

磁控共溅射制备 YbCu 及 YbCuAl 非晶合金薄膜

崔红兵, 张茂彩, 王 誉, 辛 博

(包头稀土研究院 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古 包头 014030)

摘 要: 基于高通量材料基因工程, 通过倾斜靶和调控单金属靶功率制备了化学组成连续变化的镱-铜 (Yb-Cu) 非晶合金金属薄膜, 从而快速筛选出非晶形成范围, 并且成功制备出 YbCu 非晶合金薄膜, 同时研究了铝对 YbCu 非晶合金形成的影响, 并制备了 YbCuAl 非晶薄膜。当 Yb 含量在 44.5%~46.5% (质量分数) 时薄膜全部为非晶态。原子力扫描 (AFM) 结果表明 YbCu 非晶合金表面光滑无缺陷, 高度绝对差仅为 31.6 nm, 薄膜呈现疏水性, 最大疏水角为 119°。YbCu 和 YbCuAl 非晶薄膜最大方阻分别为 551 和 1738 mΩ·□⁻¹, 合金元素 Al 对 YbCu 非晶薄膜性能产生了显著影响。YbCu (Al) 非晶薄膜的成分筛选和制备加快了稀土基非晶新材料的开发。

关键词: 非晶合金薄膜; 玻璃形成能力; YbCu 合金; 磁控溅射; 高通量制备

中图分类号: TB43

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-1040-07

非晶合金独特的原子排列使其表现出丰富的物理现象和优异性能, 在通信、医疗、航空航天等领域有广泛的应用潜力^[1-3]。然而 Zr 基^[4]、Al 基^[5]和 Fe 基^[6]等非晶合金苛刻的制备条件及脆性严重影响了非晶材料的产业化应用和推广, 因此开发新的体系和工艺是解决限制非晶合金产业发展的关键^[7-10]。传统的非晶合金具有高强度, 高硬度和高弹性极限, 一般被认为是硬脆性材料, 相应的, 如果能得到具有软力学性能的非晶合金也具有重要意义。稀土元素独特的性能与非晶态合金的结合将诞生新的具有特殊性能的合金材料^[11], 如 Gd 基非晶良好的磁热效应, La 基非晶中显著的 β 弛豫和低温超塑性。因此探索稀土基非晶材料特殊性能对应的机理对于改善现有非晶合金塑性成型和开发新的功能材料具有重要的借鉴意义。

目前除 La/Ce 基^[12,13]、Gd 基^[14-16]非晶外, 其余稀土基非晶合金的研究较为缺乏。重稀土镱 (Yb) 相比其他的稀土元素具有较大的原子半径和低的弹性模量, 特殊的电子结构 (4f 电子满层) 在特高压等极端条件下容易发生多晶态相变和 4f-5d 电子塌陷引起的电子相变^[17]。此外, 稀土 Yb 也存在类似 Ce^[18]的 α 与 β 相转变过程, 晶态 YbCuAl (Fe₂P 型六方晶体结构) 已经证明为重费米子化合物, 其电子结构会随着压力和温度发生变化^[19]。但是 Yb 蒸气压较大, 在熔炼时容易挥发而引起成分偏析, 目

前只有 Yb₆₄Zn₂₀Mg₁₅Cu₁ 等较少的 Yb 基金属玻璃的报道, 其具有比 Ce 基非晶更加低的模量、硬度和玻璃转变温度 T_g , 而 Yb 与常见过渡族元素 (如 Cu、Al 等) 是否能够形成金属玻璃目前仍然不得而知。Yb 作为低弹性模量和低熔点的重稀土元素, 特殊的 4f 电子排布是开发软力学非晶材料和探索奇异物理现象的绝佳选择。因此, 本研究基于高通量磁控共溅射筛选并成功制备出 YbCu 非晶和 YbCuAl 非晶合金薄膜, 并研究了其对应的性能。

1 实 验

使用 MSP-300BT 磁控溅射设备进行镱铜 (铝) 非晶薄膜的镀膜试验, 靶材为纯度 99.99% 的 Yb 靶、Cu 及 CuAl 组合靶, 靶材直径 60 mm, 厚度 6 mm。玻璃基片镀膜前依次在丙酮、无水乙醇和去离子水中超声清洗 30 min, 清洗后用压缩空气吹扫直到彻底干燥。溅射镀膜时以氩气 (纯度 99.999%) 为工作气体。镀膜前将腔体本底真空度抽至小于 3×10^{-4} Pa, 关闭靶屏蔽罩, 通入工作气体预溅射 10 min, 以清除靶材表面杂质。预溅射完成后, 打开屏蔽罩开始镀膜。镀膜靶基距为 9.0 cm、在不同溅射功率下镀膜 60 min、Ar 气流量 30 mL/min、溅射气压 0.6 Pa、基片偏压 30 V, 其中 Yb 靶和 Cu 靶分别为射频和直流镀膜模式。3 组实验编号分别为 A、B 和 C, 其中 A 组 Yb: 100 W, Cu: 150 W; B 组 Yb: 150 W, Cu: 150 W 和 C 组 Yb: 250 W,

