通过裂纹的形式释放。除了裂纹问题, 未添加 Cl 的双层膜 *a* 轴晶粒问题也十分严重。而添加 Cl 的 YBCO 双层膜能释放薄膜厚度增加过程中产生的内应力, 有效缓解“厚度效应”的影响, 从而获得均匀且致密表面形貌良好的超导薄膜。

2.2 BaCl₂/BaF₂-MOD 法 YBCO 薄膜的超导特性

采用感应法测 YBCO 薄膜在 77 K 自场下的感应 *J_c*。如图 5 所示, 无添加 Cl 和 BaCl₂ 途径的 YBCO

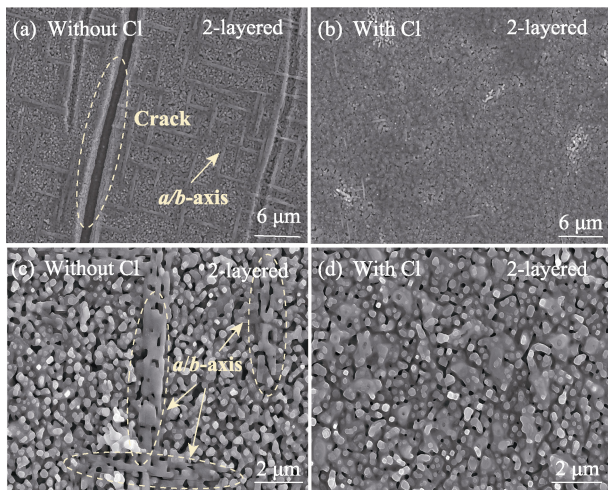


图 4 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 双层膜的 SEM 照片
Fig. 4 SEM images of YBCO 2-layered films prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

(a, c) Cl free and (b, d) Cl addition, different magnification

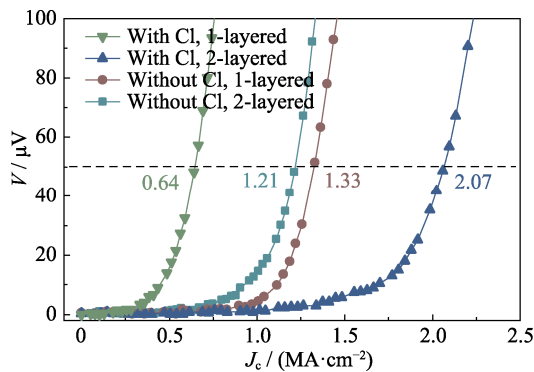


图 5 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 单层和双层薄膜的临界电流密度特性

Fig. 5 Critical current density characteristics of YBCO 1- and 2-layered films prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

单层膜的 J_c 分别为 1.33、0.64 MA/cm² (77 K, 自场)。BaCl₂ 途径的 YBCO 单层膜表面形成不良形貌持续影响到最终的 YBCO 薄膜, 其 J_c 大大降低。而添加 Cl 对双层膜的 J_c 有所提升, 无 Cl 添加和 BaCl₂ 途径的 YBCO 双层膜的 J_c 大小分别为 1.21、2.07 MA/cm² (77 K, 自场)。

YBCO 双层膜的磁化强度随温度变化曲线如图 6 所示, 添加 Cl 的 YBCO 双层膜的起始转变温度 ($T_{c-onset}$) 约为 89.6 K, 与未添加 Cl 样品的 $T_{c-onset}$ 相比基本无太大变化。研究发现, 由于添加 Cl 的 YBCO 双层膜具有更好的表面形貌和薄膜结构, 因此超导抗磁相明显多于未添加 Cl 的样品。

如图 7 所示, 在 30 和 77 K 的不同外场下添加 Cl 的 YBCO 单层膜的临界电流密度 J_c 值相比无添加 Cl 的样品较低, 添加 Cl 对单层膜超导性有不同程度的抑制作用, 除了不良形貌的影响, 还可能来自于

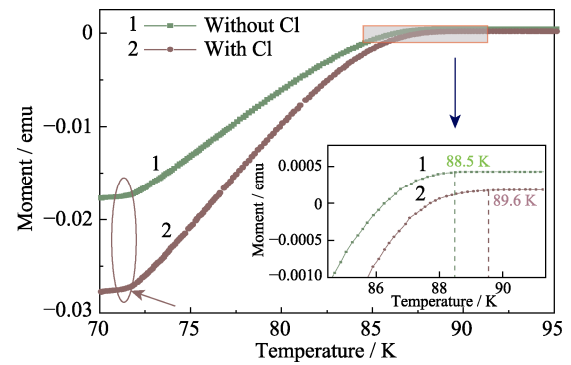


图 6 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备的 YBCO 双层膜的磁化强度的温度依赖性

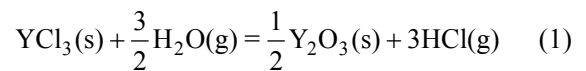
Fig. 6 Temperature dependence of magnetization intensity of YBCO 2-layered films prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

