

BaO 掺杂对单畴 GdBCO 超导块材性能的影响

王妙 杨万民 杨芾焘 王小梅 张明 胡成西

Influences of BaO doping on the properties of single domain GdBCO bulk superconductors

Wang Miao Yang Wan-Min Yang Peng-Tao Wang Xiao-Mei Zhang Ming Hu Cheng-Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 227401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.227401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.227401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cu 离子注入单晶 TiO₂ 微结构及光学性质的模拟研究

A simulation study of structural and optical properties in Cu ions implantation single-crystal rutile

物理学报.2016, 65(20): 206102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.206102>

阳离子空位磁矩起因探讨

Study on magnetic moment of cation-vacancy

物理学报.2015, 64(17): 176101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.176101>

He 离子辐照 6H-SiC 引入缺陷的光谱研究

Spectra study of He-irradiation induced defects in 6H-SiC

物理学报.2014, 63(21): 216101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.216101>

沉淀剂对 ZnO 压敏陶瓷缺陷结构和电气性能的影响

The effects of precipitant on the defect structures and properties of ZnO varistor ceramics

物理学报.2013, 62(22): 226103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.226103>

Er³⁺ 在 KPb₂Br₅ 晶体中的选择替位对上转换发光光谱的影响

Influence of site-selective doping of Er³⁺ on the upconversion spectra in KPb₂Br₅

物理学报.2013, 62(21): 216101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.216101>

BaO掺杂对单畴GdBCO超导块材性能的影响*

王妙^{1)†} 杨万民²⁾ 杨芃焘²⁾ 王小梅¹⁾ 张明¹⁾ 胡成西¹⁾

1)(西安航空学院理学院, 西安 710077)

2)(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2016年7月2日收到; 2016年8月19日收到修改稿)

采用改进后的顶部籽晶熔渗生长(M-TSIG)工艺, 通过在固相先驱粉体中掺杂不同含量的BaO来有效地抑制GdBCO样品生长过程中出现的Gd/Ba替换现象, 从而成功地制备出了一系列单畴GdBCO超导块材, 并且对样品的宏观形貌、磁悬浮力、捕获磁通密度及临界温度等超导性能进行了研究. 结果表明, 随着BaO掺杂量的增加, 样品的熔化温度(T_m)及包晶反应温度(T_p)均出现逐渐降低的趋势; 同时, 当样品中BaO的添加量在2 wt%—4 wt%时, 可以在一定的程度上有效提高GdBCO样品的磁悬浮力、捕获磁通密度及临界温度等超导性能.

关键词: 单畴GdBCO超导块材, 磁悬浮力, 捕获磁通密度, 临界温度

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv, 61.72.-y, 74.81.Bd

DOI: 10.7498/aps.65.227401

1 引言

为了使GdBCO高温超导块材能够得到产业化应用, 不仅要降低其制备成本, 提高制备效率, 同时还要最大程度地提高GdBCO高温超导块材的超导性能, 如磁悬浮力、捕获磁通密度、临界温度以及临界电流密度等^[1-4]. 然而, 由于Gd³⁺和Ba²⁺具有相近的离子半径, Ba²⁺很容易被轻稀土元素Gd替换而形成Gd_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_{7- δ} 固溶体(Gd123 ss), 大量的Gd/Ba替换会在很大程度上影响样品的超导性能^[5,6]. 因此人们开始探寻一种能够抑制Gd/Ba替换的新方法, 从而有效地提高GdBCO高温超导块材的超导性能^[6-10].

目前, 对于抑制Gd/Ba替换方面的研究已经有大量的文献报道. 从文献中可以看到, 存在两种有效的方法可抑制Gd/Ba替换, 其一是在低氧分压中制备GdBCO高温超导块材^[11-13], 即通过控制氧空位含量来制备高性能的样品, 但是该方

法需要在氧气气氛中制备超导样品, 对制备样品的生长设备和生长方法有着严格的要求, 不利于大批量化、低成本制备GdBCO高温超导块材; 其二是在制备样品的先驱粉体中掺杂一定比例的含Ba²⁺的氧化物或钡酸盐, 即在先驱粉体中引入富钡相粒子, 以此来抑制样品生长过程中的Gd/Ba替换, 在已有的文献中, 掺杂较多的含Ba²⁺的物质主要有BaO₂, BaCuO₂及BaTiO₂等^[14-22]. Li等^[16]通过研究发现, 采用顶部籽晶熔融生长(TSMTG)方法制备的GdBCO单畴超导块材当掺杂有0.1 mol% BaO₂时可达到最佳性能, 该样品在液氮温度下的临界电流密度(J_c)可高达 8.6×10^4 A/cm²; Shi等^[20]采用TSMTG方法对掺杂有不同比例BaO₂的单畴GdBCO超导块材也做了大量研究, 发现随着BaO₂掺杂量的增加, 采用等温生长的单畴GdBCO样品的熔化温度(T_m)逐渐降低, 并且在掺杂量为1 wt%时样品的超导性能达到最佳值; Cheng等^[21,22]通过研究发现, 采用TSMTG方法制备的GdBCO单畴超导块材的超导性能在

* 国家自然科学基金(批准号: 51572164)、教育部科学技术研究重大项目(编号: 311033)和西安航空学院校级科研项目(编号: 2016KY1213)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cwnanmao@126.com

BaCuO₂ 掺杂量为 0.2 mol% 时可达到最佳值, 该样品在液氮温度下的磁悬浮力可达到 12 N, 同时研究还发现, 随着 BaCuO₂ 掺杂量的增加, 样品的 T_m 逐渐降低, 这与 Shi 等 [20] 的研究结果一致.

