

特约专栏

REBCO 涂层导体制备技术及其进展

李贻杰, 刘林飞, 徐 达, 祝胜萍, 王 莹, 朱 鹏

(上海交通大学, 上海 200240)

摘 要: REBCO 涂层导体具有 $J_c(77\text{K})$ 高于 10^6 A/cm^2 的临界电流密度和高的不可逆场 $H_{ir}(77\text{ K})$, 展示了在液氮温度下非常有实用前景的超导性质, 从而成为目前各国竞相研究开发的焦点。简要概述了高温涂层导体薄膜的制备技术, 着重介绍了脉冲激光沉积、金属有机物沉积、化学气相沉积、溶胶-凝胶、磁控溅射和液相外延等方法的特征、优缺点和最新发展情况, 并对 REBCO 高温超导涂层导体的应用前景进行了展望。

关键词: REBCO; 涂层导体; 薄膜; 制备技术

中图分类号: O511.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2011)03-0016-06

Fabrication Technology of REBCO Coated Conductor and Its Development

LI Yijie, LIU Linfei, XU Da, ZHU Shengping, WANG Ying, ZHU Peng
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: REBCO coated conductor has demonstrated promising superconducting properties for use at liquid nitrogen temperatures with critical current density, J_c , (at 77 K) higher than $10^6\text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, and high irreversibility field, $H_{ir}(77\text{ K})$, so many countries have focused on its research. The fabrication technology of high temperature coated conductor is reviewed. The characteristics, relative merits and recent development of the preparation methods, such as pulsed laser deposition (PLD), metal organic deposition (MOD), chemical vapor deposition (CVD), sol-gel, magnetron sputtering, and liquid phase epitaxy (LPE), have been analyzed and stressed. The application prospects of coated conductor are also viewed.

Key words: REBCO; coated conductor; thin film; fabrication technology

1 前 言

自从1986年新型氧化物高温超导体发现以来^[1], 该领域已经取得了很大的进展。氧化物高温超导材料发现之初, 考虑到新型高温超导材料对国民经济发展有可能带来巨大的经济效益, 世界各国在该领域投入了大量的人力、物力、并且展开了激烈的竞争, 以期在短期内将高温超导材料大规模应用于能源、电力、交通运输等工业领域。

在所有超导体中, Y系超导薄膜与Bi系、Tl系超导体相比, 其制备更容易一些, 因此以 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)为代表的Y系高温超导带材受到了更多的重视, 得到更大的发展^[2-4]。从1990年开始, 美、日、英、德等国开始了Y系高温超导带材的研发工作, 建立了YBCO高温超导带材及相关应用的国家攻关计划^[4]。

YBCO带材通常也称作第2代高温超导带材, 由于其制作方法主要是薄膜涂敷技术, 所以YBCO带材又被称作涂层导体。本文对REBCO ($RE = \text{Y}, \text{Sm}, \text{Gd}$ 等稀土元素)薄膜制备中采用的方法和最新进展进行综述, 比较各自在薄膜制备方法上的优缺点, 对合理选择制备REBCO超导薄膜的制备方法提出参考意见。

2 REBCO 涂层导体的基本结构

所谓第2代高温超导带材有4种主要分类(见图1): ① 轧制辅助双轴织构基带(RABiTS)。通过对面心立方金属的机械轧制和随后的热处理获得织构, 然后外延生长隔离层和超导层^[5](图1a); ② 离子束辅助沉积(IBAD), 在非织构的金属基底上采用二次离子枪使氧化物薄膜取向生长, 或者倾斜基底沉积工艺, 采用基底与氧化物源倾斜一定角度从而获得织构(图1b); ③ 液相外延生长(LPE), 利用过冷的过饱和液体形成超导相; ④ 热磁工艺(TM)(图1c), 采用热磁辅助工艺在非织构的基底上形成高织构的超导层。超导层的生长是制

收稿日期: 2011-02-28

基金项目: 国家863计划项目(2009AA032402)

通信作者: 李贻杰, 男, 1961年生, 教授, 博士生导师

造第2代高温超导带材的关键。因为超导层的质量决定了超导带材所能传输电流的大小,而超导电流的大小直接与超导带材的性能价格比相关,所以能否制备出具有很高超导电流传输能力的带材是大规模商业化应用的关键。

