Ta离子辐照对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的微观结构和载流特性的影响

谷裕¹, 蔡传兵^{1,2*}, 刘志勇^{1,2}, 刘杰^{3,4}, 刘丽^{3,4}, 黄荣铁²

1. 上海大学物理系, 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444;

2. 上海上创超导科技有限公司, 上海 201401;

3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

4. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: cbcai@t.shu.edu.cn

2021-04-12 收稿, 2021-05-15 修回, 2021-05-19 接受, 2021-05-24 网络版发表

中国科学院战略重点研究计划(XDB25000000)、国家重点研发计划(2016YFF0101701)和国家自然科学基金(51572165)资助

摘要 高温超导 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)涂层导体也称为第二代高温超导带材(2G-HTS带材), 在能源、交通等领域具有广泛的应用前景. 然而, 其在强磁场下临界电流密度较低的问题严重限制了其应用, 因此提升其磁通钉扎和在场载流能力是YBCO涂层导体的研究热点. 本文利用1.9 GeV的Ta离子对YBCO带材进行辐照, 研究了不同剂量的Ta离子辐照后YBCO带材的微观结构和载流特性变化. 样品的场发射透射电子显微镜(field emission transmission electron microscope, FETEM)图像显示, 辐照过程中高能 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 离子在薄膜中形成了~10 nm尺寸的柱状缺陷, 说明辐照后样品中产生了有效的钉扎中心. 通过磁学测量系统(magnetic property measurement system, MPMS)对辐照样品的载流特性进行研究, 发现当Ta离子剂量低于 5.0×10^{10} ions/cm²时, 样品的临界转变温度 $T_{c, \text{on}}$ 并无明显变化, 但当剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时, $T_{c, \text{on}}$ 减小了约0.6 K; 当剂量高于 1.0×10^8 ions/cm²时, 由零场冷磁化强度随温度变化情况可知, 辐照样品的超导抗磁相明显多于无辐照样品. 同时, 较高辐照剂量如 5.0×10^{10} ions/cm²YBCO样品的 J_c 较高, 不同磁场下的 J_c 均得到了明显提升, 30 K、1 T时的提升因子达到了3.8(提升因子定义为不同温度、外场下的 J_c 与77 K自场下 J_c 的比值), 为同温度同场下无辐照样品的3倍. 将临界电流密度 J_c 与磁场强度 H 的关系采用 $J_c \propto H^\beta$ 进行拟合, 发现高剂量样品的磁通匹配场 H^* 和表征随磁场衰减参数 β 增大了. 此外, 约化钉扎力密度标度关系显示, 在低场下, 样品中的钉扎类型在低辐照剂量下主要是面钉扎, 当辐照剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时开始向点缺陷钉扎类型转变, 高场下则是所有样品都更符合面钉扎类型.

关键词 高能Ta离子, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超导涂层导体, 辐照, 钉扎缺陷, 载流特性

铜氧化物高温超导体包括 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (RE-BCO, RE=Y、Gd、Sm等稀土元素)、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223)、 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Tl2223)、 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (Hg1223)等, 其中基于REBCO薄膜外延生长和双轴织构技术发展起来的高温超导涂层导体(也称第二代高

温超导带材)具有较高的超导转变温度 T_c 、不可逆场 H_{ir} 、临界电流密度 J_c 等, 在电力工程的各个领域(如大电流传输电缆、超导线圈磁体和超导变压器等)都有着广泛的应用前景^[1~5]. 目前, 随着转变温度在液氮温区之上的2G-HTS带材发展以及超导材料应用上需求

引用格式: 谷裕, 蔡传兵, 刘志勇, 等. Ta离子辐照对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的微观结构和载流特性的影响. 科学通报, 2021, 66: 3965–3972

Gu Y, Cai C B, Liu Z Y, et al. Effect of Ta irradiation on microstructures and current carrying properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3965–3972, doi: 10.1360/TB-2021-0356