在上述研究工作的基础上, 本实验采用改进后的顶部籽晶熔渗生长 (M-TSIG) 方法, 通过在固相先驱粉体中掺杂不同含量的 BaO 来有效地抑制样品中的 Gd/Ba 替换, 并对 GdBCO 超导样品的宏观形貌及超导性能做了深入的分析研究.

2 实验内容

首先采用传统的固相烧结方法在空气气氛中制备相纯的 BaCuO₂ 先驱粉体. 在制备固相先驱粉前, 先将无水 BaO 用球磨机进行研磨, 使其粒度大小均匀, 之后将 Gd₂O₃, BaCuO₂ 以及 BaO 粉体按照质量比 1 : 1.2 : x 进行混合 (其中, x 分别为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 单位: wt%), 即为固相先驱粉, 并分别称量 15 g 该混合粉体压制直径为 20 mm 的圆柱形坯块, 作为固相源先驱块; 液相采用 Y 基液相源 [23,24], 即将 Y₂O₃, CuO 以及 BaCuO₂ 按照 1 : 6 : 10 的摩尔比用球磨机混合均匀, 然后称量 20 g 的液相源粉体压制直径为 30 mm 的圆柱形坯块作为液相源先驱块; 最后再称量 2.5 g 的 Yb₂O₃ 粉体并压制与液相源先驱块直径等大的圆柱形坯块, 作为支撑块以防止液相流失.

每一个样品先驱块都由三个圆柱形的坯块按照轴对称方式叠放而成, 最上面的是固相源先驱块, 接着是液相源先驱块, 然后把支撑块放置于液相源先驱块的正下方位置; 再在固相源先驱块上表面的正中心位置放置一挑选好的 NdBCO 籽晶, 使其 ab 面平行于固相源先驱块上表面; 将其整体放置于 Al₂O₃ 基板上并用几个等高的 MgO 单晶块将其隔开; 最后将准备好的样品先驱块放置于自行研制的高温晶体生长炉内. 将样品置于 900 °C 下保温 20 h, 使固相源充分反应并生成 Gd₂11 相, 然后以 60 °C/h 升温到 T_m , 并保温 2 h, 在本实验中采用两步慢冷法进行生长, 先将其快速降温至 T_1 , 接着以 1 °C/h 的速率降至 T_2 , 然后以 0.3 °C/h 慢冷至 T_3 , 完成单畴 GdBCO 样品的生长后以 120 °C/h 的速率快速降至室温, 其热处理程序如图 1 所示. 最后, 将生长好的样品在氧气环境下从 430 °C 到 350 °C

慢冷 200 h 进行渗氧, 经这样处理的样品在临界温度以下具有超导性能. 随后, 用三维磁力-磁场测试装置 [25] 在液氮环境 (77 K) 下对样品的磁悬浮力及捕获磁通进行测量, 同时用振动样品磁强计 (VSM) 对样品的临界温度进行测试和分析.

3 实验结果与分析

3.1 GdBCO 样品熔化温度 T_m 的确定

根据现有的文献报道 [20-22], 不同含量的 Ba²⁺ 的添加会改变样品的包晶反应温度, 因此, 为了使样品充分完成生长并长成单畴 GdBCO 超导块材, 用差热分析仪 (DTA) 对掺杂有不同含量的 BaO 的小试样分别做了初步测试.

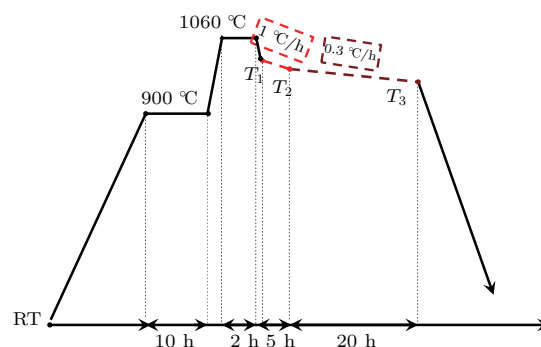
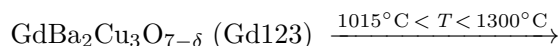


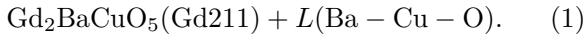
图 1 制备 GdBCO 超导块材的热处理程序图

Fig. 1. The heat treatment pattern for GdBCO crystal growth used in this study.

分别取 10 mg 0 wt%, 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt% 的含 BaO 的固相先驱粉体, 压制小试样固相坯块, 然后再分别取 15 mg 的 Y 基液相源并分别压坯作为液相源先驱坯块, 再将固相源先驱块试样放于液相源上表面, 并统一放置在 DTA 分析仪专用的 Al₂O₃ 坩埚内, 在大气环境下以 20 °C/min 从 600 °C 加热到 1100 °C 并保温 10 min, 然后以同样的速率降温至 600 °C, 其中所选参照物为 α -Al₂O₃ 粉体.

图 2 是小试样在升温过程中的 DTA 曲线图, 可以清楚地看到, 在整个升温反应过程中, 每个样品均出现了四个吸热峰. 其中第一个吸热峰的出现是由于液相中大量的 BaCuO₂ 溶化而引起的; 第三个峰是 Y 基液相在高温下 Y123 相熔解发生包晶反应而形成的; 第四个峰是样品中 GdBa₂Cu₃O_{7- δ} (Gd123) 相熔解而引起的吸热峰, 其反应方程如下:





同时, 从图中还可以观察到, 随着 BaO 掺杂量的逐步增加, Gd123 相的包晶反应温度逐渐降低, 其温度范围在 1046 °C—1054 °C 之间, 如图 2 内插图所示. 因此, 为了制备出良好的单畴织构的 GdBCO 样品, 一般确定其热处理程序的最高温度应该高于包晶反应, 这是为了使 Gd123 相在高温下充分发生熔化从而重新进行片层状结构生长, 所以在本实验中对所有样品的最高温度确定为 1060 °C.