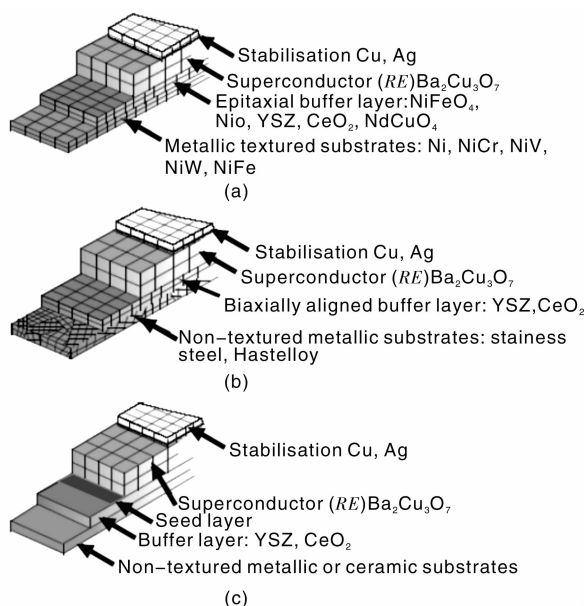


图1 涂层导体的不同结构示意图: (a)轧制辅助双轴织构基底 RABiTs, 通常 10 mm 宽的带子, (b)离子束辅助沉积 IBAD 或者倾斜基底沉积 ISD, (c)液相外延 (LPE)或热磁工艺(TM)

Fig. 1 Schematic diagram of coated conductor with various structures; (a) rolling auxiliary biaxial texture substrate RABiTs, usually used tape of 10 mm in width, (b) ion-beam auxiliary deposition IBAD or clino-substrate deposition ISD, and (c) liquid phase epitaxial (LPE) or thermal magnetic technology (TM)

3 REBCO 高温超导薄膜的制备方法

在金属基底上超导层的沉积可以分为物理方法和化学方法,见表1。有脉冲激光沉积(PLD)^[6], 粒子束辅助沉积(IBAD)^[7], 溅射^[8], 化学气相沉积(CVD)^[9], 金属有机物沉积(MOD)^[10-11], 金属有机物化学气相沉积(MOCVD)^[12], 热蒸发^[13], 溶胶-凝胶沉积(sol-gel)^[14-15], 喷墨涂层^[16], 浸涂^[17]和液相工艺^[18-19]等方法都可以用来制备短或者长的高温超导带材^[20-21]。

3.1 脉冲激光沉积

脉冲激光沉积(PLD)是20世纪80年代后期发展起来的一种新型薄膜制备技术。PLD是将准分子脉冲激光器所产生的高功率脉冲激光束聚焦作用于靶材料表面,使靶材料表面产生高温及熔融,并进一步产生高温高压

等离子体($T \geq 104$ K),这种等离子体定向局域膨胀发射并在衬底上沉积而形成薄膜。目前所用的脉冲激光器中以准分子激光器能量效果最好。准分子激光器的工作气体为 ArF, KrF, XeCl 和 XeF, 其波长分别为 193, 248, 308, 351 nm, 光子能量相应为 6.40, 5.00, 4.03, 3.54 eV。准分子激光器一般输出脉冲宽度为 20 ns 左右,脉冲重复频率为 1~20 Hz,靶面能量密度可达 2~5 J/cm²,功率密度可达 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$ W/cm²,而脉冲峰值功率可高达 1×10^8 W。

表1 YBCO 涂层的物理和化学方法沉积方法

Table 1 Physical and chemical deposition methods of YBCO coatings

Physical methods	Chemical methods
Pulsed laser deposition	Sol-gel
Electron beam-based deposition	Chemical vapor deposition
Electrophoresis	Metal organic chemical vapor deposition
Magnetron sputtering	Metal organic deposition
Thermal evaporation	Electro-deposition
Sputtering	Pray pyrolysis

同其他制备技术相比,PLD 具有如下优点^[22]:

①可以生长和靶材成分一致的多元化合物薄膜,甚至含有易挥发元素的多元化合物薄膜,是其突出的优点;②激光能量的高度集中,PLD 可以蒸发金属,半导体,陶瓷等无机材料。有利于解决难熔材料(如硅化物,氧化物,碳化物,硼化物等)的薄膜沉积问题;③易于在较低温度(如室温)下原位生长取向一致的织构膜和外延单晶膜。因此,适用于制备高质量的光电,铁电,压电,高 T_c 超导等多种功能薄膜;④能够沉积高质量纳米薄膜。高的粒子动能具有显著增强二维生长和抑制三维生长的作用,促使薄膜的生长沿二维展开,因而能够获得极薄的连续薄膜而不易出现岛化;⑤灵活的换靶装置,便于实现多层膜及超晶格薄膜的生长,多层膜的原位沉积便于产生原子级清洁的界面;⑥生长过程可以原位引入多种气体,烧蚀物能量高,容易制备多层膜和异质结,工艺简单,灵活性大。

目前,用 PLD 法制备 YBCO 超导薄膜已有好多报道,Yusuke Ichino 等采用 Nd:YAG-PLD 方法制备出 T_c 约 90 K、77 K 下, $J_c > 1$ MA/cm² 的 Y123 高温超导薄膜^[23]。Y. Yamada 等在 IBAD-MgO 基带上采用 PLD 方法制备出 41 m 长 2.5 μ m 厚的 GdBCO 高温超导带材,其临界电流达到 500~600 A,临界电流密度为 2~2.4 MA/cm²^[24]。Y. Sutoh 等制备出 J_c 达到 3.2 MA/cm² 的 GdBCO 薄膜,并且通过添加 5 mol% BaZrO₃, 3 T 磁场下 I_c 达到 25.6 A/cm-w^[25]。T. Nagaishi 等采用 PLD 方法

在金属基带上制备出 200 m 长、临界超导电流为 205 A 的 GdBaCuO 高温超导带材, 临界电流达 380 A^[26]。2011 年, 上海交通大学采用 PLD 方法在 RABiTS 基带上制备出临界电流高于 100 A、长度 100 m 的 YBCO 第 2 代高温超导带材。

3.2 金属有机物沉积

金属有机物沉积(MOD)是一种能从前驱溶液制备一定厚度超导薄膜的非真空方法。其原理是: 将金属有机化合物溶解在适当的溶剂中, 形成溶胶, 再用匀胶法将其沉积在衬底上, 经过预热处理, 使有机成分分解挥发, 再在高温下烧结, 最后形成所需的薄膜。与脉冲激光沉积不同, 金属有机物沉积制备的 YBCO 超导层组织结构是薄片状, 缺陷沿着 $a-b$ 面生长, 而脉冲激光沉积的是柱状结构, 缺陷沿着 c 轴生长。这些形貌的不同也影响磁通的钉扎取向。有些时候, 磁场平行于 $a-b$ 面比平行于 c 轴更有利。金属有机物沉积(前驱液是金属三氟醋酸)^[27-30]有利于纳米颗粒的掺杂。能够掺杂的颗粒范围很广, 如 Y_2O_3 , Y_2BaCuO_5 , $Y_2Cu_2O_5$, $BaCeO_3$ 和 $BaZrO_3$ 。通过前驱液化学和工艺参数, 可以全方位控制纳米颗粒密度、大小和成分。金属有机物沉积过程中的纳米颗粒掺杂可以在全场和温度下提高临界电流, 也可以降低临界电流密度角度依存性 $J_c(B, \varphi)$ 。

由于 MOD 法制作成本低和生产率高, 用三氟乙酸盐-金属有机沉积(TFA-MOD)的方法制备 YBCO 薄膜是目前国际上广为采用的方法, 非常有利于产业化。日本和欧美发达国家都在加紧研究用非真空 TFA-MOD 法来替代 PLD 法的可能性, 并取得了引人注目的进展, 具有相当的发展潜力。日本的 T. Izumi 等人^[31]采用 MOD 法在哈氏合金 C276 基带上制备出 90 m 长、平均临界电流达 300 A/cm-w, 短样的电流达到 735 A/cm-w。国内西北有色金属研究院采用 TFA-MOD 方法在 $LaAlO_3$ (LAO)(0 0 1)基底上制备出 $J_c(77\text{ K}, \text{自场}) = 1.8\text{ MA/cm}^2$ 的 GdBCO 超导薄膜^[32]。

