

不锈钢基底高电流密度 YBCO 超导线材*

黄新堂^{1,2} 王又青¹ 陈清明¹ 徐启阳¹

(¹ 华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074; ² 华中师范大学物理系 武汉 430079)

摘要 室温下应用 Ar⁺ 离子源辅助准分子脉冲激光沉积(002)取向的 YSZ(Yttria-stabilized zirconia) 过渡层薄膜于不锈钢基底上; 基底加温至 750℃, 用准分子脉冲激光沉积高电流密度 YBCO(YBa₂Cu₃O_{7-x}) 高温超导线材。实验结果表明: YBCO 超导线材临界温度 $T_c \geq 90$ K ($R = 0$), 临界电流密度 $J_c \geq 1 \times 10^6$ A/cm² (77 K, 0 T)。

关键词 高电流密度 YBCO 线材, 激光沉积法, 离子束辅助, 不锈钢基底

1 引 言

为电力和能量存储方面的应用, 通常在合金基底或不锈钢基底上淀积 YBCO 超导薄膜, 它们具有如下优点: (1) 基底材料廉价; (2) 超导线材的柔软性能良好, 可以根据需要弯曲成一定的形状; (3) 基底材料的热膨胀性质与 YBCO 材料基本一致; (4) 根据目前在这方面的研究进展, 合金基底或不锈钢基底上能够沉积出 *c*-轴取向和 *a-b* 平面织构的高电流密度高温超导薄膜 ($J_c \geq 1 \times 10^6$ A/cm² (77 K, 0 T), $T_c \geq 90$ K ($R = 0$)), 这一结果比目前用粉末管状法制备的高温超导线材要高出一个量级^[1,2]; (5) 薄膜连续性和均匀性都较好。另外, 虽然 YBCO 超导材料的超导转变温度 (~ 90 K) 相对其他系高温超导体如 Bi 系, Tl 系等要低些, 但它的优点在于有能力在 77 K 下, 1 T 的外磁场中工作而不失超, 保持其无阻载流能力^[3]。

关于在合金基底或不锈钢基底上淀积 YBCO 超导薄膜近来已有许多研究工作^[4-7]。我们通过研制改造已有的激光沉积高温超导薄膜系统, 并且在提高高温超导薄膜质量方面取得了较大的进展^[8]。本文在研究制备 YSZ 过渡层时, 在不锈钢基底上仅使用了 Ar⁺ 离子束作为辅助, 并且在离子束路径上加了中和电极。YSZ 和 YBCO 薄膜均应用准分子脉冲激光沉积。

2 实验条件

辅助离子源工作气体为 Ar 气, 离子束的入射方向与基片法线方向的夹角可以根据需要调节, 以控制离子束辅助沉积薄膜的晶粒取向。因为对于不同材料的薄膜和不同需要的薄膜晶粒取向, 辅助离子束的入射方向有重要作用^[9]。为了在合金基底上使用 YSZ 过渡层沉积织构的高电流密度 YBCO 超导薄膜, YSZ 过渡层的沉积需要以离子源辅助, 并且根据 YSZ 的晶体

* 国家自然科学基金资助项目(59602004)。

收稿日期: 1999-03-26; 收到修改稿日期: 1999-05-13

结构,离子束的入射方向与基片法线方向的夹角应为 54.7° ,才能实现增强 YSZ(002) 峰和抑制其他取向晶粒生长的目的^[4-7],从而有利于制备高电流密度的 YBCO 超导薄膜。准分子脉冲激光器工作气体为 XeCl,输出波长为 308 nm,输出频率在 2~50 Hz 连续可调,输出激光脉冲宽度为 28 ns,单脉冲激光输出最大能量为 400 mJ。准分子激光束用旋转的石英透镜聚焦,聚焦后激光能量密度可达 $2\sim 3\text{ J/cm}^2$ 。基底与靶间距离调节在 4 cm,采用碘钨灯加热基片,用 Raynger 一型红外温度测量仪校准后的镍铬-镍硅热电偶测量和控制基片温度。不锈钢基片采用 $\phi 30\text{ mm}$ 的圆盘。首先采用 $0.5\ \mu\text{m}$ 的金刚石喷雾研磨剂抛光基片表面,再用去离子水-乙醇-丙酮分别在超声清洗机中清洗,最后用氮气吹干放进真空室使用。