的提升,进一步提高运行温度、改善超导临界电流密度及磁场下的传输能力等已成为当前电力工程应用和产业化发展中急需解决的问题,特别是超导体在不同磁热服役环境下的电流传输能力、机械性能等已成为2G-HTS带材发展中最为关键的材料科学问题^[6-9]。其中一个热点问题是当外磁场变化时,其临界电流密度会随之迅速地衰减,这主要是因为当外加磁场高于第II类超导体的下临界磁场 H_{c1} 时,第II类超导体将进入混合态。此时若通有电流,则会产生洛伦兹力,使得磁通线发生运动。但这只是针对理想的第II类超导体而言,实际的高温超导体并不是理想的,其内部存在位错和间隙原子等各类本征缺陷,这些缺陷会产生钉扎力来阻碍磁通线的运动,当洛伦兹力大于超导体内部的缺陷等提供的钉扎力时,磁通线才发生运动。磁通线的运动伴随着能量的损耗,因此超导体失去无阻传输电流的特性,此时对应的外场为不可逆场 H_{irr} 。为了解决这个问题,目前比较常用的办法是采用各种手段在超导体内部构建人工钉扎中心(artificial pinning center, APC),从而抑制磁通涡旋的运动来提升其在场性能^[10-12]。

当前,在高温超导涂层导体中引入不同维度APC的手段主要分为2种:化学法^[13,14](例如稀土元素掺杂等)和物理法^[15-17](主要是粒子辐照)。化学法虽然易于向REBCO中引入晶胞类型、晶格常数和热膨胀系数与REBCO相接近的 RE_2O_3 和 $BaMO_3$ ($M=Zr, Sn, Hf$ 等元素)型钙钛矿氧化物等来进行元素掺杂,但是一般难以实现自组装的一维二次相结构。与传统化学掺杂法相比,粒子辐照手段可以在不改变超导材料原有化学配比的基础上,通过控制粒子的种类、能量和辐照剂量等条件,在其内部形成各种类型和尺寸的缺陷。一般来说,电子、质子、中子及重离子等粒子均可用于辐照。直至今日,YBCO辐照改性方面的工作已经有很多^[18-20],但是针对金属有机物沉积法(metal organic deposition, MOD)薄膜进行重离子辐照的工作尚待补足。在这诸多选择之中,采用快重离子(原子序数大于2,且单核能大于1 MeV/u)进行辐照是一种行之有效的方法,其具有高能量、高电子能损的特点。通常,只要快重离子射入YBCO后满足电子能损大于35 keV/nm,就可以在其中形成连续潜径迹。此缺陷可作为有效人工钉扎中心,沿其长轴方向对磁通涡旋进行各向异性钉扎,限制涡旋的运动,从而提升YBCO的在场性能。就此而言,其形成的潜径迹本质是一种类似连续柱状缺陷的强钉

扎中心^[21]。

本文借助中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL)上的单粒子效应终端(TR-5),开展了YBCO高温超导薄膜的Ta离子辐照效应研究,利用磁学测量系统(magnetic property measurement system, MPMS)获得了YBCO薄膜基本超导参数、钉扎类型等随入射离子注量的变化规律,并通过场发射透射电子显微镜(field emission transmission electron microscope, FETEM)观察了其辐照后的内部结构变化,结合理论分析对结果进行了初步探讨。

1 材料和方法

实验样品 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 超导薄膜由上海上创超导公司提供,采用MOD法在 $LaMnO_3$ 基底上沉积1.2 μm 厚的YBCO超导层制备而成。在薄膜表面镀约1.6 μm 厚的银保护层来隔绝外界水汽,以尽量保证样品性能不因外界影响而衰减。原样品为12 mm宽的薄膜长带,将其切割成4 mm×4 mm的正方形来进行后续的辐照工作。

采用HIRFL TR-5提供的 $^{181}Ta^{32+}$ 离子,在室温、真空的外部条件下对YBCO薄膜进行辐照,选取的离子剂量范围为 $1.0 \times 10^7 \sim 5.0 \times 10^{10}$ ions/cm²。Ta离子经过探测器到达样品表面的实际能量为1.9 GeV,穿透约1.6 μm 的银层后到达超导层的能量为1.8 GeV,再进入1.2 μm 厚的YBCO超导层,如图1所示。辐照后样品先通过聚焦离子束(focus ion beam, FIB)将其制备成3 $\mu m \times 5 \mu m \times 80$ nm的切片,再采用FETEM(型号JEM-2010F)来观察其微观结构。同时,借助MPMS(型号MPMS3-7 T Quantum Design)对辐照后样品的性能进行测试,主要测试内容为样品的磁滞回线 $M-H$,测试条件为在YBCO薄膜的 c 轴方向上加-7~7 T的外场,测试温度为30和77 K。 $M-T$ 曲线用来表征样品的转变温度 $T_{c,on}$ 。