3.3 溶胶-凝胶技术

溶胶是固体在液体中的胶体分散, 也可以看做是固体和悬浮液之间的中间阶段。溶液中的分散颗粒不停地进行自由布朗运动, 分散颗粒的大小必须小于 1 μm , 这可以通过调整合成参数(如时间和温度)和化学参数(如前驱液的选择, pH 值和含量)得到。溶胶-凝胶技术的最大优点是溶液中的金属离子是在分子水平上均匀混合, 这就降低了化学分开的几率, 提高涂层的化学均匀性。另外的优点有低成本(不需要真空)和选择合适的材料可以制备各种新型材料。合成溶胶的主要方法可以分为含水和不含水 2 类。

通用的含水路线制备 YBCO 薄膜是利用醋酸盐前驱液。含水醋酸盐溶液按比例混合, 用络合剂(通常为酒石酸或者琥珀酸)稳定溶胶。这个路线的最大的优点是可以直接合成, 前驱液无毒, 成本低。另外一个含水路线是硝酸盐合成方法。硝酸盐中的金属溶解在水中, 通过柠檬酸络合。形成的溶液比醋酸路线的表面张力小^[33]。这种方法的最大缺点是热处理时氮的去除是高放热反应。这种方法用于制备隔离层更普遍和成功^[34]。

利用不含水溶胶法制备 YBCO 所用的两个主要化学物是醇盐和氟。醇盐路线主要是金属氢氧化物以及胺添加到酒精基溶剂(如甲醇, 异丙醇和盐酸), 反应很复杂, 涉及很多过程包括聚合。因为是酒精基, 表面张力比较小, 凝胶化比较快。因为是最早建立的溶胶-凝胶合成路线, 因此文献报道比较多。主要缺点是前驱液比较贵, 合成条件窗口比较窄。氟路线在溶胶-凝胶制备 YBCO 中越来越普遍。最大的优点是氟容易和钡离子复合物结合而避免碳酸钡的形成, 从而制备出高质量的 YBCO 薄膜。最大的缺点是工艺产生氢氟酸(在去除氟过程中)和高放热, 所以热处理必须被很好的控制。关于以上讨论的合成和工艺路线如乙酸路线^[35-37]、硝酸盐路线^[38-40]、醇盐路线^[41-42]、氟路线^[43-44]的评论如表 2 所示。

3.4 磁控溅射方法

磁控溅射技术诞生于 20 世纪 70 年代初期, 并随后在高速沉积金属、半导体和介电薄膜等方面取得巨大进步, 成为目前制备 YBCO 薄膜最广泛的方法之一。其基本原理是在真空下电离惰性气体形成等离子体, 气体离子在靶上附加偏压的吸引下, 轰击靶材, 溅射出金属离子沉积到基片上。磁控溅射制备的薄膜致密、均匀性好(相比 sol-gel 等方法)、设备成本低(相对 PLD), 且对生长薄膜厚度、质量厚度均匀性、结晶状态等控制能力强, 可获取高度重复一致性的薄膜品质。由于磁控溅射可制备出高质量大尺寸的 YBCO 薄膜, 国内许多研究者采用磁控溅射方法对 YBCO 薄膜的表面形貌与缺陷和位错的形成机制进行了深入研究。如采用倒筒式磁控溅射装置结合辐射加热方法可以成功制备出无源微波器件用的 YBCO 双面薄膜^[45]。生长出 75 mm 长的高质量 YBCO 双面薄膜, 两面的 T_c 分别为 90.3 K, 90.4 K, 表面电阻(77 K, 10 GHz)分别为 330 $\mu\Omega$ 和 400 $\mu\Omega$ 。

3.5 金属有机物化学气相沉积

金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)法是近 20~30 年发展起来的一项用于制备高性能薄膜材料的制备技术。此法无需高真空系统, 设备价格低廉, 成分易控制并可随意增减添加剂、可制备大面积以至双面膜, 满足各种形状及大小的衬底。美国的 Superpower 采用