YSZ 陶瓷靶材,其 X 射线衍射(XRD)图见图 1(a)。YSZ 采用激光在室温下 Ar^+ 离子源辅助沉积,离子束加速电压 200 V,离子源灯丝电流 6 A,调节离子束辅助沉积方向与基片法线方向成 54.7° 角,并且在离子束路径上加中和灯丝,以使部分离子束还原为原子束。真空室本底气压为 $3\times 10^{-3}\text{ Pa}$,加离子源后真空室气压为 $5\times 10^{-2}\text{ Pa}$ 。激光输出频率为 12 Hz,输出激光束聚焦后能量密度为 3 J/cm^2 ,沉积时间 80 min。膜厚用 6JA 干涉显微镜测量。YBCO 靶材采用自制的圆形靶材,其 XRD 图见图 1(b)。YBCO 薄膜沉积在 YSZ/不锈钢基底上。沉积条件为:激光输出频率 10 Hz,能量密度 3 J/cm^2 ,测得 YBCO 薄膜的厚度为 $0.6\ \mu\text{m}$,沉积薄膜时 O_2 气氛压为 25 Pa,基片温度 750°C 。YBCO 超导薄膜临界温度和 $I-V$ 特性曲线采用四端引线法测量。

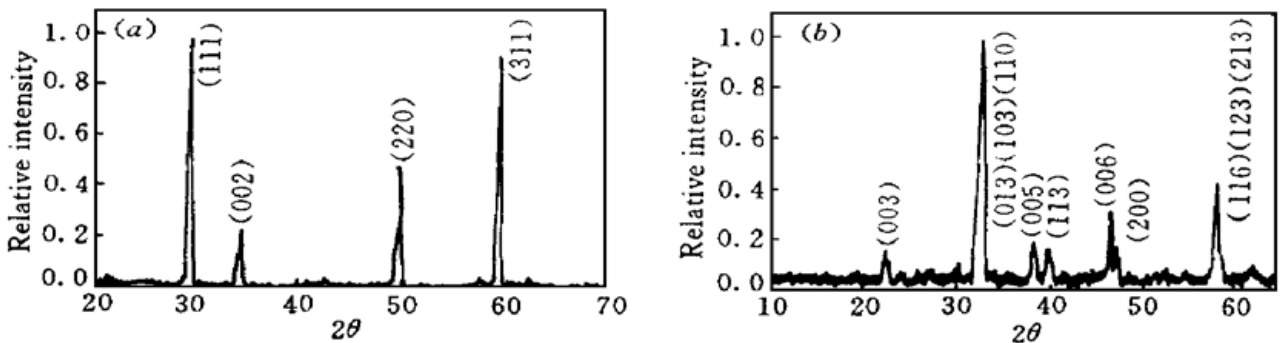


图 1 YSZ 靶材(a)和 YBCO 靶材(b)的 XRD 图

Fig.1 The XRD of YSZ block (a) and YBCO block (b)

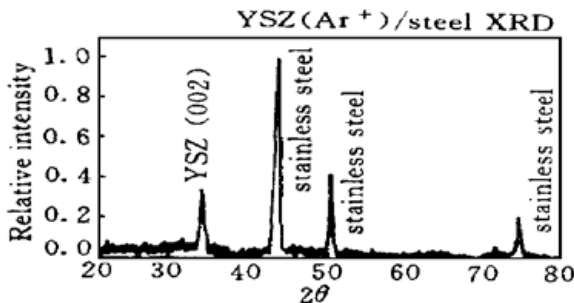


图 2 室温下沉积的 YSZ XRD

Fig.2 The XRD of YSZ/steel at room temperature

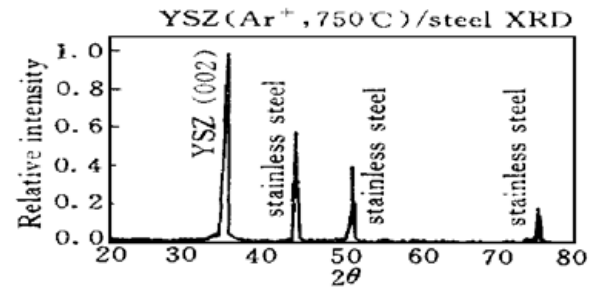


图 3 750°C 退火后的 YSZ 的 XRD

Fig.3 The XRD of YSZ/steel annealed at 750°C

3 实验结果和讨论

根据以上实验条件沉积的 YSZ 过渡层薄膜的 XRD 图见图 2。从图中可以看出,在 Ar^+ 离子源辅助沉积下,YSZ 薄膜的(002) 峰比没有离子源辅助沉积的明显增强^[5],并且没有其他任