2 结果与讨论

Ta离子在YBCO超导带材中能量损失的方式主要有两种:一种是与靶原子的核外电子发生非弹性碰撞使靶原子电离和激发从而损失能量,我们把这种能量损失称为电子能损(electronic energy loss, S_e);另一种是直接和靶原子核发生弹性碰撞损失能量,我们称之为核能损(nuclear energy loss, S_n)。使用SRIM2013软件对辐照过程进行模拟,先计算出Ta入射YBCO时(穿透1.6 μm 的Ag层后)的大概能量,然后在一个比较大的穿

图1 (网络版彩色) $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照示意图
Figure 1 (Color online) Sketch map of $^{181}\text{Ta}^{32+}$ irradiation

透深度上模拟Ta离子入射YBCO的过程, 得到其 S_e 和 S_n 值, 进而对辐照在YBCO中产生的缺陷类型做一个大致预期, 实际上发生的只有刚开始的深度为1.2 μm 的一小段. 根据图2中的模拟结果, 可以看到, 1.9 GeV的Ta离子在YBCO中的 S_e 值明显高于其 S_n 值, 所以整个穿透过程中能量损失以电子能损为主, 且电子能损 S_e 满足形成连续柱状缺陷的条件^[22], 故Ta离子可以在材料中形成连续的潜径迹. 为了观察潜径迹是否存在, 采用FIB将辐照剂量为 5.0×10^{10} ions/ cm^2 的样品制备成 $3 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 80 \text{ nm}$ 的切片, 并在FETEM下进行观察. 图3为YBCO辐照样品 a - c 面的剖面图像, 可以看到Ta离子的入射痕迹(如右下箭头所示), 左上箭头代表 c 轴取向. 从图3中可以观察到小范围内的连续柱状缺陷, 而实际中是移动到不同部分进行观察. 在小范围内的连续柱状缺陷看起来不是均匀分布, 同时由于缺陷的尺度小, 当减小放大倍数时也无法看清楚. 尽管如此, 考虑到用来进行辐照的束斑是一个均匀的光斑, 辐照对象也是均匀的样品, 因此我们相信Ta离子在YBCO样品的超导层中产生了均匀分布的连续柱状缺陷, 缺陷的尺寸为 $\sim 10 \text{ nm}$.

本文对辐照后YBCO薄膜的临界转变温度和临界电流密度等超导参数进行了相关研究. 当YBCO超导体由正常态向超导态转变时, 其内部磁通会经历一个由正常态逐渐被向外排出, 经过混合态最终到达超导抗磁态的过程, 故可以通过测量样品的磁化强度随温度变化的曲线来观察超导转变发生的整个过程. 利用MPMS测量样品的 M - T 曲线, 结果如图4所示. 初始样品的转变温度约为91.3 K, 随着辐照剂量的增大, 辐照后YBCO样品的转变温度基本没有变化. 然而, 当剂量达到 5.0×10^{10} ions/ cm^2 时, 样品的转变温度减小了约0.6 K. 同时, 研究发现, 当辐照剂量大于 1.0×10^8 ions/ cm^2 时, 辐照样品的超导抗磁相明显多于无辐照样品, 且温度越

低, 超导抗磁相越多.

此外, 测试中采用在 c 轴方向加外场, 测量了不同

图2 (网络版彩色) $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 入射YBCO薄膜过程SRIM2013模拟结果
Figure 2 (Color online) Simulation results in SRIM2013 of the $^{181}\text{Ta}^{32+}$ incident on the YBCO film

图3 (网络版彩色)剂量为 5.0×10^{10} ions/ cm^2 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜FETEM图
Figure 3 (Color online) FETEM image of the YBCO film irradiated by $^{181}\text{Ta}^{32+}$ at the fluence of 5.0×10^{10} ions/ cm^2

图4 (网络版彩色)不同剂量 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜的磁化强度随温度变化曲线,内插图为区域放大图

Figure 4 (Color online) Magnetization versus temperature of the YBCO film irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ of different fluences. The inset is an enlarged area

图5 (网络版彩色)不同剂量 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜的临界电流密度随磁场强度变化曲线(内插图为对应的 $M-H$ 曲线). (a) 30 K下样品曲线; (b) 77 K下样品曲线