MOCVD 方法在 IBAD 基带上制备出长 1 065 m, I_c 达到 282 A 的千米级长带^[46], 并且采用 Zr 掺杂制备出自场

下电流高达 961 A/cm - w 的 GYBCO 超导带材, 1 T 磁场下电流达到 194 A/cm - w。

表 2 超导层溶胶-凝胶合成路线

Table 2 Synthesis sol-gel routes for preparation of superconducting layers

Route	Synthesis	Comments	Properties
Aqueous acetate	Aqueous acetate; complexing agent (such as succinic or tartaric acid); yield a low viscosity sol with high surface tension	Poor wetting on surface; unsuitable for deposition purposes such as dip-coating and ink-jet coating	T_c : ~88 K J_c : 3 500 A/cm ² (77 K)
Aqueous nitrate	Nitrate precursors; citric acid; addition of a polymerizing agent such as ethylene glycol to increase viscosity	Good wetting; highly exothermic reaction; formation of thick YBCO layers is difficult	T_c : ~90 K J_c : 4×10^6 A/cm ² (20 K)
Non-aqueous alkoxide	Hydroxides dissolved in a non-aqueous solvent (such as methanol, isopropanol)	Excellent wetting; main drawback is the high cost of precursors	T_c : ~90 K J_c : 10^5 A/cm ² (77 K)
Non-aqueous fluorine	Metal precursor power (for example acetates); trifluoroacetic acid and methanol acid; low surface tension	Barium fluoride complex is formed which stops the formation of barium carbonate; high quality YBCO may be formed	T_c : ~90 K J_c : 2×10^6 A/cm ² (77 K)

3.6 液相外延

液相外延方法最早应用于半导体和光电子氧化物薄膜的生长。液相外延需要在合适的基底(如小的晶格失配度)上含有溶质的熔融不稳定过饱和溶液的过冷, 所需要的相才能形核和生长。Scheel^[47]首先利用一步液相外延生长高温超导薄膜。高温超导薄膜的液相外延生长比传统的半导体薄膜生长难很多, 因为稀土元素的溶解性很低, 形核和生长都比较难。液相外延生长包括 4 个阶段: ① 制备对应于饱和温度包括一定量溶质的溶液; ② 冷却溶液到生长温度, 产生过冷过饱和溶液; ③ 把溶液和基底结合一定时间, 制备需要的厚度层; ④ 把溶液从薄膜上分离终止生长。①和③阶段可以相互变化, 溶液和基底接触后冷却可以开始(或继续)。液相外延生长机理是一个复杂的过程。与基于真空的薄膜技术如溅射和脉冲激光沉积相比, 液相外延的优点是明显的。这一过程生长速率快, 通常 1 $\mu\text{m}/\text{min}$, 超导涂层的织构好, J_c 不会随着薄膜厚度的增加而降低, 原位生长和不需要真空(相当低的成本)。不足是超导层厚度超过 5 μm 后容易裂, 从而大大降低输运临界电流。尽管液相外延制备过程比较复杂, 不过能高产率制备出织构好、高超输运性能的超导涂层。

4 REBCO 高温涂层导体应用前景及展望

超导技术将是 21 世纪具有经济战略意义的高新技术, 具有广阔的市场前景, 主要应用于能源(超导输电、超导储能、超导体、超导限流器等)、交通和国防技术(磁悬浮列车、船舶磁推进器、电磁推进等)和其他如医疗卫生(核磁共振成像、生物磁仪器等)。由于第 2 代高温超导带材在零电阻的超导状态下具有很强的电流传输能力, 所以在电力的生产、传输与应用领域可大大降低能耗, 提高能源的有效利用率, 减轻日益增长的电

力紧张压力, 并且不会造成环境污染; 第 2 代高温超导带材在微米厚的长带薄膜中具有很强的电流传输能力, 所以用第 2 代高温超导带材制成的大功率超导发电机、超导电动机与传统的大功率发电机、电动机相比, 可大大减小体积和重量, 特别适用于大型军用舰艇、大功率激光武器等; 用第 2 代高温超导带材制备的核磁共振设备, 在液氮温度下即可工作, 不再需要液氦, 可以大幅降低核磁设备的运行成本。