何杂相的衍射峰出现。图 3 是 YSZ 薄膜在 750℃退火处理后的 XRD 图。这时 YSZ(002) 峰已大大超过不锈钢基片的衍射峰。这里我们将 YSZ 层制作得较厚(沉积时间 80 min, 测得其厚度为 5.5 μm), 主要原因是根据 N. Sonnenberg 等关于离子源辅助沉积 YSZ 薄膜的生长模型^[10], YSZ 薄膜越厚, 在离子源辅助沉积下生长层的微观结构将使得 YSZ 晶粒的[111]方向更倾向于离子束辅助方向。因此对于厚的 YSZ 薄膜就使得其 *c*-轴取向(002) 和 *a-b* 平面织构增强。这将有利于在其面上生长出高电流密度的 YBCO 薄膜。

YBCO 超导薄膜的沉积在 750℃温度下完成。因此 YSZ 层在退火前可以直接用来沉积高电流密度 YBCO 超导薄膜。YBCO 超导薄膜 XRD 图见图 4。从图中明显看出 YBCO 薄膜为 *c*-轴取向, 并且其衍射峰明显高于 YSZ 和不锈钢基片的衍射峰。这一结果与文献[5]完全一致。YBCO 薄膜的临界电流密度采用 10 mm × 0.20 mm × 0.60 μm 的超导线测量(目前我们已经能够用激光刻蚀出 1 m 以上的 YBCO 高温超导线材), 测得其临界温度 $T_c = 91\text{ K}$ ($R = 0$), 其 *I-V* 特性曲线结果见图 5, 在 77 K, 无外磁场条件下, 测得 $I_c = 1.4\text{ A}$ (电压采用 KEITHLEY 纳伏表测量)。计算得 $J_c = 1.2 \times 10^6\text{ A/cm}^2$ (77 K, 0 T)。这一结果比没有离子源辅助沉积 YSZ 过渡层的结果高出两个量级^[5]。现将本文的实验结果与文献[4~ 7]的结果比较见表 1。

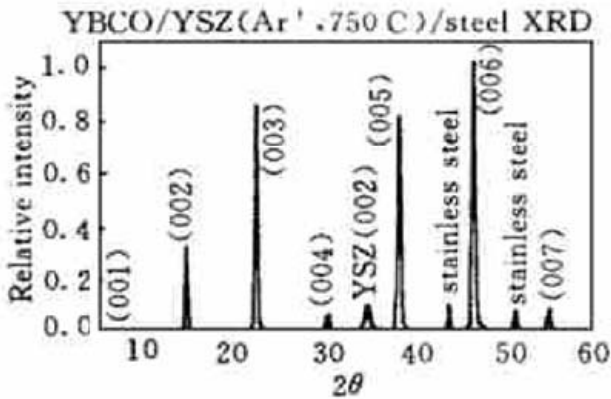


图 4 YBCO 超导线材的 XRD

Fig. 4 The XRD of YBCO/YSZ/steel tape

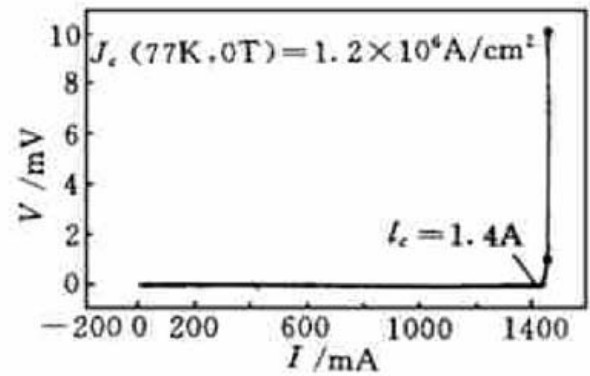


图 5 YBCO 线材的 *I-V* 曲线

Fig. 5 The *I-V* curve of YBCO/YSZ/steel tape

表 1 本文结果与已有结果的比较

Table 1 Comparison of the results in the present paper and those reported in the literature