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室自主课题 (2020Z2135)

作者简介: 崔红兵, 男, 1992 年生, 硕士, 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030, E-mail: 18810962502@163.com

Cu: 150 W。YbCuAl 非晶薄膜制备过程中 Yb 靶采用直流溅射模式, CuAl 组合靶材为射频模式, 功率参数如下, A3: Yb 50 W, CuAl 200 W; A4: Yb 100 W, CuAl 100 W; A8: Yb 150 W, CuAl 100 W。其余参数与 YbCu 溅射参数相同。

采用掠入 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析所制备金属薄膜, 设备型号为 Bruker D 8 Advance, 测试角度范围 20°~80°, 扫速 5 %/min, 掠入射角度固定为 3°。奥林巴斯公司产 Vanta 系列 XRF 分析仪(型号 F2-5000)进行薄膜组成分析。蔡司热场发射电镜(Merlin compact)观测非晶薄膜形貌。采用探针科技公司 RTS-11 型金属四探针测试仪测试合金薄膜的方阻。采用多功能材料表面性能测试仪测试膜厚度, 仪器型号为兰州华汇 MFT-4000。光学接触角仪测试 Zr 基非晶薄膜亲疏水性能, 仪器型号为深圳致佳 ZJ-7000。德国 Bruker 公司原子力扫描电镜(AFM)(型号 Dimension edge)进行薄膜形貌表征, 测试模式为峰值力(peak force tapping)模式。

2 结果与讨论

2.1 YbCu(Al)非晶薄膜成分设计

图 1a 为 Yb-Cu 二元系合金相图。富 Cu 区(Cu 90%, 原子分数)和富 Yb 区(Yb 73.5%, 原子分数)均有共晶反应, 表明 YbCu 合金在不同成分范围可能形成非晶合金。根据判断合金系玻璃形成能力(GFA)的判断之一约化玻璃转变温度($T_{rg}=T_g/T_1$)可知, 共晶点

处合金液相线温度 T_1 最小, 而玻璃转化温度 T_g 随成分的变化较小, 因此 T_{rg} 最大, 意味着具有最佳的 GFA, 如 Zr-Cu、Au-Si 和 Pd-Si 等二元合金在共晶点附近具有较好的 GFA。这主要与共晶点附近合金熔体中含有高浓度的短程有序结构(short-range ordered structure, SRO)有关, 此时合金系熔体具有更高的黏度和自由体积, 能够显著抑制结晶时原子的扩散行为。

图 1b 和 1c 分别为稀土 Yb、Cu 和 Al 原子半径、半径比及混合焓 ΔH_{mix} 。三元素之间最大混合焓为 Yb-Al (-20 kJ mol^{-1}), 最小 Cu-Al (-1 kJ mol^{-1}), Yb 具有最大的原子半径, 与 Cu 原子半径比为 1.5275。Al 与 Yb、Cu 有合适的混合焓和较小的原子半径, 因此可以显著提高 Zr 基、Cu 基等合金系的非晶形成能力。根据 Inoue 三原则及混淆原理, Yb-Cu 及 Yb-Cu-Al 元素间混合焓和原子半径比说明该体系元素间具有较强的相互作用和混乱度, 组元之间不会产生稳定的晶体竞争相, 从而便于形成非晶结构。

图 2a 为 YbCu 非晶合金薄膜溅射过程图, 靶材基座倾斜一定角度。图 2b 为制备的 YbCu 非晶合金薄膜。由于载玻片左侧背面为毛玻璃, 因此与其余部位色泽存在较大的区别。不同位置的 YbCu 金属薄膜存在色泽差异, 这是因为两靶材表面到基片的距离不同, 导致对应的薄膜化学组成及微观结构存在区别, 而薄膜色泽差异是微观化学组成及结构差异的宏观反映。图 2c 为 CuAl 组合靶材的制备流程示意图。在溅射环所在区

