

脉冲激光淀积高电流密度的 YBCO 超导带材*

王秋良 安承武 王又青 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 采用脉冲激光加辅助离子源的方法在长为 6.0 cm 的 NiCr 合金基带上制备 0.13 μm 厚的 Y-ZrO₂(YSZ) 隔离层,再用脉冲激光在 YSZ/NiCr 带上制备 1.5 μm 厚的 YBa₂Cu₃O_{7-x} 超导厚膜形成 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材。实验测得在 77K, 0 Tesla 下其临界电流密度为 $8.75 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 超导转变温度为 88.6 K。

关键词 YBCO 超导厚膜, YBCO 超导带材, 脉冲激光淀积

1 引 言

粉末管装法已被成功地应用于制备 Ba-Sr-Ca-Cu-O 和 Tl-Ba-Ca-Cu-O 超导带材(线材),但是用这种方法制备 YBCO 超导带材时其临界电流密度较低。基于脉冲激光(PLD)能用于制备高质量的 YBa₂Cu₃O_{7-x} 高温超导薄膜,其临界电流密度较其块材要高几个量级达到 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (77 K, 0 Tesla),我们采用脉冲激光淀积超导薄膜的工艺在有 YSZ 作为隔离层的 NiCr 合金基带上制备 YBa₂Cu₃O_{7-x} 超导带材,为了控制 YSZ 的取向,在用脉冲激光淀积 YSZ 隔离层时,采用辅助离子源辐照薄膜,其离子束的入射角相对于薄膜基面的法线方向的夹角为 54.7°,这样能够制备出 YSZ(100)取向的 YSZ 薄膜于 NiCr 合金基带上^[1-3],再用脉冲激光辐照 YBCO 超导靶材,在 YSZ/NiCr 合金上外延制备出高度 c 轴取向的 YBa₂Cu₃O_{7-x} 超导带材。

2 制备 YBCO 超导带材的工艺和测试

用于激光淀积 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材的真空系统示于图 1,辅助离子源以氩和氧的混合气体作为离子源,离子源的入射方向可以在 30~60°的范围内调节以控制在 YSZ 淀积时的 YSZ(100)的取向。因为 YSZ(111)方向和 YSZ(001)方向的夹角为 54.7°,所以用激光淀积 Y-ZrO₂ 时,我们调节辅助离子源的入射方向与基带平面的法线方向的夹角大约为 54.7°^[3]。准分子激光

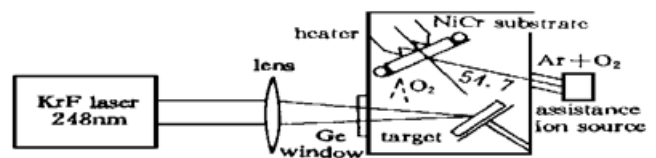


图 1 YBCO/YSN/NiCr 超导带材的激光淀积系统
Fig. 1 The system for producing the deposited YBCO/YSZ/NiCr type by pulsed laser

* 国家自然科学基金和激光技术国家重点实验室资助项目。

器工作气体为 KrF, 波长为 248 nm, 单脉冲输出的最大能量为 850 mJ, 脉冲宽度为 25 ns。重复工作频率可在 0~ 50 Hz 内可调。

NiCr 合金基带长 60 mm, 宽 5 mm, 厚 0.03 mm。采用颗粒较小($< 0.5 \sim 1 \mu\text{m}$)的金刚沙纸磨擦带材的表面, 再用酒精清洗基带的表面, 直到基带的表面为镜面为止。再将基带在丙酮液内用超声波清洗并用氮气吹干。

在淀积 YSZ 隔离层时, 激光束被聚焦在 $\phi 40 \times 6$ (mm) 的烧结的 $\text{ZrO}_2 + 10\% \text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷圆片表面, 其能量密度在 $1 \sim 4 \text{ J/cm}^2$ 。超导靶材以 10 rpm 旋转, NiCr 合金基带与超导靶材的间隔为 4 cm。基片采用红外(IR)灯加热到 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 。基片的温度以热电偶检测。在用激光淀积 YSZ 时辅助离子源的离子束的能量为 350 eV, 激光的能量密度为 3 J/cm^2 , 激光的重复频率为 10 Hz, 基带的温度为 680°C , 背景气压为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 淀积时间为 6 min, 在 YSZ 淀积时 NiCr 基带以 20 cm/h 的速度移动。YSZ 厚度为 $0.13 \mu\text{m}$ 。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 被淀积在 YSZ/NiCr 基带上, 基带的移动速度为 15 cm/h, 激光的能量密度为 2 J/cm^2 , 基带的温度为 600°C , 氧气的气压为 $26.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 基片与靶材之间间隔为 4 cm, 激光的重复频率为 10 Hz, 淀积时间为 25 min, 淀积结束后充入 $26.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的氧气并冷却到室温, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 的厚度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。表 1 列出了 YSZ 和 YBCO 的淀积参数。