Figure 5 (Color online) Curves of critical current density with magnetic field intensity for the YBCO film irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ of different fluences. The corresponding $M-H$ curves are shown in the insets. (a) Sample curve at 30 K; (b) sample curve at 77 K

图6 (网络版彩色)不同剂量 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜提升因子的场依赖性. (a) 30 K下样品曲线; (b) 77 K下样品曲线

Figure 6 (Color online) Field dependence of enhancement factor for the YBCO film irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ of different fluences. (a) Sample curve at 30 K; (b) sample curve at 77 K

剂量的Ta离子辐照后YBCO薄膜的磁滞回线 $M-H$,并用Bean模型对得到的数据进行了临界电流密度 J_c 的计算^[23],还计算了样品的提升因子(提升因子定义为不同温度、外场下的 J_c 与77 K自场下 J_c 的比值),以直观地反映YBCO样品在场性能的变化. J_c 的表达式为

$$J_c(H) = \frac{20\Delta M(H)}{a(1-a/3b)}, \quad (1)$$

式中, a 、 b 为样品垂直于 c 轴方向的实际平面尺寸,且 $a < b$; ΔM 为样品磁滞回线上同一外场条件下对应的单位体积磁化强度之差.测试与计算结果如图5和6所示.

由图5和6可知,对于YBCO样品,当剂量大于 1.0×10^7 ions/cm²时,不同外场下辐照后样品的在场 J_c 相比无辐照样品都有所提升(外场约为1 T时 J_c 提升程度

最大)。当剂量增大时,在场 J_c 提升的程度亦有所增加;当剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时,对应的在场 J_c 增大得最为显著,30 K下外场约为1 T时, J_c 提升为无辐照样品的3倍左右,对应的提升因子为3.8,同时该样品在77 K同场条件下 J_c 提升亦很显著,达到了无辐照样品的约2.7倍。此外,零场下辐照后样品性能由于超导抗磁相的增多亦有所提升。

为了分析 J_c 随外场变化过程中的钉扎状态,采用 $J_c \propto H^{-\beta}$ 指数关系模型^[24]对样品30和77 K下的数据进行拟合,结果如图7。可以看出,对于YBCO样品,当剂量比较小时,样品的匹配场 H^* (标志着强个体钉扎到弱集体钉扎的特征场)^[25]虽然相比辐照前略有变化,但是变化不甚显著,仅仅只是在1200 Oe(30 K)和490 Oe(77 K)附近波动,指数 β 亦是如此。当剂量增大到 5.0×10^{10} ions/cm²时,临界电流密度随外场变化速率明显相比之前缓慢了许多,且匹配场 H^* 明显增大了,同时 β 亦增大到接近于1。由于匹配场 H^* 与强钉扎密切相关,同时研究表明, $\beta \approx 1$ 时,YBCO内部存在有效的柱状钉扎^[26],因此上述研究结果都暗示YBCO样品中存在Ta离子辐照引入的柱状钉扎缺陷。

由于晶体内部缺陷的存在,磁通涡旋开始运动时会受到抑制其运动的钉扎力从而减少损耗,进而提升临界电流密度 J_c 。因此, J_c 与晶体内部的钉扎力息息相关。为了深入了解样品辐照后内部的磁通钉扎信息,对样品内部的钉扎力进行计算,采用的公式为 $F_p = J_c \times \mu_0 H$,其结果如图8所示。对于YBCO样品,除了辐照剂量为

1.0×10^7 ions/cm²的样品,其他所有辐照后的样品内部钉扎力都增大了,尤其是当剂量为 5.0×10^{10} ions/cm²时,钉扎力提升最为显著,说明适量的辐照确实能提升YBCO涂层导体的内部钉扎力。

为了进一步研究Ta离子辐照对YBCO薄膜内部钉扎力类型产生的影响,对77 K下钉扎力随外场的变化曲线进行处理,得到约化钉扎力 $f_p = F_p / F_{pmax}$ 与约化场 $h = H / H_{max}$ 之间的关系^[27,28],其中 F_{pmax} 为钉扎力随外场变化过程中的峰值, H_{max} 为峰值钉扎力所对应的磁场值,处理结果如图9所示。同时,结合Higuchi钉扎力标度函数对约化钉扎力曲线进行拟合(图9)。采用函数公式如下所示,式(2)对应正常缺陷点钉扎类型,式(3)对应面钉扎类型:

$$f_p(h) = \frac{9}{4}h \left(1 - \frac{h}{3}\right)^2, \quad (2)$$

$$f_p(h) = \frac{25}{16}\sqrt{h} \left(1 - \frac{h}{5}\right)^2. \quad (3)$$

由图9可知,对于YBCO薄膜,当 $h < 1$ 时,随着辐照剂量的增大,辐照后样品的约化钉扎力曲线向面钉扎拟合曲线趋近,说明面钉扎逐渐在样品中占据主导地位;当辐照剂量进一步增大时,则向点缺陷钉扎拟合曲线趋近,说明低场下钉扎类型随剂量增大逐渐由面钉扎转为点缺陷钉扎。而当 $h > 1$ 时,所有辐照后样品的约化钉扎力曲线都更加贴合面钉扎曲线,且随剂量增大贴合得愈发接近。以上结果说明,Ta离子辐照确实改变了

图7 (网络版彩色)30和77 K下不同剂量 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜的归一化 J_c 随磁场强度变化取对数曲线与拟合 $J_c \propto H^{-\beta}$ 的结果,内插图为区域放大图,标出了不同样品的匹配场位置

Figure 7 (Color online) The logarithmic curves show the field dependence of the normalized J_c of the YBCO thin films irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ of different fluences at 30 and 77 K, and the results of fitting $J_c \propto H^{-\beta}$. The insets present the enlarged area, showing the matching field position of different samples

图8 不同外场下 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜的钉扎力随剂量变化曲线。(a) 30 K下曲线; (b) 77 K下曲线

Figure 8 Fluence-dependent pinning force curves of YBCO films irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ in different external fields. (a) Sample curve at 30 K; (b) sample curve at 77 K

图9 77 K下不同剂量 $^{181}\text{Ta}^{32+}$ 辐照YBCO薄膜的约化钉扎力曲线与钉扎力类型曲线拟合结果

Figure 9 Fitting results of reduced pinning force curve of the YBCO films irradiated with $^{181}\text{Ta}^{32+}$ of different fluences and pinning force type curves at 77 K

YBCO薄膜的内部钉扎结构, 对YBCO薄膜的钉扎行为产生影响。

3 结论

本文采用1.9 GeV的Ta离子辐照YBCO高温超导薄膜, 并对其微观结构和载流特性进行了研究。在辐照后

样品的FETEM图像中确认了尺寸~10 nm的连续柱状缺陷的存在, 证实了Ta离子辐照确实会对样品内部钉扎结构产生影响。MPMS测试结果表明, 当Ta离子剂量不太大时, 样品的临界转变温度 $T_{c,on}$ 并无明显变化, 而当剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时, $T_{c,on}$ 减小。当剂量高于 1.0×10^8 ions/cm²时, YBCO样品的超导抗磁相明显增多, 一定程度上改善了YBCO的零场载流性能。当剂量高于 1.0×10^7 ions/cm²时, 随着辐照剂量升高, YBCO的载流性能提升幅度增大; 当剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时, 性能提升最为明显, YBCO样品的 J_c 提升达到原来的3倍(~1 T, 30 K)。

此外, 对样品内部在场钉扎力进行了计算, 证实了适量的辐照确实能提升YBCO的内部钉扎力, 并采用Higuchi模型对归一化钉扎力曲线进行了拟合。拟合结果显示, 在低场下, 低辐照剂量样品中钉扎类型主要是面钉扎, 而当辐照剂量达到 5.0×10^{10} ions/cm²时开始向点缺陷钉扎类型转变。此外, 高场下所有辐照后样品的约化钉扎力曲线都更符合面钉扎曲线, 说明此时面钉扎为样品中的主要钉扎类型。上述结果表明, Ta离子的注入确实对YBCO的内部钉扎结构产生了影响, 提升了其钉扎性能。而Ta离子为何会对样品有如此影响, 还需要更进一步的研究。

参考文献

- Bondarenko S I, Kovrya V P, Krevsun A V, et al. High-temperature superconductors of the family $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and their application. *Low Temp Phys*, 2017, 43: 1125–1151
- Senatore C, Alessandrini M, Lucarelli A, et al. Progresses and challenges in the development of high-field solenoidal magnets based on RE123