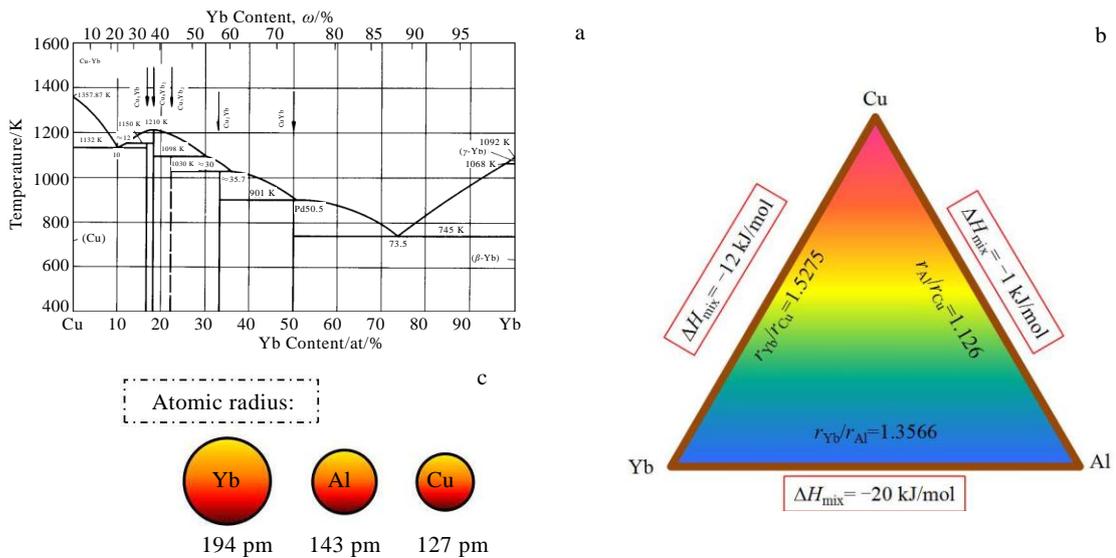


图 1 Yb-Cu 合金相图, Yb-Cu-Al 混合焓, 原子半径比及 Yb、Al、Cu 原子半径

Fig.1 Phase diagram of Yb-Cu alloy (a); mixing enthalpy and atomic radius ratio of Yb-Cu-Al (b); atomic radius of Yb, Al and Cu (c)

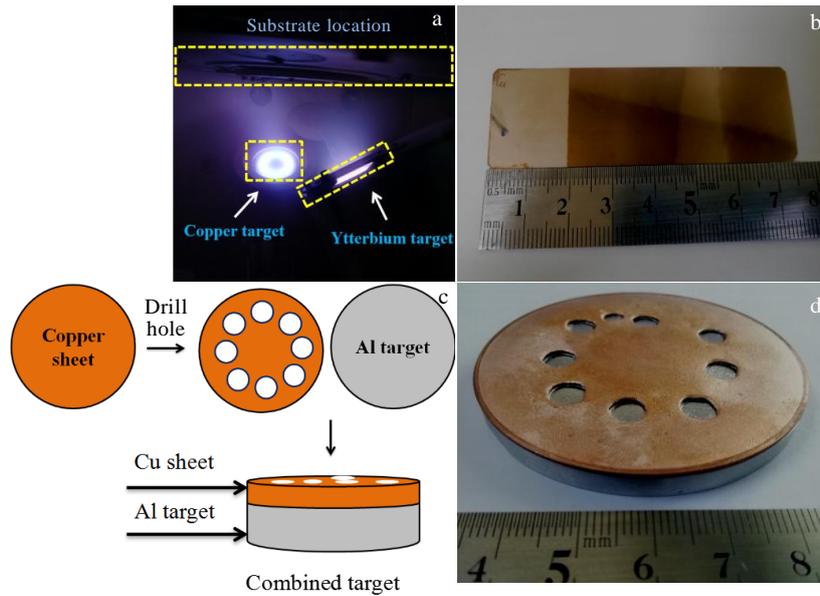


图 2 共溅射制备 YbCu 非晶合金薄膜、YbCu 非晶合金薄膜、CuAl 组合靶制备流程及 CuAl 组合靶实物图

Fig.2 Process of Yb-Cu amorphous alloy films prepared by co-sputtering (a), Yb-Cu amorphous alloy films (b), preparation process of CuAl target (c), and physical picture of CuAl combined target (d)

域加工出直径为 5 mm 的圆，叠加到 Al 靶表面，用压环固定在靶座进行共溅射。图 2d 为 CuAl 组合靶材的数码实物图，铜片表面孔所在区域为溅射环位置。

2.2 YbCu 非晶合金薄膜厚度及物相分析

图 3 为 YbCu 非晶合金薄膜厚度及相关示意图。由图 3a 可知，沿着载玻片方向（长度为 7.5 cm）薄膜厚度近似呈现字母“M”形，即中间和边缘厚度较薄，而离中央区域较远处厚度最大。图中 3 条膜厚曲线由于 Yb、Cu 靶材功率不同也存在差异，这是由共溅射过程中靶位、基片特殊布置和原子迁移路径不同等因素共同引起的。如图 3b 所示，由于基片固定，倾斜的金属靶表面原子迁移到基片不同地方的距离不同，且靶材原子半径也存在显著差异。对于单个金属靶，如图 3c 所示，原子离化后形成的等离子体到基片两端的距离不同，即 S_1 和 S_2 不同，因此，即使能量相同的原子在真空环境下的自由程也存在差异，外加共溅射原子间的碰撞、键合和吸附会改变原子级原子团的迁移方向（如图 3d 所示），最后不同能量原子间作用后沉积到基片表面的数目也不同，从而形成如图 3a 所示的厚度分布特征。