Authors	[4]	[5]	[6]	[7]	Present paper
Substrate	Hastelloy c-276	Haynes alloy No. 230	Hastelloy c-276	Stainless steel	Stainless steel
YSZ	Ar ⁺ ion beam sputtering + (O ⁺ + Ar ⁺) ion source assistance	Excimer laser (λ = 248 nm) + Ar ⁺ ion source assistance	Ar ⁺ ion beam sputtering + (Ar ⁺) ion source assistance	Ar ⁺ ion beam sputtering + (O ⁺ + Ar ⁺) ion source assistance	Excimer laser (λ = 308 nm) + Ar ⁺ ion source
YBCO	Excimer laser (λ = 193 nm) + O ₂	Excimer laser (λ = 248 nm) + O ₂	Excimer laser (λ = 308 nm) + O ₂	Excimer laser + (O ₂ + Ar)	Excimer laser (λ = 308 nm) + O ₂
T_c /K ($R = 0$)	≥90 K	92 K	≥90 K	≥90 K	91 K
J_c /A/cm ² (77 K, 0 T)	2.5×10^5	6×10^5	8×10^5	1.3×10^6	1.2×10^6

比较表 1 结果可以看出,在不锈钢基底上,YSZ 过渡层和 YBCO 均应用准分子脉冲激光沉积,而且仅使用了 Ar^+ 离子束作为制备 YSZ 过渡层的辅助离子源,同样可制备出临界温度 $\geq 90 \text{ K}$ ($R = 0$),临界电流密度 $J_c \geq 1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (77 K, 0 T) 的高电流密度超导薄膜。

参 考 文 献

- 1 C. Zhang, Y. Z. Wang, D. C. Zeng *et al.*. Mechanism of texture formation during heat-treatment process in Ag-sheathed Bi-2223 tapes. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(10): 8112~ 8114
- 2 G. Xu, Y. Sun, J. Du *et al.*. In-plane and out-of-plane dissipation in *c*-axis-oriented (Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x silver-sheathed tapes. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(3): 1331~ 1334
- 3 X. D. Wu, S. R. Foltyn, P. N. Arendt *et al.*. Properties of YBa₂Cu₃O_{7- δ} thick films on flexible buffered metallic substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(16): 2397~ 2399
- 4 Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno *et al.*. In-plane aligned YBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films deposited on polycrystalline metallic substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(6): 769~ 771
- 5 R. P. Reade, P. Berdahl, R. E. Russo. Laser deposition of biaxially textured yttria-stabilized zirconia buffer layers on polycrystalline metallic alloys for high critical current Y-Ba-Cu-O thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(18): 2231~ 2233
- 6 X. D. Wu, S. R. Foltyn, P. Arendt *et al.*. High current YBa₂Cu₃O_{7- δ} thick films on flexible nickel substrates with textured buffer layers. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(15): 1961~ 1963
- 7 A. Knierim, R. Auer, J. Geerk *et al.*. High critical current densities of YBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films on buffered technical substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(5): 661~ 663
- 8 Q. L. Wang, C. W. An, Y. Q. Wang. Deposition of a high current density YBCO thick film on NiCr alloy substrate tape by pulsed laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(9): 853~ 856 (in Chinese)
- 9 D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart *et al.*. Orientation dependence of grain-boundary critical currents in YBa₂Cu₃O_{7- δ} bicrystals. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(2): 219~ 222
- 10 N. Sonnenberg, A. S. Longo, M. J. Cima *et al.*. Preparation of biaxially alligned cubic zirconia films on pyrex glass substrates using ion-beam assisted deposition. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(2): 1027~ 1034

High Current Density YBCO Superconducting Tape on Stainless Steel Substrates

Huang Xintang^{1,2} Wang Youqing¹ Chen Qingming¹ Xu Qiyang¹

¹National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074
²Department of Physics, Central China Normal University, Wuhan 430079

Abstract The (002) directional Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) buffered layer film was deposited on the stainless steel substrate with the Ar^+ ion beam assistance at room temperature, and then the YBa₂Cu₃O_{7- δ} (YBCO) film was deposited on the YSZ/stainless steel substrate at 750°C by pulsed laser ablation. The experimental results show that the critical temperature and the critical current density of the YBCO superconducting film are 91 K ($R = 0$) and $1.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (77 K, 0 T) respectively.

Key words high current density YBCO tape, pulsed laser deposition, ion beam assistance, stainless steel substrate