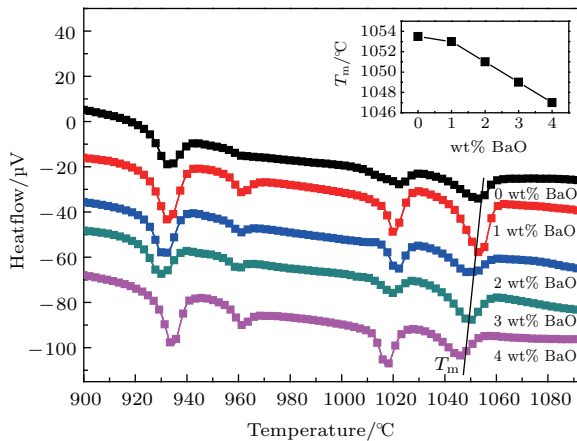
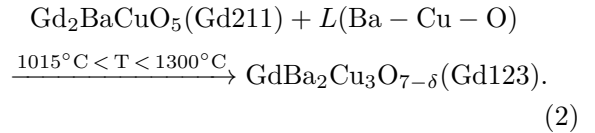


图 2 (网刊彩色) 不同比例 BaO 添加的 GdBCO 小试样品的 DTA 图
Fig. 2. (color online) DTA results of the tiny samples with different ratio of BaO doping.

对于 DTA 分析而言, 当小试样品在最高温度保温一段时间后, 接着以 20 °C/min 的速率匀速降温, 其降温过程中生成的放热峰如图 3 所示. 从图中可以看出, 在熔化慢冷的整个过程中, 处于半熔

融状态样品中的 $\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$ (Gd211) 固相粒子与液相的 BaCuO 化合物发生包晶反应, 最终生成织构生长的 GdBCO 超导体, 从所有的小试样品来看, 其发生包晶反应的温度在 1021 °C—1012 °C 区间. 从传统晶体生长的角度看, 包晶反应可以用下式表述 [26]:



从该反应式可以看出, GdBCO 样品发生的包晶反应与其在半熔融态下发生的熔化反应是互逆反应. 通过 DTA 的测试, 可以指导我们对这种掺杂有 BaO 的 GdBCO 样品的热处理程序进行细微的调整. 对于不同的样品, 其热处理程序中两步慢冷生长的温度 T_1 , T_2 以及 T_3 分别列于表 1.

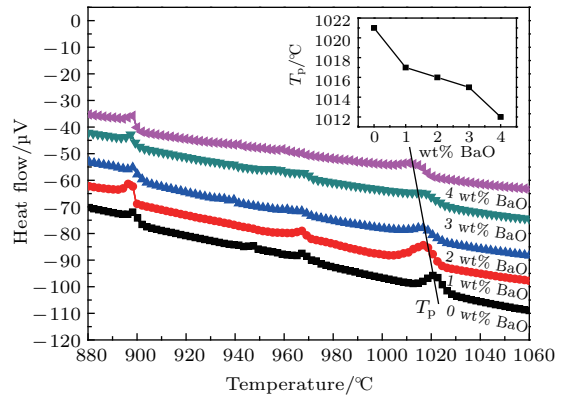


图 3 (网刊彩色) 不同比例 BaO 添加的 GdBCO 小试样品的 DTA 图
Fig. 3. (color online) DTA results of the tiny samples with different ratio of BaO doping.

表 1 样品生长中的热处理程序的具体参数及样品的超导性能的值

Table 1. The specific parameters and sample heat treatment procedure samples in the value of the growth of the superconductors.

| | Temperature | | | Superconducting properties | | | |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| | $T_1/^\circ\text{C}$ | $T_2/^\circ\text{C}$ | $T_3/^\circ\text{C}$ | F/N | B_{tr}/T | T_c/K | $\Delta T/\text{K}$ |
| 0.5 wt% | 1028 | 1023 | 1005 | 30.26839 | 0.29255 | — | — |
| 1 wt% | 1028 | 1023 | 1005 | 28.06625 | 0.32198 | 92.05 | 4 |
| 1.5 wt% | 1027 | 1022 | 1004 | 30.31768 | 0.29199 | — | — |
| 2 wt% | 1027 | 1022 | 1004 | 33.60396 | 0.32407 | 92.53 | 3.3 |
| 2.5 wt% | 1026 | 1021 | 1003 | 35.32523 | 0.31735 | — | — |
| 3 wt% | 1026 | 1021 | 1003 | 33.09775 | 0.31447 | 92.81 | 3 |
| 3.5 wt% | 1025 | 1020 | 1002 | 32.81698 | 0.32177 | — | — |
| 4 wt% | 1025 | 1020 | 1002 | 35.02053 | 0.32653 | 93.14 | 3.5 |

3.2 BaO 掺杂量对样品表面生长形貌的影响

图4是制备的掺杂有不同含量BaO的GdBCO超导块材的宏观形貌图. 从图中可以看到, 8个样品的表面均有清晰的十字花纹(“X”

形状)形成, 显示出金属光泽, 并且没有任何随机成核出现, 即每个样品都长成了良好的单畴形貌, 满足其基本特征. 由此可见, 掺杂有0.5 wt%—4 wt%的BaO并不影响GdBCO超导块材的宏观形貌, 均能生长成为单畴的GdBCO超导块材.