图 4 为不同功率 Yb、Cu 靶共溅射制备合金薄膜的 XRD 图谱及成分分布，其中样品 1 到 4、5 到 8 和 9 到 12 对应不同功率下 Cu 靶到 Yb 位置变化，从图 4a1~4c1) 元素分布可知，两者在基片方向的浓度分布很好地满足

线性关系，即在溅射方向上元素呈现梯度分布。固定 Cu 靶 150 W 不变，当 Yb 靶功率为 100 W 时，在 Yb、Cu 靶中间位置（图 4a 中样品 1、2 和 3）只有 1 个弥散的衍射峰，表明薄膜为完全的非晶态，而靠近 Yb 靶的 4 号样品，完全由晶态物质 $\text{Cu}_{23}\text{Yb}_6$ (PDF# 37-1134) 和 $\text{YbCu}_{6.5}$ (PDF# 25-0321) 组成。由图 4a1 两原子分布可知，当 Yb 浓度小于 46.5% 时，此时全部为非晶态；Yb 浓度处于 46.5%~55.1% 时非晶基体中析出 $\text{YbCu}_{6.5}$ 晶体；当 Yb 浓度超过 55.1% 时全部为晶体相。增加 Yb 靶功率到 150 W 时，只有靠近 Cu 靶位置（5 号样）出现完全的非晶衍射峰，对应 Yb 浓度小于 44.5%。随着基片位置靠近 Yb 靶（6 号和 7 号样），合金薄膜除非晶峰外还出现晶体 $\text{Cu}_{23}\text{Yb}_6$ 和 $\text{YbCu}_{6.5}$ 衍射峰，对应 Yb 浓度区间 44.5%~62.1%（图 4b1），说明此时对应金属膜层为非晶和晶体构成的复合材料，而靠近 Yb 靶侧的样品（8 号样）完全为 $\text{Cu}_{23}\text{Yb}_6$ 和 $\text{YbCu}_{6.5}$ 晶体的衍射峰。继续增加 Yb 靶功率到 250 W 时，靠近 Cu 靶的 9 号样品为非晶和晶体混合衍射峰，对应 Yb 浓度小于 58.3%（图 4c1），其余样品均为晶体峰。特别地，12 号样品衍射图谱全部为 bcc (110) 晶面的衍射峰。上述结果说明，当 Yb 浓度在 44.5%~46.5% 时薄膜全部为非晶态；当 44.5%<Yb<62.1% 时为非晶和晶体混合相，而 Yb>55.1%~62.1% 时全部为晶体相。实验通过 3 组样品较为准确地确定了 Yb-Cu 二元系非晶相的形成区间。

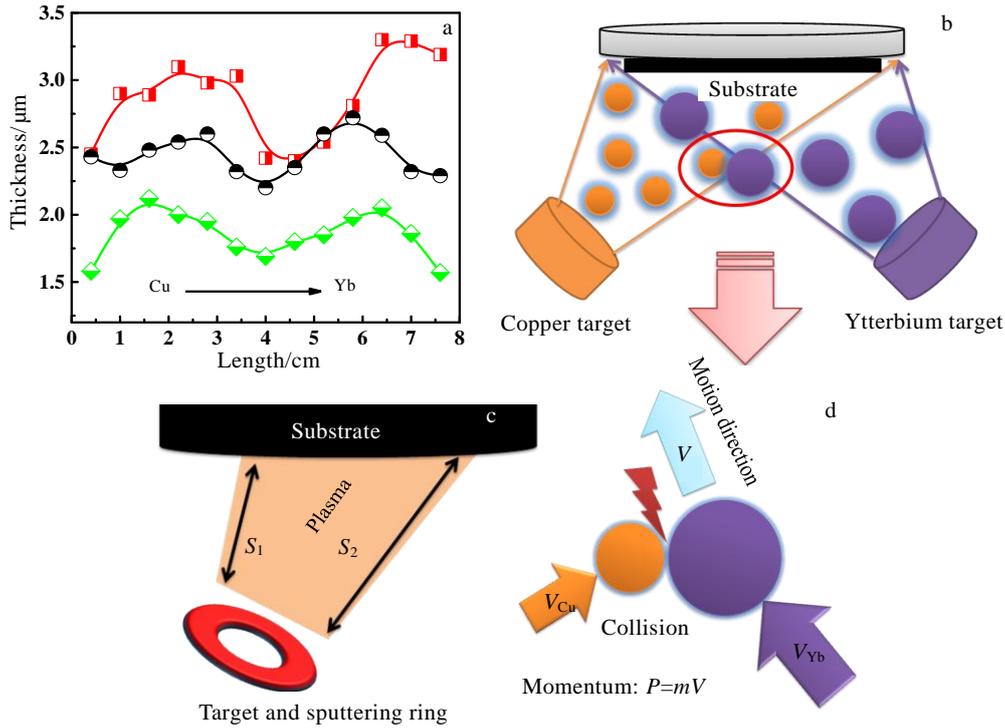


图 3 Yb-Cu 非晶合金薄膜厚度, 共溅射非晶合金薄膜示意图和 Yb、Cu 原子碰撞过程

Fig.3 Thickness of Yb-Cu amorphous alloy film (a), schematic diagram of co-sputtered amorphous alloy film (b, c), and collision process of Yb and Cu atoms (d)