1 A·m²=10³ emu

盐酸对金属基底的腐蚀损伤。同时, 在不同外加磁场下, BaCl₂ 途径的 YBCO 双层膜的临界电流密度 J_c 值相比无添加 Cl 的样品均有所提升。添加 Cl 的 YBCO 双层膜的织构良好且性能优异。

2.3 BaCl₂ 途径 YBCO 薄膜的物相转变机制

在热解过程中, 水蒸气与氯化物固溶体发生反应释放出 HCl 气体。通过对排 Cl 反应的热力学分析, 了解成核前烧结过程中的相变, 可能发生的反应如下:



可以计算不同温度和气体分压下反应(1~3)的吉布斯自由能变化(ΔG)。实验过程中水蒸气的分压为 4.24×10^3 Pa, HCl 的分压随温度和水分压的变化而变化, 假设 p_{HCl}^2 / p_{H_2O} 的比为 1、 1×10^{-8} 和 1×10^{-13} [25-26]。当 $p_{HCl}^2 / p_{H_2O} = 1$ 时, 如图 8(a)所示, 反应(1)的 ΔG 在 720 K(447 °C)附近开始小于零, 反应自发向右进行, YCl₃ 与 H₂O 反应生成 Y₂O₃ 并释放出 HCl 气体。随着 p_{HCl}^2 / p_{H_2O} 的比值降低到 1×10^{-8} 时, 如图 8(b)所示, 反应(1~2)的 ΔG 在较低温如 420 K(147 °C)就可能自发向右进行, 但此时反应(3)的 BaCl₂ 氧化过程仍未进行。这意味着较高浓度的 HCl 会抑制反应向右进行, 因此固溶体的演化过程受 Cl 向外扩散控制。随着温度升高, Y₂O₃ 与 CuO 会继续反应生成 Y₂Cu₂O₅, 为后续 YBCO 成核做准备。

随着 HCl 气体的排出, p_{HCl}^2 / p_{H_2O} 的比值降低到 1×10^{-13} 时, 如图 8(c)所示, 反应(3)的 ΔG 在 950 K

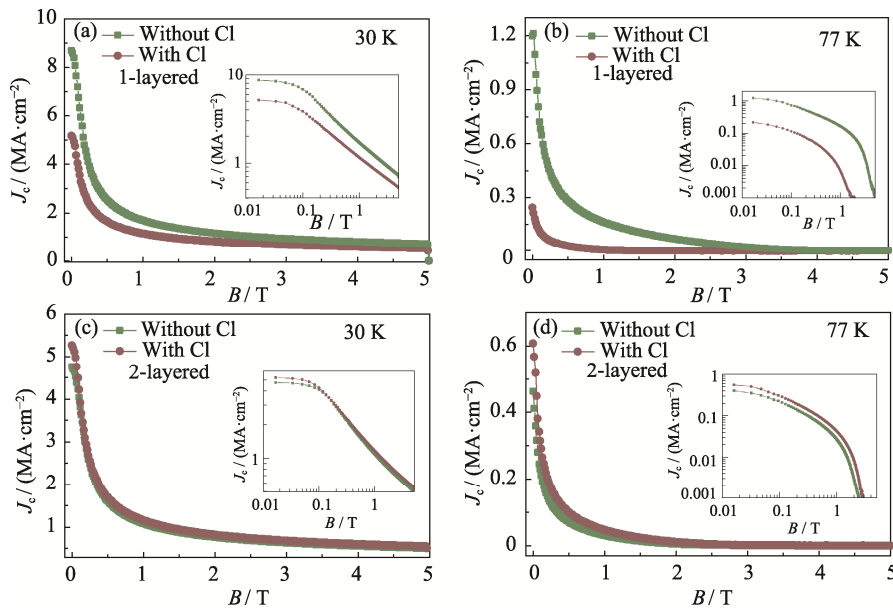


图 7 BaCl₂/BaF₂-MOD 法制备 YBCO 单层和双层薄膜在不同温度下 J_c 的场依赖性
 Fig. 7 Field dependence of J_c at different temperatures for YBCO 1- and 2-layered films prepared by the BaCl₂/BaF₂-MOD method

(a, b) 1-layer film at 30 and 77 K; (c, d) 2-layer films 30 and 77 K, respectively