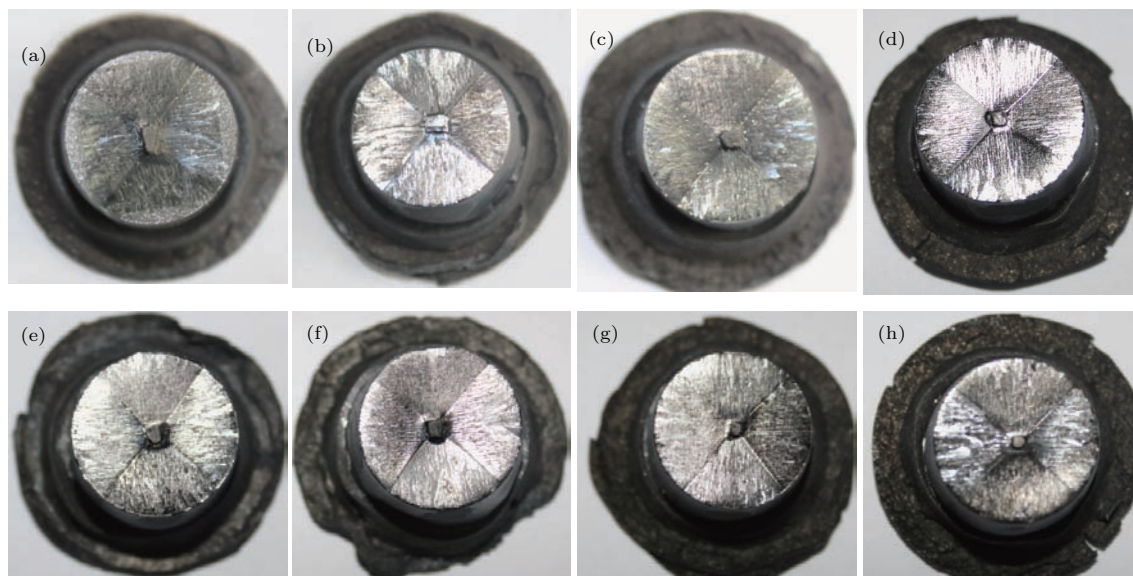


图4 不同比例BaO添加的GdBCO超导样品的表面形貌图 (a) 0.5 wt%; (b) 1.0 wt%; (c) 1.5 wt%; (d) 2.0 wt%; (e) 2.5 wt%; (f) 3.0 wt%; (g) 3.5 wt%; (h) 4.0 wt%

Fig. 4. The top surface view of the GdBCO samples grown with different ratio of BaO doping: (a) 0.5 wt%; (b) 1.0 wt%; (c) 1.5 wt%; (d) 2.0 wt%; (e) 2.5 wt%; (f) 3.0 wt%; (g) 3.5 wt%; (h) 4.0 wt%.

3.3 BaO 掺杂量与样品磁悬浮力的关系

利用陕西师范大学超导实验室自主研发的三维磁力-磁场测试装置对掺杂不同含量BaO的GdBCO超导样品在零场冷(ZFC), 77 K液氮温度的条件下进行了磁悬浮力测试, 如图5所示. 从图中可以看出, 掺杂不同含量BaO的GdBCO超导样品的磁悬浮力(F)虽然存在着一定的差异, 但是波动范围并不大, 其中获得最大磁悬浮力的是掺杂量为2.5 wt%的GdBCO样品, 值为35.33 N, 磁悬浮力密度为11.25 N/cm²; 获得最小磁悬浮力的是掺杂量为1 wt%的GdBCO样品, 值为28.07 N, 磁悬浮力密度为8.94 N/cm².

引起这种磁悬浮力波动的原因有两点: 其一是在磁悬浮力测试的过程中, 需要使样品与永久磁体NdFeB之间的距离尽可能地小, 一般需要达到0.5 mm左右, 而在测试的过程中有可能没有使样品与永磁体间的距离达到0.5 mm, 从而使测得的数据值偏小, 例如掺杂量为1 wt%和1.5 wt%的样

品; 其二是由于当BaO掺杂进样品中后, 没能有效地抑制Gd123 ss的产生, 使得高温固溶体依然存在于GdBCO样品内部, 即使其表面的单畴形貌良好, 但是内部的微观结构可能存在某种程度的偏析, 从而使得磁悬浮力减小.

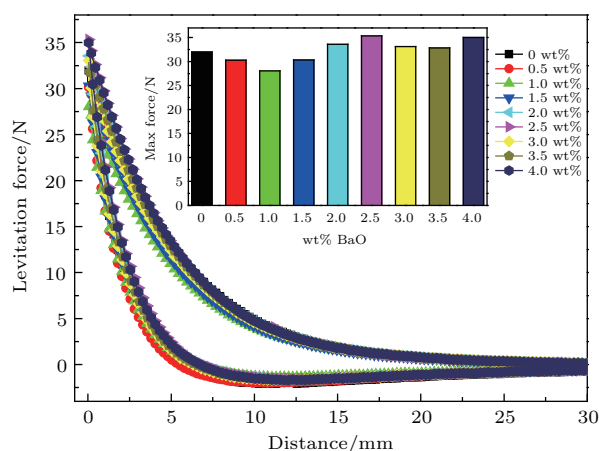


图5 (网刊彩色) 不同比例BaO添加的GdBCO超导样品的磁悬浮力曲线

Fig. 5. (color online) The levitation force of the GdBCO samples grown with different ratio of BaO doping.