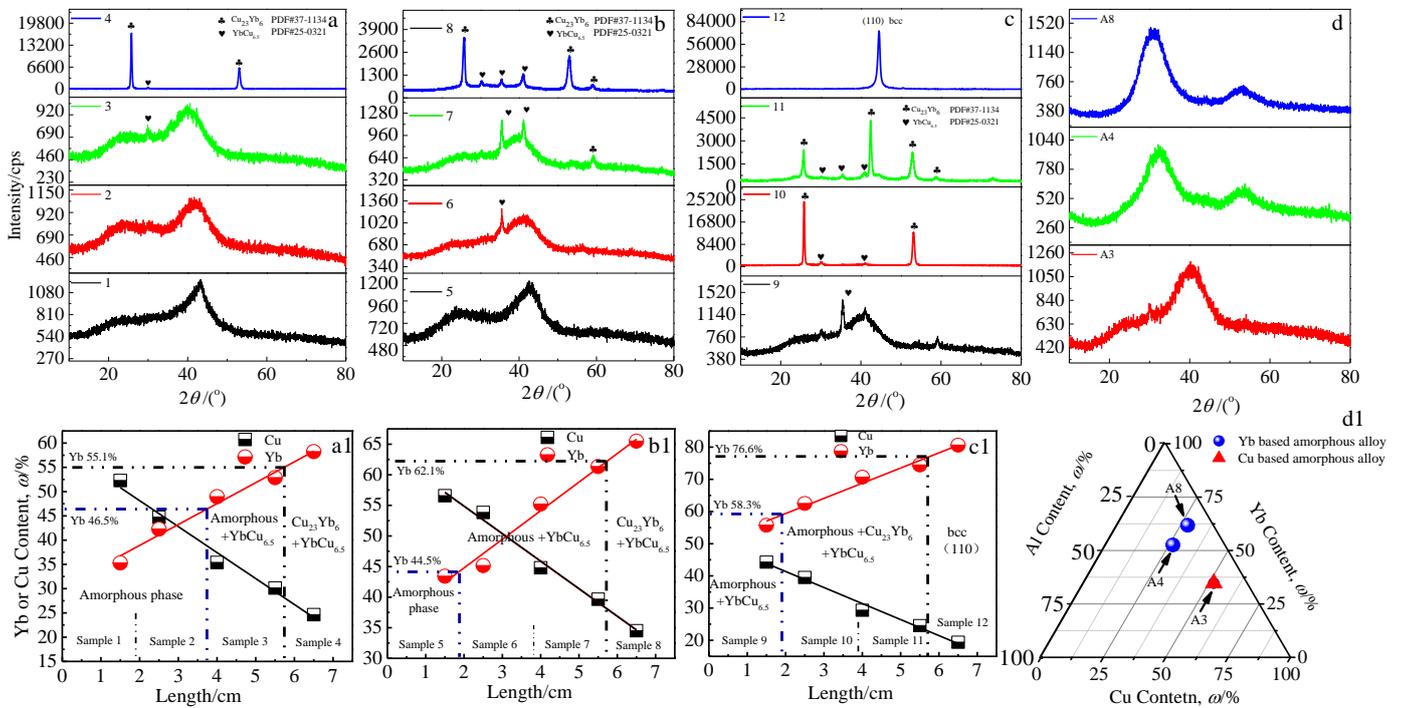


图 4 不同功率下 Yb-Cu 非晶合金薄膜 XRD 图谱和成分分布

Fig.4 XRD patterns (a~d) and element concentration distributions (a1~d1) of Yb-Cu amorphous alloy films: (a, a1) Yb: 100 W, Cu: 150 W; (b, b1) Yb: 150 W, Cu: 150 W; (c, c1) Yb: 250 W, Cu: 150 W; (d, d1) YbCuAl amorphous alloy film