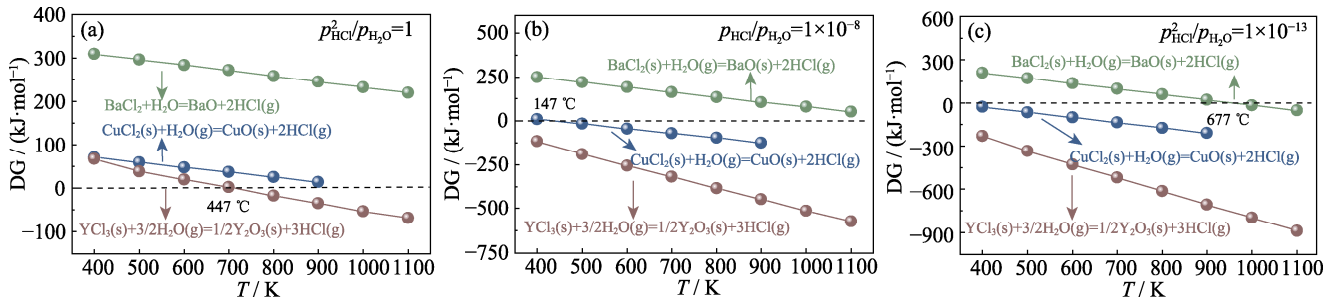
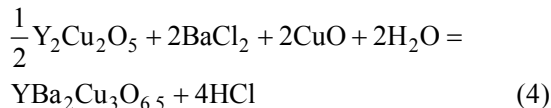


图 8 不同分压下 BaCl₂ 途径 YBCO 反应吉布斯自由能变化的温度依赖性

Fig. 8 Temperature dependence of the change in Gibbs free energy of the YBCO reaction through the BaCl₂ pathway at different partial pressures

(a) $p_{\text{HCl}}^2 / p_{\text{H}_2\text{O}} = 1$; (b) $p_{\text{HCl}}^2 / p_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \times 10^{-8}$; (c) $p_{\text{HCl}}^2 / p_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \times 10^{-13}$

(677 °C)附近 BaCl₂ 开始与 H₂O 反应生成 BaO 和 HCl。因此氯化物与水反应的先后顺序是: YCl₃>CuCl₂>BaCl₂。BaCl₂ 具有更好的稳定性, 所以 Cl 会优先与 Ba 结合形成 BaCl₂, 有效避免形成 BaCO₃。达到晶化温度时, BaO 会与之之前形成的中间相 Y₂Cu₂O₅ 迅速反应生成 YBCO。“BaCl₂”途径下形成 YBCO 的反应方程式为:



3 结论

本研究提出改进的 BaCl₂/BaF₂-MOD 法 YBCO 薄膜生长工艺, 即在超低氟 MOD 工艺中, 通过添加

盐酸引入 Cl 离子, 研究 BaCl₂ 途径的单层和双层 YBCO 超导薄膜的生长及超导特性。添加 Cl 的 YBCO 单层前驱薄膜表面容易形成褶皱等不良形貌, 并对最终 YBCO 超导薄膜性能影响较大, 表现为 J_c 降低。BaCl₂/BaF₂-MOD 法可促进 YBCO 双层膜生长, 有效释放薄膜厚度增加过程中产生的内应力, 对制备 YBCO 超导厚膜有促进作用。通过物相转变分析, 得出氯化物与水反应的先后顺序是: YCl₃>CuCl₂>BaCl₂, 明确了 Cl 会尽可能优先与 Ba 结合, 从而有效避免了 BaCO₃ 的形成。

参考文献:

[1] PINTO V, CELENTANO G, TOMELLINI M, *et al.* Heterogeneous nucleation of YBCO via fluorine based MOD process: thermody-