3.4 BaO 掺杂量对样品捕获磁量密度的影响

采用静磁场充磁方式分别对不同含量BaO掺杂的GdBCO超导块材在77 K液氮温度条件下进行充磁, 充磁磁场 $B = 0.5$ T, 对抛光样品表面的捕获磁通密度用霍尔探头进行了测试, 霍尔探头的扫描范围为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 霍尔探头与样品表面的高度约为 1 mm [27,28]. 图6(a)—(i) 分别对应的是不同的掺杂样品上表面所测试的三维捕获磁通密度分布图. 从图中可以看到, 掺杂有不同含量的BaO的GdBCO样品的捕获磁通密度均呈现出中心对称的圆锥形包络面, 并只形成一个单峰, 这表明该组样品均具有较好的磁单畴特征; 同时, 该

组样品的捕获磁场与磁悬浮力数据相似, 也具有一定的波动性, 其在沿直径方向上的最大捕获磁通的分布如图7所示, 从图中可以直观地看到, 所有样品的捕获磁通密度 (B_{tr}) 均在 0.3 T ($0.28\text{--}0.32 \text{ T}$) 附近波动, 每个样品的捕获磁通密度的大小见表1. 由于所加的外界磁场为 0.5 T , 以捕获的磁场 0.3 T 为例, 通过公式

$$\frac{\text{捕获磁场}}{\text{外界磁场}} = \text{捕获效益} \quad (3)$$

计算得出掺杂有不同含量BaO的GdBCO超导样品的捕获效率基本上在60%以上, 说明这组样品具有很好的捕获磁通能力, 即当BaO的掺杂在 $2 \text{ wt}\%$ — $4 \text{ wt}\%$ 之间时, GdBCO超导块材具有较强的捕获能力.

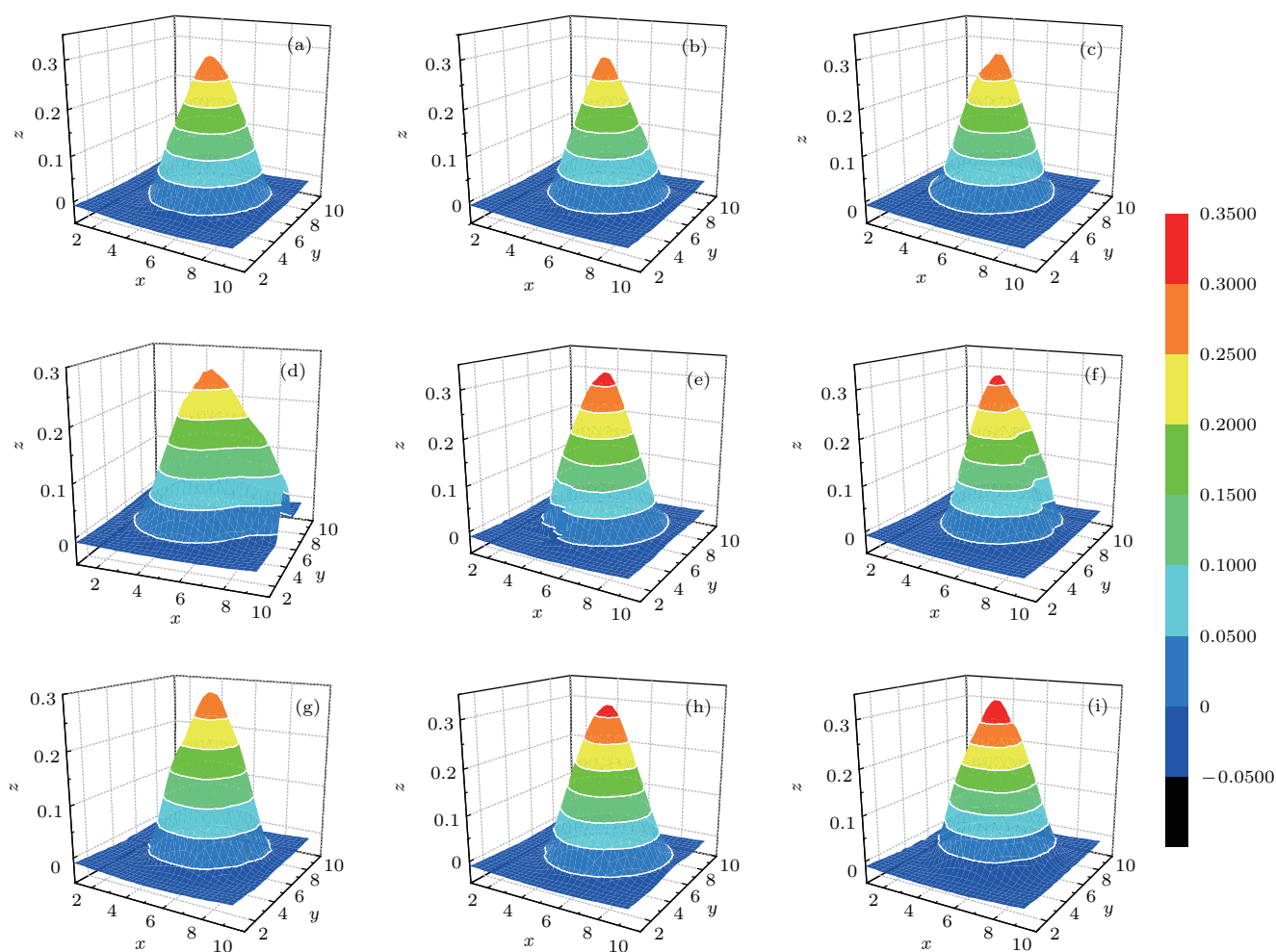


图6 (网刊彩色) 不同比例BaO添加的GdBCO超导样品的捕获磁通密度分布 (a) 0 wt%; (b) 0.5 wt%; (c) 1.0 wt%; (d) 1.5 wt%; (e) 2.0 wt%; (f) 2.5 wt%; (g) 3.0 wt%; (h) 3.5 wt%; (i) 4.0 wt%

Fig. 6. (color online) The trapped field of the GdBCO samples grown with different ratio of BaO doping: (a) 0 wt%; (b) 0.5 wt%; (c) 1.0 wt%; (d) 1.5 wt%; (e) 2.0 wt%; (f) 2.5 wt%; (g) 3.0 wt%; (h) 3.5 wt%; (i) 4.0 wt%.