图 4d、4d1 分别为 YbCuAl 非晶合金薄膜的 XRD 图谱和对应的成分分布。与 YbCu 非晶衍射图谱相比，添加 Al 后 A4 和 A8 样品中 Yb 浓度都大于 50%，此时仍然为非晶相，但是宽峰对应的衍射位置向小角度偏移，这可能与基体中团簇结构及类型改变有关^[20,21]，说明此时形成了新的非晶合金系。由溅射参数（Yb: 50 W, CuAl: 200 W）和元素浓度可知 A3 为 Cu 基非晶合金薄膜，与 A4（Yb: 100 W, CuAl: 100 W）和 A8（Yb: 150 W, CuAl: 100 W）Yb 基非晶衍射峰显著不同，A4 和 A8 样品非晶峰位衍射角与其余稀土基非晶一致^[22]，证明此时形成了 Yb 基非晶。以上结果说明 Yb-Cu 二元合金系形成非晶时，组成中 Cu 浓度较高而 Yb 浓度必须小于 50%，而添加 Al 元素后，合金开始形成 Yb 基非晶，因此要想形成 Yb 基非晶合金，Al 在制备过程中起到了关键作用，这与 Zr 基非晶存在类似的结论。

图 5 为 YbCu 非晶合金薄膜形貌。由 AFM 图可知非晶薄膜表面由十分细小的颗粒状物组成，表面高度起伏为-14.1~17.5 nm，绝对高度差 31.6 nm，说明 YbCu 非晶表面同样具有纳米级的粗糙度，符合非晶材料的形貌特征。图 5c 和 5d 分别为 YbCu 非晶薄膜的 SEM 照片。图中除了左上角有个别颗粒物（可能是污染物），整个表面没有任何特征形貌，从图 5d 截面中确定非晶薄膜厚度为 2.03 μm，截面未出现晶体薄膜具有的柱状晶、空隙和裂纹等缺陷。从 AFM 和 SEM 结果进一步证实了 YbCu 非晶薄膜具有大部分非晶合金具有的优异特征。图 5e、5f 分别为 YbCuAl 非晶表面和截面 SEM 照片。与 YbCu 非

晶膜相比没有特别巨大的变化，仍然呈现无特殊衬度的平坦表面。这可能与添加的 Al 含量较少有关。

2.3 YbCu 非晶合金薄膜疏水性及导电性能

图 6 为 Yb 基非晶合金薄膜疏水性和导电性结果。其中图 6a 和图 6b 分别为不同功率溅射功率制备的非晶合金薄膜接触角变化，其中沿长度方向（0→7.5 cm）为 Cu 靶到 Yb 靶的变化方向。3 个工艺条件下制备的薄膜接触角均大于 90°；最大疏水角为 119°且当测试位置逐渐靠近 Yb 靶时接触角变小，该变化趋势尤其在 A、C 2 组中最为明显，这可能与合金薄膜中 Yb 浓度增加有关。图 6c 为 YbCu 非晶合金薄膜方阻结果。结合 XRD 测试结果可知合金系非晶形成能力和薄膜方阻呈现正相关，在薄膜为非晶态结构时，方阻明显较大（如 A 组），其最大方阻为 551 mΩ·□⁻¹，而当薄膜为晶态结构时方阻明显减小。从薄膜方阻可知 A 组即 Yb 靶功率为 100 W 时对应的 YbCu 合金具有较强的非晶形成能力，除了特别靠近边缘位置的测试点，方阻明显较大。较大的薄膜方阻与非晶合金特殊的原子排布方式密切相关，非晶合金的微观结构不均一，从而对电子迁移产生阻碍及散射^[23-25]，其也是表征非晶形成能力的一个指标。

图 6d、6e 分别为 YbCuAl 非晶薄膜接触角和方阻变化，A8 样品的接触角和方阻都较大，特别是 A8 样品的方阻远大于 YbCu 非晶薄膜的值，YbCuAl 非晶薄膜最大方阻为 1738 mΩ·□⁻¹，再次证明合金化元素 Al 的添加对非晶结构产生显著影响。