- dynamic and kinetic approach. *Superconductor Science and Technology*, 2020, **33(11)**: 115006.
- [2] GUPTA A, JAGANNATHAN R, COOPER E I, *et al.* Superconducting oxide films with high transition temperature prepared from metal trifluoroacetate precursors. *Applied Physics Letters*, 1988, **52(24)**: 2077.
- [3] SMITH J A, CIMA M J, SONNENBERG N, *et al.* High critical current density thick MOD-derived YBCO films. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1999, **9(2)**: 1531.
- [4] YOSHIKUMI M, WESOLOWSKI D, CIMA M J, *et al.* Determination of HF partial pressure during *ex situ* conversion of YBCO precursors. *Physica C Superconductivity and its Applications*, 2005, **423(3/4)**: 75.
- [5] DOU W, LIU Z, PENG C, *et al.* Phase transition during heat treatment of precursor before $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ nucleation in TFA-MOD method. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2016, **29(8)**: 1997.
- [6] LI M J, LIU Z Y, BAI C Y, *et al.* Artificial control for nucleation and growth rate of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors prepared by low fluorine chemical solution deposition. *Physica C Superconductivity and Its Applications*, 2017, **537(15)**: 29.
- [7] LI M J, YANG W T, SHU G Q, *et al.* Controlled-growth of film using modified low-fluorine chemical solution deposition. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, **25(3)**: 6601804.
- [8] WU W, FENG F, ZHAO Y, *et al.* A low-fluorine solution with a 2:1 F/Ba mole ratio for the fabrication of YBCO films. *Superconductor Science and Technology*, 2014, **27(5)**: 055006.
- [9] YAMADA Y, ARAKI T, KUROSAKI H, *et al.* Development of high critical current TFA-MOD YBCO coated conductors. *AIP Conference Proceedings*, 2002, **614(1)**: 631.
- [10] TOKUNAGA Y, HONJO T, IZUMI T, *et al.* Advanced TFA-MOD process of high critical current YBCO films for coated conductors. *Cryogenics*, 2004, **44(2004)**: 817.
- [11] HONJO T, FUJI H, NAKAMURA Y, *et al.* Growth mechanism of Y123 film by MOD-TFA method. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2002, **66(3)**: 151.
- [12] FOLTYN S R, WANG H, CIVALE L, *et al.* Overcoming the barrier to width superconducting coatings. *Applied Physics Letters*, 2005, **87(16)**: 348.
- [13] CHENG C H, ZHAO Y, FENG Y, *et al.* Superconductors with nanoscale flux pinning centres. *Springer Berlin Heidelberg*, 2005 (**Chapter 16**): 619.
- [14] ZHAO Y, CHENG C H, WANG J S. Flux pinning by NiO-induced nano-pinning centres in melt-textured YBCO superconductor. *Superconductor Science and Technology*, 2005, **18(2)**: S43.
- [15] MATSUMOTO K, HORIDE T, ICHINOSE A, *et al.* Critical current control in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films using artificial pinning centers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44(1)**: 890.
- [16] JHA A K, KHARE N, PINTO R, *et al.* Interface engineering using ferromagnetic nanoparticles for enhancing pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110(11)**: 631.
- [17] WU X D, FOLTYN S R, ARENDT P, *et al.* Preparation of high quality $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thick films on flexible Ni-based alloy substrates with textured buffer layers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, **5(2)**: 2001.
- [18] FOLTYN S R, JIA Q X, ARENDT P N, *et al.* Relationship between film thickness and the critical current of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors. *Applied Physics Letters*, 1999, **75(23)**: 3692.
- [19] GROVES J R, ARENDT P N, FOLYN S R, *et al.* High critical current density $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thick films using ion beam assisted deposition MgO bi-axially oriented template layers on nickel-based superalloy substrate. *Journal of Materials Research*, 2001, **16(08)**: 2175.
- [20] KANG B W, GOYAL A, LEE F L, *et al.* Comparative study of thickness dependence of critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ on (100) SrTiO_3 and on rolling-assisted biaxially textured substrates. *Journal of Materials Research*, 2002, **17(7)**: 1750.
- [21] LI Q, ZHANG W, SCHOOP U, *et al.* Progress in solution-based YBCO coated conductor. *Physica C*, 2001, **357(2)**: 987.
- [22] MOTOKI T, SHIMOYAMA J I, YAMAMOTO A, *et al.* Dramatic effects of chlorine doping on J_c and microstructure of fluorine-free MOD Y123 thin films. *Superconductor Science and Technology*, 2014, **27(9)**: 095017.
- [23] MOTOKI T, IKEDA S, HONDA G, *et al.* Dramatic effects of chlorine addition on expanding synthesis conditions for fluorine-free metal-organic decomposition $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films. *Applied Physics Express*, 2017, **10(2)**: 023102.
- [24] SETOYAMA Y, SHIMOYAMA J I, OGINO H, *et al.* Improved superconducting properties of YBCO melt-solidified bulks by addition of Ba-Cu-O-Cl. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, **26(3)**: 7200304.
- [25] DOU W Z, LIU Z Y, CAI C B, *et al.* Phase transition during sintering process before nucleation of TFA-MOD $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films. *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, IEEE, 2016, DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453668.
- [26] CHAN S W, BAGLEY B G, GREENE L H, *et al.* Effect of the post-deposition processing ambient on the preparation of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coevaporated thin films using a BaF_2 source. *Applied Physics Letters*, 1988, **53(15)**: 1443.