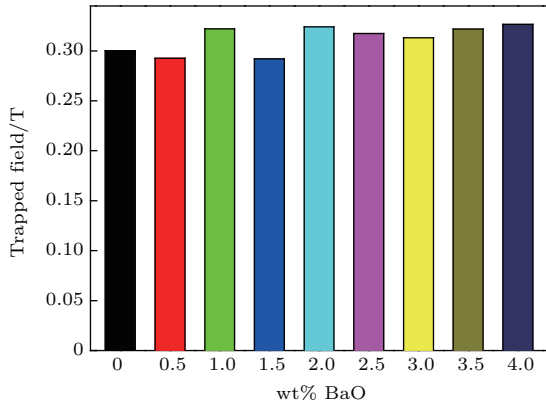


图7 (网刊彩色) 不同比例 BaO 添加的 GdBCO 超导样品的最大捕获磁通密度条形图

Fig. 7. (color online) The maximum trapped field of the GdBCO samples grown with different ratio of BaO doping.

3.5 BaO 掺杂量对样品临界温度的影响

从 BaO 掺杂的 GdBCO 超导块材系列样品中, 分别选取掺杂为 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% 和 4 wt% 的 4 组样品进行了临界温度测试. 如图 8 所示, 分别从每个样品中的 a1, a2, c1 和 c2 四个不同位置取大小

约为 2 mm × 2 mm × 2 mm 的小试样, 采用 VSM 在 0.01 T 的外界磁场条件下进行临界温度 (T_c) 的测试 (所加磁场与小试样品的 c 轴方向平行).

从图 8 可以看出, 对于掺杂不同含量 BaO 的 GdBCO 超导样品在其 4 个不同位置 T_c 的大小不尽相同. 图 9 (a) 所示为掺杂量为 1 wt% BaO 的样品, 可以看到, 样品的 4 个不同位置的与其他掺杂量的样品相比, 其 T_c 都明显偏小, 样品的平均临界温度的起始转变温度约为 92 K, 并且样品的转变宽度很大, 以 c2 位置为例, 该小试样品的起始转变宽度为 92.5 K, 转变宽度 $\Delta T = 4$ K 左右, 说明此处样品的性能略差.

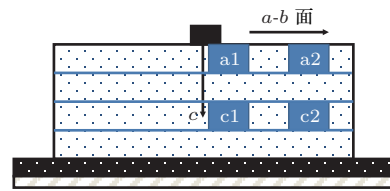


图8 (网刊彩色) 在单畴 GdBCO 超导样品的纵切面上取样示意图

Fig. 8. (color online) The schematic of the specimens cut from the single domain GdBCO samples.

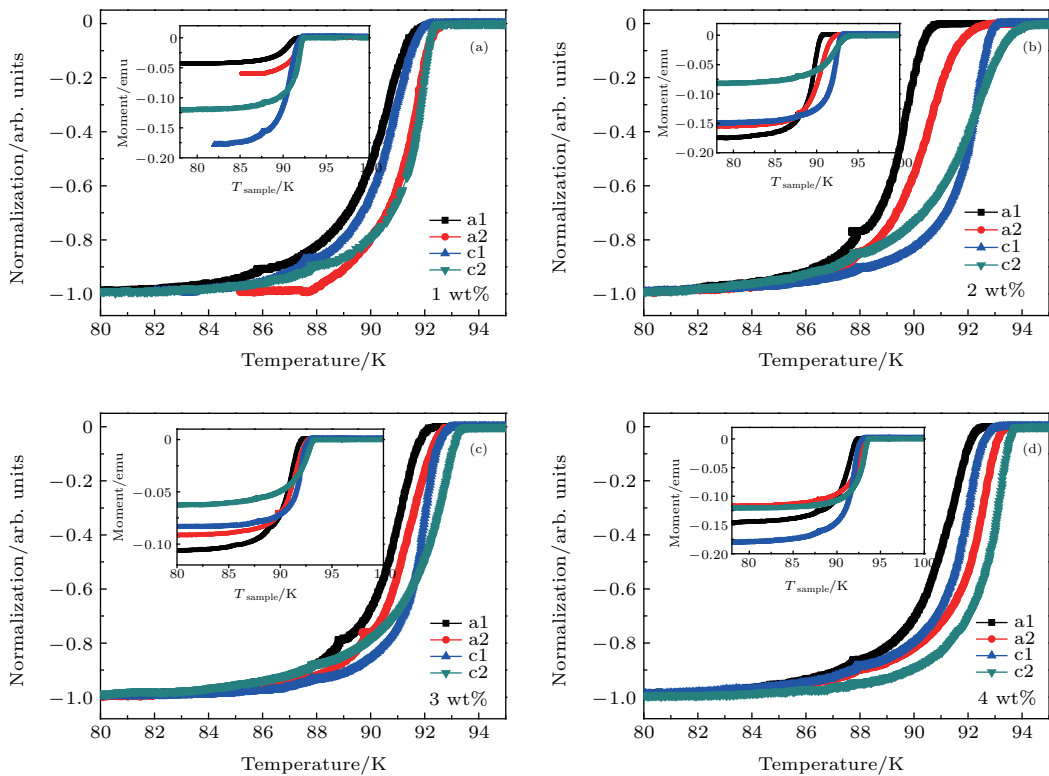


图9 (网刊彩色) 不同含量 BaO 掺杂样品的临界转变温度对比 (a) 1 wt%; (b) 2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%
Fig. 9. (color online) The comparison of the T_c in the different GdBCO samples: (a) 1 wt%; (b) 2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%.