表 1 YSZ 和 YBCO 的淀积参数

Table 1 Deposition conditions for YSZ and YBCO on NiCr alloy tape

deposition condition	$\text{ZrO}_2 + 10\% \text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
laser fluence	3 J/cm^2	2 J/cm^2
ambient gas	O_2	O_2
pressure	$1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	$26.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
substrate	NiCr	YSZ/NiCr
substrate temperature	680°C	600°C
repetition rate	10 Hz	10 Hz
deposition time	6 min	25 min
heater	IR	IR
in-situ treatment	cooled to room temperature	$26.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$

带材的超导特性采用四引线法测试, 为了避免电流引线的过热在 YBCO 超导带材的表面淀积一层 $6 \mu\text{m}$ 的 Ag 薄膜。为改善 Ag 和 YBCO 之间的接触电阻, 在常压下氧气中将超导带材进行退火 1.5 h。

3 结果和讨论

图 2 是 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材的 $R-T$ 转变曲线, YBCO 的超导临界温度 T_c 为 88.6 K, 其转变特性和 YBCO 超导薄膜淀积于晶格常数相匹配的单晶上较为相似, 这表明以 YSZ 作为 YBCO 和 NiCr 之间的隔离层能有效地阻挡金属向超导膜内的扩散。

图 3 示出了 YBCO/YSZ/NiCr 超导基带的 X 射线衍射图, 由图可见以辅助离子源控制的激光淀积的 YSZ 仅有(200)取向, 其它的取向消失, 而 YBCO 有高度的 c 轴取向。超导带材的临界电流密度的提高依赖于晶粒之间的弱连结的改善, 减少晶粒之间的弱连结能有效地提高

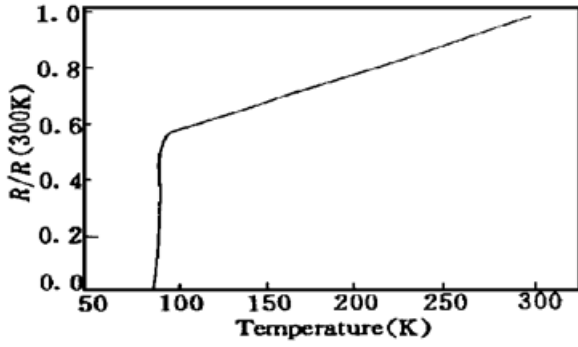


图 2 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材的 $R-T$ 特性曲线

Fig. 2 The $R-T$ characteristic curve of YBCO/YSZ/NiCr tape

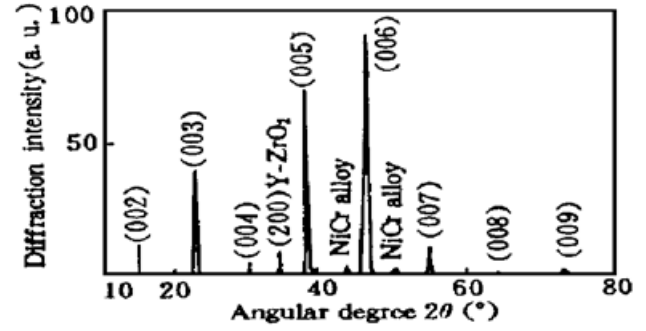


图 3 YBCO/YSZ/NiCr 超导基带的 X 射线衍射图

Fig. 3 The X-ray diffraction pattern of a YBCO thin film deposited on YSZ/NiCr tape