第 2 代高温超导线传输电流能力是 Cu 线的几百倍, 因此有望革新电的传输和分布, 从而使现在的电网满足日益增长的电力需求。10 年前人们还怀疑 YBCO 能否制备出满足应用要求的长带, 随着技术的发展, 千米级高电流的超导带材已经研制成功, 打开了涂层导体应用的大门, 目前, 超导带材即将商品化。要实现超导带材在市场上的成功, 不仅需要较大量级的长度和电流, 还要求机械强度和工程电流密度较大、交流损耗较小、生产成本较低。因此, 涂层导体还需要继续研发, 不断开发出涂层导体性能更好、生产成本更低的制备技术。

参考文献 References

- [1] Bednorz J G, Müller K A. Possible High T_c Superconductivity in the $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{Cu}_2\text{O}$ System [J]. *Z Phys B*, 1986, 64: 189 - 193.
- [2] Foltyn S R, Arendt P N, Jia Q X, et al. Strongly Coupled Critical Current Density Values Achieved in $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Coated Conductors with Near-Single-Crystal Texture [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82 (25), 4 519 - 4 521.
- [3] Malozemoff A P, Verebelyi D T, Fleshler S, et al. HTS Wire: Status and Prospects [J]. *Physica C*, 2003, 386: 424 - 430.
- [4] Malozemoff A P, Fleshler S, Rupich M, et al. Progress in High Temperature Superconductor Coated Conductors and Their Applications [J]. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 034 005.
- [5] Glowacki B A, Vickers M, Rutter N, et al. Texture Development