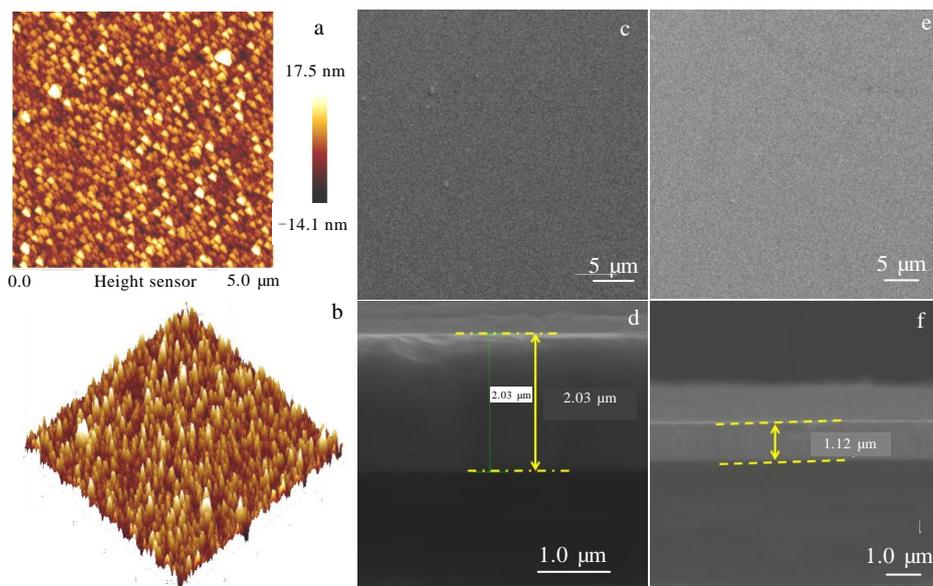


图 5 YbCu 和 YbCuAl 非晶合金薄膜形貌

Fig.5 AFM images (a, b), surface (c) and section (d) SEM images of YbCu amorphous alloy film; surface (e) and section (f) SEM images of YbCuAl amorphous film

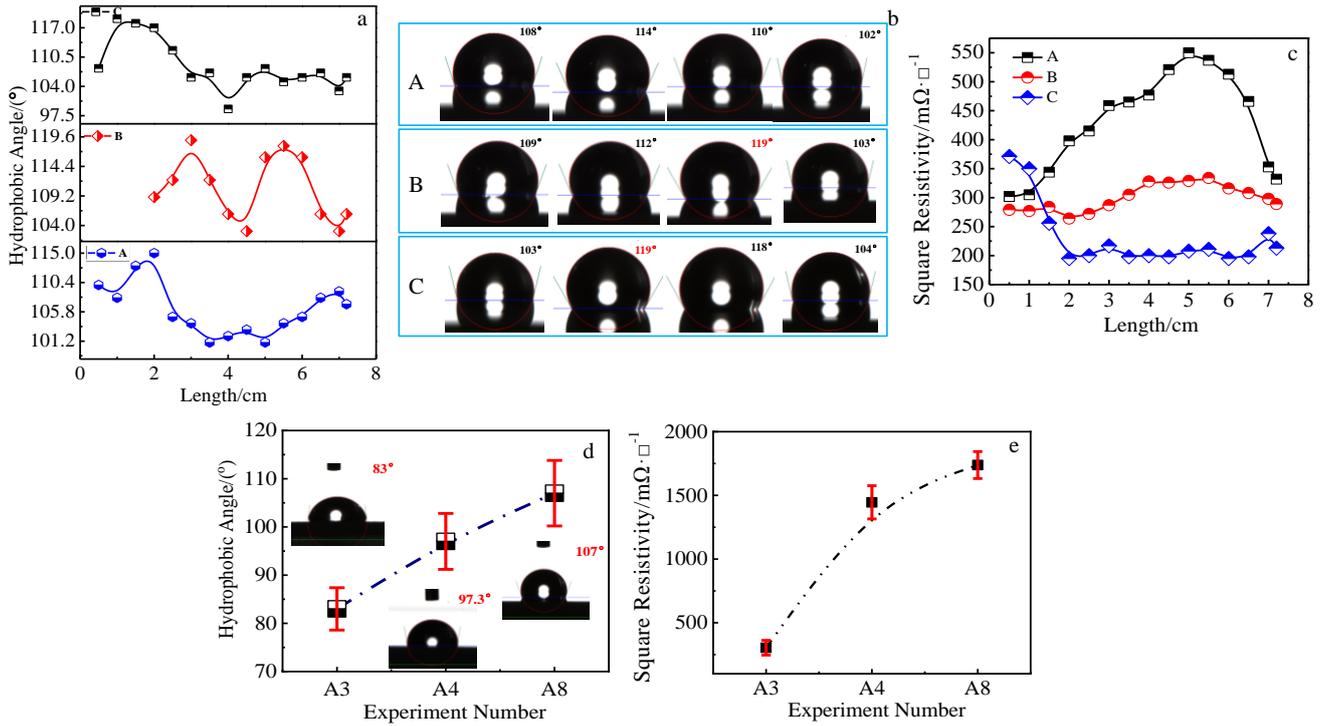


图 6 非晶合金薄膜性能

Fig.6 Hydrophobicity (a, b) and square resistance (c) of YbCu amorphous alloy films; contact angle and square resistance of YbCuAl amorphous film (d, e)

3 结 论

1) 当 Yb 浓度在 44.5%~46.5%时薄膜全部为非晶态, Al 有利于 YbCu 非晶合金的形成。由于 Yb、Cu 原子动量差异及不同的自由程等原因, 在 7.0 cm 长的载玻基片表面非晶薄膜厚度呈现字母“M”形。

2) 当 Yb、Cu 靶功率分别为 100 和 150 W 时, 除了靠近 Cu 靶侧外其余位置金属膜全部为非晶态, 继续增大 Yb 靶溅射功率时非晶区域缩小, 膜中发现了晶体 Cu₂₃Yb₆ 和 YbCu_{6.5} 的衍射峰。