超导带材在磁场中的载流能力,即提高临界电流密度。Dimos 等人研究了临界电流密度与晶界之间失配角的关系,发现当晶界之间失配角小于 $\pm 5^\circ$ 时,超导弱连结能得到较大的改善,因而极大地提高超导带材的临界电流密度^[4]。为此我们研究了采用这种工艺淀积的 YBCO 超导带材的弱连结特性,测量了 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材的临界电流密度随磁场的变化,即 $B-J$ 曲线(如图 4 所示)。磁场自 0 Tesla—5 Tesla—0 Tesla 变化,其电流密度在低磁场下表现出不可逆效应,这表明带材在低磁场下存在临界电流密度的历史效应^[5]。当磁场超过 1 Tesla 以上时,对于磁场垂直于 c 轴的电流密度对磁场不敏感,即通过激光淀积 YBCO 于有辅助离子源控制制备的 YSZ 隔离层的 NiCr 基带上,晶粒之间的弱连结能得到较大的改善,晶界之间的失配角大部分在几度以下。随着磁场的增加,磁场平行于 c 轴的电流密度较垂直于 c 轴时的电流密度要减小得快,而且在零场,77 K 下的电流密度为 $8.75 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。YBCO/YSZ/NiCr 超导带材在 0 T 下的临界电流密度随温度的变化于图 5 所示。随着温度的升高 YBCO 超导带材的临界电流密度在快速减小。

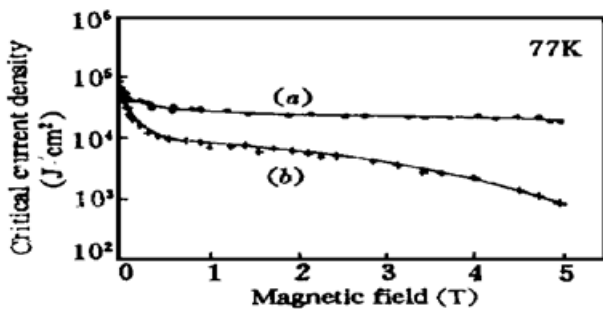


图 4 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材的临界电流密度随磁场的变化

(a) 磁场 B 垂直于 c 轴;(b) 磁场 B 平行于 c 轴

Fig. 4 Critical current density as a function of magnetic field for YBCO/YSZ/NiCr tape

(a) magnetic field B perpendicular to c axis;
(b) magnetic field B parallel to c axis

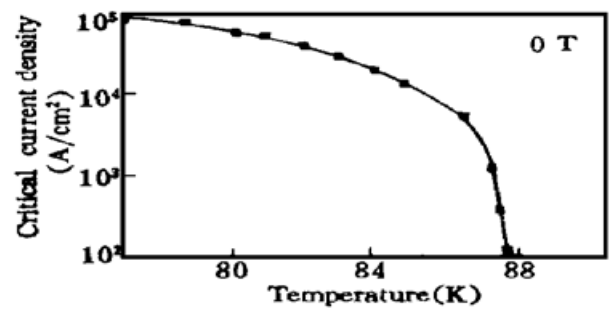


图 5 YBCO/YSZ/NiCr 超导带材在 0 T 下的临界电流密度随温度的变化

Fig. 5 Critical current density as a function of temperature for YBCO/YSZ/NiCr tape in the 0 T magnetic field

参 考 文 献

- 1 M. E. Harper, J. J. Cuomo, R. J. Gambino *et al.*. Beam modification of materials 1. Elsevier Now York, 1984, 127
- 2 Y. Ijima, N. Tanabe, O. Kohno *et al.*. In-plane aligned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 769
- 3 X. D. Wu, S. R. Foltyn *et al.*. Properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thick films on flexible buffered metallic substrate. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**: 2397
- 4 D. Demos, P. Chaudhari, J. Mannhart. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**: 219
- 5 T. Matsushita, B. Ni, E. S. Otabe. Irreversibility lines in oxide and metallic superconductors. *Supercond. Sci. & Technol.*, 1992, **5**: 73

Deposition of a High Current Density YBCO Thick Film on NiCr Alloy Substrate Tape by Pulsed Laser

Wang Qiuliang An Chengwu Wang Youqing Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The buffered layer Y-ZrO₂(YSZ) was deposited on the flexible metallic NiCr substrate tape of 6.0 cm in length by a KrF laser and ion-beam-assisted deposition (IBAD), and then YBCO superconducting thick films were deposited on the YSZ/NiCr in order to obtain a high current density YBCO superconducting tape for power applications. The thickness of 1.5 μm and 0.13 μm is for the YBCO and the YSZ, respectively. The critical current density of YBCO/YSZ/NiCr is 8.75×10^4 A/cm² at 77 K, 0 Tesla, the critical temperature is 88.6 K.

Key words YBCO superconducting thick film, YBCO superconducting tape, pulsed laser deposition