- coated conductors. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 103001
- 3 Shiohara Y, Yoshizumi M, Izumi T, et al. Present status and future prospect of coated conductor development and its application in Japan. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 034002
- 4 Cai C B, Liu Z Y, Lu Y M, et al. Evolvement and prospect of practical superconducting materials (in Chinese). *Mater China*, 2011, 30: 1–9 [蔡传兵, 刘志勇, 鲁玉明, 等. 实用超导材料的发展演变及其前景展望. *中国材料进展*, 2011, 30: 1–9]
- 5 Foltyn S R, Civale L, MacManus-Driscoll J L, et al. Materials science challenges for high-temperature superconducting wire. *Nat Mater*, 2007, 6: 631–642
- 6 Obradors X, Puig T. Coated conductors for power applications: materials challenges. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 044003
- 7 Larbalestier D, Gurevich A, Feldmann D M, et al. High- T_c superconducting materials for electric power applications. *Nature*, 2001, 414: 368–377
- 8 Sadvovskyy I A, Koshelev A E, Glatz A, et al. Simulation of the vortex dynamics in a real pinning landscape of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors. *Phys Rev Appl*, 2016, 5: 014011
- 9 Cai C B, Chi C X, Li M J, et al. Advance and challenge of secondary-generation high-temperature superconducting tapes for high field applications (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 64: 827–841 [蔡传兵, 池长鑫, 李敏娟, 等. 强磁场用第二代高温超导带材研究进展与挑战. *科学通报*, 2018, 64: 827–841]
- 10 Nakaoka K, Yoshida R, Kimura K, et al. Another approach for controlling size and distribution of nanoparticles in coated conductors fabricated by the TFA-MOD method. *Supercond Sci Technol*, 2017, 30: 055008
- 11 Xu A, Delgado L, Khatri N, et al. Strongly enhanced vortex pinning from 4 to 77 K in magnetic fields up to 31 T in 15 mol.% Zr-added (Gd, Y)-Ba-Cu-O superconducting tapes. *APL Mater*, 2014, 2: 046111
- 12 Palau A, Vallès F, Rouco V, et al. Disentangling vortex pinning landscape in chemical solution deposited superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films and nanocomposites. *Supercond Sci Technol*, 2018, 31: 034004
- 13 Matsumoto K, Mele P. Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in YBCO coated conductors. *Supercond Sci Technol*, 2010, 23: 014001
- 14 Holman M J, Kavelaars J J, Grav T, et al. Discovery of five irregular moons of Neptune. *Nature*, 2004, 430: 865–867
- 15 Strickland N M, Wimbush S C, Kennedy J V, et al. Effective low-temperature flux pinning by Au ion irradiation in HTS coated conductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2015, 25: 1–5
- 16 Chudy M, Fuger R, Eisterer M, et al. Characterization of commercial YBCO coated conductors after neutron irradiation. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 21: 3162–3165
- 17 Khadzai G Y, Litvinov Y V, Vovk R V, et al. Effect of electron irradiation on the fluctuation conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2018, 29: 7725–7729
- 18 Sueyoshi T, Sogo T, Nishimura T, et al. Angular behaviour of critical current density in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films with crossed columnar defects. *Supercond Sci Technol*, 2016, 29: 065023
- 19 Nakashima K, Chikumoto N, Ibi A, et al. Effect of ion-irradiation and annealing on superconductive property of PLD prepared YBCO tapes. *Physica C-Supercond its Appl*, 2007, 463–465: 665–668
- 20 Matsui H, Ootsuka T, Ogiso H, et al. Origin of the dimpled critical-current-versus-magnetic-field-angle relation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ films studied using sub-MeV ion irradiation. *Supercond Sci Technol*, 2016, 29: 065002
- 21 Civale L, Marwick A D, Worthington T K, et al. Vortex confinement by columnar defects in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ crystals: Enhanced pinning at high fields and temperatures. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 648–651
- 22 Weinstein R, Gandini A, Sawh R, et al. How and why discontinuous multiple-in-line-damage results in much higher J_c than continuous columnar pinning centres. *Supercond Sci Technol*, 2006, 19: S575–S579
- 23 Cui X M, Liu G Q, Wang J, et al. Enhancement of critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films by nanoscale CeO_2 pretreatment of substrate surfaces. *Physica C-Supercond*, 2007, 466: 1–4
- 24 Higuchi T, Yoo S I, Murakami M. Comparative study of critical current densities and flux pinning among a flux-grown $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ single crystal, melt-textured Nd-Ba-Cu-O, and Y-Ba-Cu-O bulks. *Phys Rev B*, 1999, 59: 1514–1527
- 25 Krusin-Elbaum L, Civale L, Thompson J R, et al. Accommodation of vortices to columnar defects: Evidence for large entropic reduction of vortex localization. *Phys Rev B*, 1996, 53: 11744–11750
- 26 Dam B, Huijbregtse J M, Klaassen F C, et al. Origin of high critical currents in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting thin films. *Nature*, 1999, 399: 439–442
- 27 Shi Z X, Zhang Y X, Lv H, et al. Flux pinning in c -axis-oriented MgB_2 thin film. *Physica C-Supercond its Appl*, 2007, 467: 101–105
- 28 Cai Q, Liu Y, Ma Z, et al. Variation of pinning mechanism and enhancement of critical current density in MgB_2 bulk containing self-generated coherent MgB_4 impurity. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 132601