- in Long Lengths of NiFe Tapes for Superconducting Coated Conductor [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37: 157.
- [6] Usoskin A, Freyhardt H C, Issaev A, *et al.* Large Area YBCO-Coated Stainless Steel Tapes with High Critical Currents [J]. *IEEE Trans on Appl Supercon*, 2003, 13: 2 452 – 2 457.
- [7] Iijima Y, Kakimoto K, Sutoh Y, *et al.* Large Area YBCO-Coated Stainless Steel Tapes with High Critical Currents [J]. *Supercond Sci Technol*, 2004, 17: S264 – 269.
- [8] Denul J, Van Drissche I, De Gryse R, *et al.* Multi-Functional Flexible High Temperature Superconducting Tape [J]. *Inst Phys Conf Ser*, 2000, 167: 335.
- [9] Donet S, Weiss F, Chaudouet P, *et al.* Reel-to-Reel MOCVD for YBCO Coated Conductor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13: 2 524 – 2 527.
- [10] Rupich M W, Schoop U, Verebelyi D T, *et al.* YBCO Coated Conductors by an MOD/RABiTS™ Process [J]. *IEEE Trans on Appl Supercon*, 2003, 13: 2 458 – 2 461.
- [11] Izumi T, Honjo T, Tokunaga Y, *et al.* High- I_c YBCO Coated Conductors by Metal Organic Deposition Method Using Trifluoroacetates [J]. *IEEE Trans on Appl. Supercon.*, 2003, 13: 2 500 – 2 503.
- [12] Yuan F C, Xie Y Y, Chen J P, *et al.* Preparation of YBCO/Ag Superconducting Tapes with a High Current-Carrying Capacity by MOCVD Using a Single Solution Source from a Supersonic Atomizer [J]. *Supercond Sci Technol*, 1996, 9: 991 – 993.
- [13] Nemetschek R, Prusseit W, Holzapfel B, *et al.* Continuous Tape Coating by Thermal Evaporation [J]. *IEEE Trans on Appl Supercon*, 2003, 13: 2 477 – 2 480.
- [14] Mutlu I H, Celik E, Hascicek Y S, *et al.* High Temperature Insulation Coatings and Their Electrical Properties for HTS/LTS Conductors [J]. *Physica C*, 2002, 370: 113 – 124.
- [15] Baranauskas A, Jasaitis D, Kareiva A. Characterization of Sol-Gel Process in the Y-Ba-Cu-O Acetate-Tartrate System Using IR Spectroscopy [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2002, 28(2): 263 – 275.
- [16] Glowacki B A, Mouganie T. Ink-Jet Printing of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconducting Coatings on Silver Substrates for AC Conductor Applications [J]. *Proc EUCAS'03*: 1 884 – 1 890.
- [17] Mutlu I H, Aslanoglu Z, El-Kawmi M I, *et al.* YBCO Coated Conductor Development by Continuous Sol-Gel Process [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2002, 48: 589 – 594.
- [18] Kursumovic A, Cheng Y S, Tomov R I, *et al.* The Growth Modes and Transport Properties of YBaCuO Prepared by Batch and Continuous Liquid Phase Epitaxy [J]. *Ceramic Transactions*, 2003, 140: 147 – 156.
- [19] Kursumovic A, Tomov R I, Huhne R, *et al.* Hybrid Liquid Phase Epitaxy Processes for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Film Growth [J]. *Supercond Sci and Technol*, 2004, 17: 1 215 – 1 223.
- [20] Goyal A, Norton D P, Kroeger D M, *et al.* Conductors with Controlled Grain Boundaries: An Approach to the Next Generation, High Temperature Superconducting Wire [J]. *J Mater Res*, 1997, 12: 2 924 – 2 940.
- [21] Yamada Y. Liquid-Phase Epitaxy Processing of $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [J]. *Supercond Sci and Technol*, 2000, 13: 82 – 87.
- [22] Wang Xuehu (王学华), Xue Yiyu (薛亦渝). 薄膜制备新技术及其应用研究 [J]. *Vacuum Electric Technique* (真空电子技术), 2003(5): 65 – 70.
- [23] Yusuke Ichino, Yutaka Yoshida, Takuga Yoshimura, *et al.* Film Growth for Coated Conductor-Oriented $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Films by Means of Excimer and Nd: YAG Pulsed Laser Deposition [J]. *Physica C*, 2010, 470, 470: 1 003 – 1 004.
- [24] Yamada Y, Miyata S, Yoshizumi M, *et al.* Long IBAD-MgO and PLD Coated Conductor [J]. *Physica C*, 2009, 469: 1 298 – 1 302.
- [25] Sutoh Y, Miura M, Yoshizumi M, *et al.* Fabrication of High I_c Film for GdBCO Coated Conductor by Continuous in Plume PLD [J]. *Physica C*, 2009, 469: 1 307 – 1 310.
- [26] Nagaishi T, Shingai Y, Konishi M, *et al.* Development of REBCO Coated Conductors on Textured Metallic Substrates [J]. *physica C*, 2009, 469: 1 311 – 1 315.
- [27] Xu Y, Shi D, Goyal A, *et al.* $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Films Through a Fluorine Free TMAP MOD Approach [R]. *Oak Ridge National Laboratory Reports*, 2000.
- [28] Verebelyi D T, Schoop U, Thieme C, *et al.* Uniform Performance of Continuously Processed MOD-YBCO-Coated Conductors Using a Textured Ni-W Substrate [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2003, 16: L19 – L22.
- [29] Rupich M W, Schoop U, Verebelyi D T, *et al.* YBCO Coated Conductors by an MOD/RABiTS™ Process [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13: 2 458 – 2 461.
- [30] Li X, Rupich M W, Zhang W, *et al.* High Critical Current MOD Ex-Situ YBCO Films on RABiTS™ and MgO-IBAD Templates [J]. *Physica C*, 2003, 390: 249 – 253.
- [31] Izumi T, Yoshizumi M, Miura M, *et al.* Status and Strategy of Reel-to-Reel TFA-MOD Process for Coated Conductors [J]. *Physica C*, 2009, 469: 1 322 – 1 325.
- [32] Jin L H, Lua Y F, Yan W W, *et al.* Fabrication of $\text{Gd-Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Films by TFA-MOD Process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509: 3 353 – 3 356.
- [33] Larry L Hench. Sol-Gel Materials for Bioceramic Applications [J]. *Current Opinon in Solid State and Materials Science*, 1997, 10: 604 – 610.
- [34] Van Drissche I, Penneman G, De Meyer C, *et al.* The Influence of Sol-Gel Precursors and Substrate Type in the Spin Coating of CeO_2 thin Films [J], *Euro Ceramics VII, Pt 1 – 3*, 2002: 479 – 482.
- [35] Baranauskas A, Jasaitis D, Kareiva A. Characterization of Sol-Gel Process in the Y-Ba-Cu-O Acetate-Tartrate System Using IR