3) 在 5.0 μm×5.0 μm 的 AFM 测试范围内非晶膜表层高度绝对差仅有 31.6 nm, 且截面致密未出现晶体膜层常见的缺陷。

4) YbCu 合金薄膜呈现优异的疏水性, 最大疏水角达 119°。YbCu 非晶薄膜方阻最大为 551 mΩ·□⁻¹, 远远大于晶态金属对应的方阻, 说明该成分的 YbCu 具有最佳的非晶形成能力。

参考文献 References

[1] Wang Weihua(汪卫华). *Progress in Physics*(物理进展)[J], 2013, 33(5): 177
 [2] Li Yang(李洋), He Lin(贺林), Sun Jun(孙军) et al. *Rare*

Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(11): 63
 [3] Chen Jie(陈杰), Zhu Zhenghou(朱正吼), Lin Qianying(林前英) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1204
 [4] Lv Yunzhuo(吕云卓), Gao Xiaoyu(高小余), Xu Huidong(徐会东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 2785
 [5] Yi J J, Xiong X Z, Inoue A et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 650: 578
 [6] Chen L T, Lee J W, Yang Y C et al. *Surface & Coatings Technology*[J], 2014, 260: 46
 [7] Ding S Y, Liu Y H, Li Y L et al. *Nature Materials*[J], 2014, 13(5): 494
 [8] Li M X, Zhao S F, Lu Z et al. *Nature*[J], 2019, 569: 99
 [9] Su Y T, Bai H Y, Li M Z et al. *The Journal of Physical Chemistry Letters*[J], 2017, 8(14): 3434
 [10] Ren B Y, Long Z L, Deng R J. *Computational Materials Science*[J], 2021, 189(3): 110 259
 [11] Luo Q, Wang W H. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 495(1): 209
 [12] Zhao Y, Zhang B. *Journal of Applied Physics*[J], 2017, 122:

- 115 107
- [13] Xu W, Sandor M T, Yu Y *et al.* *Nature Communications*[J], 2015, 6(1): 1
- [14] Xia L, Chan K C, Tang M B. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2011, 509(23): 6640
- [15] Yuan F, Du J, Shen B L. *Applied Physics Letters*[J], 2012, 101(3): 032 405
- [16] Wang Z W, Yu P, Cui Y T *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 658: 598
- [17] Li L L, Luo Q, Li R F *et al.* *Scientific Reports*[J], 2017, 7: 46 762
- [18] Wang Y, Dong X, Song X *et al.* *Materials Letters*[J], 2016, 162: 203
- [19] Yamaoka H, Tsujii N, Utsumi Y *et al.* *Physical Review B*[J], 2013, 87(20): 2624
- [20] Zhu Y H, Ge S F, Li H *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 856: 158 149
- [21] Jambur V, Tangpatjaroen C, Xi J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 854: 157 266
- [22] Li S, Wang R J, Pan M X *et al.* *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2008, 354(10-11): 1080
- [23] Cote P J, Meisel L V. *Physical Review Letters*[J], 1977, 39(2): 102
- [24] Tong C Z, Zheng P, Bai H Y *et al.* *Acta Physica Sinica*[J], 2002, 51(7): 1562
- [25] Howson M A, Gallagher B L. *Physics Reports*[J], 1988, 170(5): 265
- [19] Yamaoka H, Tsujii N, Utsumi Y *et al.* *Physical Review B*[J],

Preparation of YbCu and YbCuAl Amorphous Films by Magnetron Co-sputtering

Cui Hongbing, Zhang Maocai, Wang Yu, Xin Bo

(State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization,

Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

Abstract: Based on the concept of high-throughput material genetic engineering, metal thin films with continuous change of chemical composition were prepared by tilting target and adjusting single metal target power, so as to quickly screen the composition range of YbCu amorphous alloy, and YbCu amorphous alloy film was successfully prepared for the first time. At the same time, the influence of aluminum on the formation of YbCu amorphous alloy was studied and YbCuAl amorphous films were prepared. When the Yb content is between 44.5wt%~46.5wt%, the films are all amorphous. The results show that the surface of YbCu amorphous alloy is smooth without defects, and the absolute height difference is only 31.6 nm. The film is hydrophobic with a maximum hydrophobic angle of 119°. In addition, the maximum square resistance of YbCu and YbCuAl amorphous films is 551 and 1738 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$, respectively. The alloying element Al has a significant effect on the properties of YbCu amorphous films. Therefore, the composition screening and successful preparation of YbCu(Al) amorphous films accelerate the development of rare earth based amorphous materials.

Key words: amorphous alloy films; glass forming ability; YbCu alloy; magnetron sputtering; high throughput preparation

Corresponding author: Xin Bo, Senior Engineer, State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resources Research and Comprehensive Utilization, Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, P. R. China, Tel: 0086-472-5179218, E-mail: xinbo@brire.com