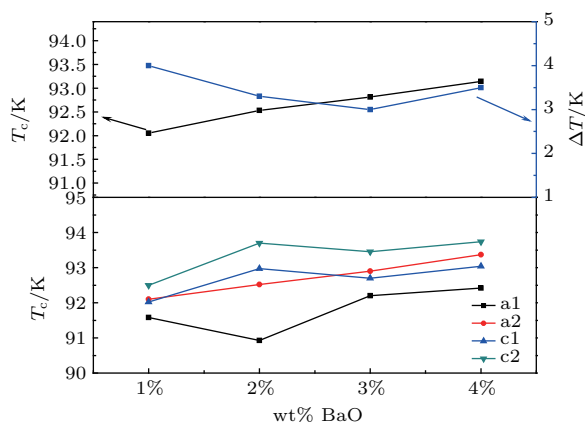


图10 (网刊彩色) 不同含量BaO掺杂样品的临界转变温度和转变宽度对比

Fig. 10. (color online) The comparison of the T_c and ΔT in the different GdBCO samples.

分别对这4组样品的临界温度做了对比,如图10所示,其中上半部分是4个样品的平均临界温度 T_c 和转变宽度的对比,下半部分是4个样品四个不同位置的 T_c 的对比.对于4个掺杂量不同的样品而言,从4个不同位置的 T_c 对比可以发现,其共同点主要有:1) a1位置处的临界温度 T_c 最低;2) c2位置处的临界温度 T_c 最高;3)随着在径向上与NdBCO籽晶距离的增加,小试样品的临界温度 T_c 有所提高.同时,对不同掺杂量样品的平均临界温度 T_c 和平均转变宽度 ΔT 也分别做了对比,从图中可以看到,随着BaO掺杂量的逐渐增加,样品的平均临界温度 T_c 也呈现出递增的趋势,从92.05 K (1 wt% BaO掺杂)增加到93.14 K (4 wt% BaO掺杂);样品的平均转变宽度随着BaO掺杂量的不同有所波动,随着掺杂量的增加,平均转变宽度呈现出先减小再增大的趋势,当掺杂量为1 wt%时,样品的平均转变宽度约为4 K,当掺杂量增加到3 wt%时,样品的平均转变宽度达到最小值,约为3 K,但是当掺杂量为4 wt%时,样品的平均转变宽度又上升到3.3 K.因此,通过对掺杂不同含量BaO的GdBCO超导样品临界温度的分析,对其性能总结如下:

$$\begin{aligned}
 T_c(a1) &< T_c(a2, c1) < T_c(c2), \\
 T_c(a2) &> T_c(a1), T_c(c2) > T_c(c1), \\
 T_c(1 \text{ wt}\%) &< T_c(2 \text{ wt}\%) < T_c(3 \text{ wt}\%) \\
 &< T_c(4 \text{ wt}\%).
 \end{aligned}$$

综上所述,即使当BaO的含量提高到4 wt%后,GdBCO超导样品的临界转变温度有了较大的

提高,约为93.14 K,其转变宽度也同时随着上升,但是这一结果并不影响样品的宏观超导性能.因此,结合对样品宏观的磁悬浮力和捕获磁通密度的测试可发现,当BaO的掺杂量为2 wt%—4 wt%之间时,样品具有较高的超导性能,包括样品宏观的磁悬浮力、捕获磁通密度以及样品的临界转变温度.

4 结 论

本文成功地制备出了不同比例的BaO粉体掺杂的系列单畴GdBCO超导块材,实验结果表明:样品的最高熔化温度 T_m 和包晶反应温度 T_p 随着样品中的BaO掺杂量的增加,在生长过程中的 T_m 和 T_p 都呈现出减小的趋势;当BaO的掺杂量在0.5 wt%—4 wt%时,样品的上表面光滑并且具有明显的扇区,表现出典型的单畴样品的形貌;当掺杂量在2 wt%—4 wt%之间时,样品表现出较强的磁悬浮力和捕获磁通密度,同时样品的平均临界转变温度(T_c)随着BaO的掺杂量的增加呈现出逐渐增大的趋势.

参考文献

- [1] Durrell J H, Dennis A R, Jaroszynski J, Ainslie M D, Palmer K G, Shi Y H, Campbell A M, Hull J, Strasik M, Hellstrom E E 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 082001
- [2] Muralidhar M, Tomita M, Suzuki K, Jirsa M, Fukumoto Y, Ishihara A 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 045033
- [3] Shi Y, Babu N H, Iida K, Yeoh W K, Dennis A R, Pathak S K, Cardwell D A 2010 *Physica C* **470** 685
- [4] Cheng L, Li T Y, Yan S B, Sun L J, Yao X, Puzmiak R 2011 *J. Am. Cer. Soc.* **94** 3139
- [5] Nariki S, Sakai N, Murakami M 2002 *Supercond. Sci. Technol.* **15** 648
- [6] Nitadori T, Ichiki T, Misono M 1988 *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **61** 621
- [7] Nariki S, Sakai N, Murakami M 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** S126
- [8] Xu K, Zhou D F, Li B Z, Hara S, Deng Z G, Izumi M 2015 *Physica C* **510** 54
- [9] Miyachi K, Sudoh K, Ichino Y, Yoshida Y, Takai Y 2003 *Physica C* **392** 1261
- [10] Dai J, Zhao Z, Xiong J 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 815
- [11] Taskin A, Lavrov A, Ando Y 2006 *Phys. Rev. B* **73** 121101
- [12] Tsvetkov D, Sereda V, Zuev A Y 2010 *Solid State Ionics* **180** 1620
- [13] Wu H, Kramer M J, Dennis K W, McCallum R W 1997 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **7** 1731