Summary for “Ta 离子辐照对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的微观结构和载流特性的影响”

Effect of Ta irradiation on microstructures and current carrying properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Yu Gu¹, Chuanbing Cai^{1,2*}, Zhiyong Liu^{1,2}, Jie Liu^{3,4}, Li Liu^{3,4} & Rongtie Huang²¹ Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;² Shanghai Creative Superconductor Technologies Co., Ltd, Shanghai 201401, China;³ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;⁴ School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: cbcai@t.shu.edu.cn

High-temperature superconducting coated conductors (HTS CCs), which are based on epitaxial growth and biaxial texture technology of REBCO thin films, show excellent physical properties including high transition temperature $T_{c,\text{on}}$, high irreversible field H_{irr} , as well as high critical current density J_c . However, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) has limited applications in a high magnetic field because of low critical current. Previous studies have shown that building smaller artificial pinning centers (APCs) is an effective way to increase the J_c of HTS CCs. Compared with the traditional chemical doping route, the particle irradiation method will result in various types and sizes of defects with uniform distribution by controlling the type, energy and dose of particles and keeping the original chemical ratio of the material.

1.2 μm YBCO superconducting layer was deposited on the LaMnO_3 substrate of the samples by metal organic deposition (MOD) method. YBCO thin films were irradiated with 1.9 GeV Ta ions at room temperature and vacuum conditions. The microstructure of irradiated samples was systematically observed using a field emission transmission electron microscope (FETEM). The result shows that Ta ions do produce continuous columnar defects with uniform distribution in the superconducting layer of the YBCO films, and the size of the defects is about 10 nm. The basic superconducting parameters, such as $T_{c,\text{on}}$ and J_c , were measured using magnetic property measurement system (MPMS). The result shows the $T_{c,\text{on}}$ of the pristine sample was 91.3 K. When the irradiation fluence was small, the $T_{c,\text{on}}$ of the doped sample was basically unchanged. As the fluence reached 5.0×10^{10} ions/ cm^2 , the $T_{c,\text{on}}$ decreased by 0.6 K. In addition, the superconducting antimagnetic phases did not change much until the fluence exceeded 1.0×10^8 ions/ cm^2 . After the fluence exceeded 1.0×10^8 ions/ cm^2 , the superconducting antimagnetic phases increased obviously. They increased with the decrease of temperature as well. The result shows that J_c increased obviously with the increase of fluence for the samples. In normal situation, the current carrying properties of the samples irradiated in the low field should decrease compared with that before irradiation, but the J_c of the samples increased in the low field because of the increase of superconducting antimagnetic phases in the samples after irradiation. At 30 K and 1 T, the J_c increased by 3 times of the original, and at 77 K, the J_c also improved by 2.7 times in the same field. To analyze the pinning state in this process, the exponential relationship model of $J_c \propto H^{-\beta}$ was used to fit the data of the samples at 30 K and 77 K. The result shows that the doped samples with 5.0×10^{10} ions/ cm^2 had the higher value of H^* and β , which suggests the generation of new effective pinning centers due to the Ta ion implantation. The normalized pinning force $f_p = F_p/F_{p,\text{max}}$ of samples irradiated with different fluence was analyzed as a function of the magnetic field $h = H/H_{\text{max}}$ by using Higuchi model. The fitting result shows that Ta ion irradiation does affect the pinning behavior of doped YBCO films. Further study is needed to find out why Ta ions have such effects on the YBCO films.

high energy Ta ion, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high-temperature superconducting coated conductors, irradiation, pinning defects, current carrying property

doi: [10.1360/TB-2021-0356](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0356)