- Spectroscopy [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2002, 28: 263–275.
- [36] Kullberg M L, Lanagan M T, Wu W and R, *et al.* A Sol-Gel Method for Preparing Oriented $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ Films on Silver Substrates [J]. *Superconductor Science and Technology*, 1991 (4): 337–342.
- [37] Steger P L, Wang X Z. Fabrication of $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ from Tartrate Gel Precursors [J]. *Physica C*, 1993, 213: 433–437.
- [38] Fujihara S, Yoshida N, Kimura T. Preparation of 94 K-Superconducting $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ Without Post-Anneal in Oxygen [J]. *Physica C*, 1997, 276: 69–74.
- [39] Liu R S, Janes R, Benet M J *et al.* Synthesis of $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ at One Atmosphere Oxygen Pressure by the Modified Citrate Gel Process [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 57: 920–921.
- [40] Aoki A, Ohno S, Muramatsu Y. Preparation of YBaCu Oxide Precursor by the Citrate Gel Process [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, 147 & 148: 720–723.
- [41] Sheth A, Schmidt H, Lasrado V. Review and Evaluation of Methods for Application of Epitaxial Buffer and Superconductor Layers [J]. *Applied Superconductivity*, 1998 (6): 855–873.
- [42] Solovoyov V F, Wiesmann H J, Wu L J, *et al.* Ex-Situ Post-Deposition Processing for Large Area $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Films and Coated Tapes [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11: 2 939–2 942.
- [43] Dawley J T, Clem P G, Siegal M P, *et al.* Thick Sol-Gel Derived $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ Films [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11: 2 873–2 876.
- [44] Falter M, Demmler K, Hassler W, *et al.* Chemical Solution Deposition (CSD) of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Films and Oxide Buffer Layers by Dip Coating [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13: 2 751–2 754.
- [45] Liu X Z, Li Y R, Tao B W, *et al.* The Effect of Deposition Rate on the Microstructure of YBCO Thin Films Prepared by Inverted Cylindrical Magnetron Sputtering [J]. *Physica C*, 2002, 371: 133–138.
- [46] Selvamanickam V, Kesgin I, Guevara A, *et al.* Progress in Research and Development of IBAD-MOCVD Based Superconducting Wires [C]. *Applied Superconductivity Conference*, Washington: the Editorial Committee of This collected Works, 2010.
- [47] Scheel H J, Berkowski M, Chabot B. Problems in Epitaxial Growth of High- T_c Superconductors [J]. *J Crystal Growth*, 1991, 115: 19–30.

加拿大研究开发银纳米粒子水过滤技术

洪水、海啸以及地震等自然灾害后,由于干净水源遭到各种细菌污染,可能暴发肠炎、霍乱等流行疾病。加拿大麦吉尔大学的研究人员采用银纳米粒子开发出一种低成本、轻便的水过滤净化技术。研究人员认为,这种在普通吸水纸张上涂上银纳米粒子的水过滤技术,具有成本低、便携等优点,在用于灾区的应急净水方面具有非常大的潜在使用价值。相关文章发表在最新出版的《环境科学与技术》杂志上。

麦吉尔大学化学系教授德雷克·格雷介绍,银的净水作用可以追溯到古希腊和古罗马时期,当时的人们就使用银壶存放生活用水。尽管银在去除细菌上一直发挥着各种作用,比如应用在绷带、防细菌袜子上等,但迄今为止还未使用过银来对水进行净化。

格雷教授带领的研究小组在一张手掌大小的吸水纸上涂上 0.5 mm 的银纳米粒子,然后,他们将带菌的水渗透过这张吸水纸。在电子显微镜下可以看到纸上到处都分布着银色圆点。他们观察到,尽管带菌污水渗透过滤纸,但银纳米粒子仍然停留在吸水纸上。研究人员认为,实验的结果令人非常满意。吸水纸上只有非常少量的银纳米粒子,每克干燥的纸张上只涂有 5.9 mg 银,但这种银纳米粒子滤纸能够灭掉几乎全部的细菌,得到的水完全满足美国环境保护局制定的卫生标准。

研究人员表示,这种水过滤技术不能够用作日常的水净化系统,但可以作为应急状态下小规模水处理。在实验室里这种技术表现不错,但投入实际应用还需要做进一步的改进。该项研究工作得到了加拿大国家科学和工程委员会的资助。

(来源:科技时报)