- [14] Li B, Zhou D, Xu K, Tsuzuki K, Zhang J C, Izumi M 2014 *Physica C* **496** 28
- [15] Shi Y, Babu N, Iida K, Cardwell D A 2008 *Physica C* **468** 1408
- [16] Li B, Xu K, Hara S, Zhou D F, Zhang Y F, Izumi M 2012 *Physica C* **475** 51
- [17] Xu C, Hu A, Sakai N, Izumi M, Izumi H 2005 *Physica C* **426** 613
- [18] Xu C, Hu A, Sakai N, Izumi M, Izumi H 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** 229
- [19] Xu C, Hu A, Sakai N, Izumi M, Izumi H 2005 *Physica C* **417** 77
- [20] Shi Y, Babu N H, Iida K, Cardwell D A 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **17** 2984
- [21] Cheng X F 2010 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Shaanxi Normal University) (in Chinese) [程晓芳 2010 博士学位论文 (西安: 陕西师范大学)]
- [22] Cheng X F, Yang W M, Li G Z, Fan J, Guo X D, Zhu W J 2010 *Chin. J. L. Temp. Phys.* **2** 150 (in Chinese) [程晓芳, 杨万民, 李国政, 樊静, 郭晓丹, 朱维君 2010 低温物理学报 **2** 150]
- [23] Li G Z, Yang W M, Liang W, Li J W 2011 *Mater. Lett.* **65** 304
- [24] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Chen S L 2013 *Physica C* **492** 129
- [25] Yang W M, Chao X X, Shu Z B, Zhu S H, Wu X L, Bian X B, Liu P 2006 *Physica C* **347** 445
- [26] Shiohara Y, Endo A 1997 *A Mater. Sci. Eng. R: Reports* **19** 1
- [27] Guo L P, Yang W M, Guo Y X, Chen L P, Li Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077401 (in Chinese) [郭莉萍, 杨万民, 郭玉霞, 陈丽平, 李强 2015 物理学报 **64** 077401]
- [28] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Yang P T 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 035004

Influences of BaO doping on the properties of single domain GdBCO bulk superconductors*

Wang Miao^{1)†} Yang Wan-Min²⁾ Yang Peng-Tao²⁾ Wang Xiao-Mei¹⁾
Zhang Ming¹⁾ Hu Cheng-Xi¹⁾

1) (School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

2) (School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(Received 2 July 2016; revised manuscript received 19 August 2016)

Abstract

In this work, a series of single domain GdBCO bulk superconductors with different ratios of BaO addition in the solid phase pellet, is successfully fabricated to inhibit the Gd/Ba substitution in the growth process by the modified top seeded infiltration growth (M-TSIG) technique. The reaction of the precursor powders, the growth morphology, the magnetic levitation force (F), the trapped magnetic flux (B_{tr}) and critical temperature (T_c) of the single domain GdBCO bulk superconductors are investigated in detail. First, the differential thermal analysis is performed on the precursor powders of 10 mg solid phase pellet (containing various amounts of BaO) and 15 mg liquid phase pellet in order to investigate the melting temperature (T_m) and the peritectic temperature (T_p) of the GdBCO superconductor system. The results show that the melting point of the precursor powder decreases by nearly 8 °C as the BaO composition increases from 0 wt% to 4 wt%, which leads to T_p decreasing with BaO content increasing. Second, the top view morphologies of the GdBCO samples are also discussed. All of the samples exhibit clear, fourfold growth sector boundaries on their top surfaces, and spontaneous satellite grains are observed in none of these samples. It can be seen that the different ratio of BaO addition cannot affect the growth morphology of the single domain GdBCO bulk superconductor. And thirdly, the levitation force and trapped field of each of the samples are measured under a zero field cooling state at 77 K by the three-dimensional magnetic force and field device. The values of the levitation force for the samples are slightly different for different ratios of BaO additions. The largest levitation force is 35 N, which is obtained in the sample with 2.5 wt%, and the smallest one is 28 N in the sample with 1 wt% BaO addition. And also, the trapped field of the sample can be attributed simply to the variation in the pinning strength. It can be obviously seen that these values fluctuate between 0.28 T and 0.32 T for these samples. Finally, the critical temperatures of the samples are measured by the vibrating sample magnetometer with an external magnetic field of 0.01 T. The samples exhibit outstanding features of high T_c , which indicates that these samples are of good quality and the Gd/Ba substitution is inhibited by the BaO addition. The above results show that the values of melting temperature (T_m) and peritectic temperature (T_p) of the samples have the decrease tendencies, and the superconducting properties of the samples (such as F , B_{tr} and T_c) can be improved to a certain extent when the amount of BaO added ranges from 2 wt% to 4 wt%, which are very helpful in inhibiting the Gd/Ba substitution and fabricating the high-quality single domain GdBCO bulk superconductors.

Keywords: single domain GdBCO bulk superconductor, levitation force, trapped flux field, critical temperature

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv, 61.72.-y, 74.81.Bd

DOI: 10.7498/aps.65.227401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51572164), the Keygrant Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 311033), and the Scientific Research Project of Xi'an Aeronautical University, China (Grant No. 2016KY1213).

† Corresponding author. E-mail: cwnanmao@126.com