

BaO 掺杂对单畴 GdBCO 超导块材性能的影响 (二)

王妙 邬华春 杨万民 杨芄焘 王小梅 郝大鹏 党文佳 张明 胡成西

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

Wang Miao Wu Hua-Chun Yang Wan-Min Yang Peng-Tao Wang Xiao-Mei Hao Da-Peng Dang Wen-Jia Zhang Ming Hu Cheng-Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 167401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.167401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.167401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非掺杂锐钛矿相 TiO_2 铁磁性的第一性原理研究

Ferromagnetism of undoped anatase TiO_2 based on the first-principles calculations

物理学报.2017, 66(5): 056101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.056101>

Al 和 O 间隙原子对 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 热力学性质影响的第一性原理计算

Effects of the doping of Al and O interstitial atoms on thermodynamic properties of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$:first-principles calculations

物理学报.2017, 66(1): 016103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.016103>

BaO 掺杂对单畴 GdBCO 超导块材性能的影响

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

物理学报.2016, 65(22): 227401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.227401>

纳米微粒 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 掺杂对单畴超导块材 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 性能的影响

Effect of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles doped on the properties of single domain $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high-temperature superconductors

物理学报.2015, 64(24): 247401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247401>

晶粒细化对 MgB_2 超导临界电流密度的作用

Grain refinement influence on the critical current density of the MgB_2 superconductor sample

物理学报.2014, 63(6): 067401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.067401>

BaO掺杂对单畴GdBCO超导块材性能的影响(二)*

王妙^{1)†} 邬华春¹⁾ 杨万民²⁾ 杨芃焘²⁾ 王小梅¹⁾ 郝大鹏¹⁾ 党文佳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)

(2017年2月8日收到; 2017年6月7日收到修改稿)

为了有效地抑制GdBCO超导块材在生长过程中出现的Gd/Ba替换现象, 在前期工作的基础上, 本文采用顶部籽晶熔渗生长工艺, 通过在固相先驱粉中添加不同含量的BaO粒子成功地制备出了一系列高性能的单畴GdBCO超导块材, 并且对样品的微观形貌以及临界电流密度进行了研究和分析. 结果表明, 随着BaO掺杂量的增加, 样品中的 $Gd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_{7-\delta}$ 固溶体(Gd123ss)相呈现出减少的趋势, 并生成了纳米量级的Gd123ss, 这对GdBCO超导样品中存在的Gd/Ba替换起到了很好的抑制作用, 使得样品中的 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Gd123)超导相有所增加; 同时当样品中BaO的添加量在2 wt%—4 wt%之间时, 样品的临界电流密度在一定程度上得到了有效提高.

关键词: 单畴GdBCO超导块材, 微观形貌, 临界电流密度, 磁通钉扎

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv, 61.72.-y, 91.60.Ed

DOI: 10.7498/aps.66.167401

1 引言

由于单畴REBCO(RE=稀土元素)超导块材具有较强的磁通俘获能力、大的磁悬浮力以及良好的自稳定磁悬浮特性, 在磁悬浮轴承、微型强磁场永磁体和储能飞轮等方面有着广泛的应用前景^[1-5]. 然而, 由于GdBCO超导块材样品在生长过程中极易发生Gd/Ba替换, 且在样品生长过程中易生成 $Gd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_{7-\delta}$ (Gd123ss)固溶体相, 从而进一步影响样品中超导相 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Gd123)晶体的形成和长大, 使得GdBCO样品的超导性能下降, 影响其实用化进程^[6,7].

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^[8-10], 其中, 在制备样品的先驱粉体中掺杂一定比例的富钡相粒子是简单有效的方法之一. 即为了有效地提高GdBCO样品中Gd123超导相的存在, 人为地添加不同含量的含有 Ba^{2+} 的化合物, 使得Gd/Ba替换现象能够得到有效抑制和减少, 其化学反应式如下:



因此, 本文在上述研究的基础上, 采用改进后的顶部籽晶熔渗生长(TSIG)工艺, 通过在固相先驱粉体中掺杂不同含量的BaO粒子来有效地抑制GdBCO样品生长过程中出现的Gd/Ba替换现象, 并成功地制备出了一系列单畴GdBCO超导块材.

在我们前期的工作中已经对掺杂不同含量BaO的单畴GdBCO超导块材的宏观形貌、磁悬浮力、俘获磁通密度及临界温度等超导特性进行

* 国家自然科学基金(批准号: 51572164, 11647050)、教育部科学技术研究重大项目(批准号: 311033)和西安航空学院校级科研项目(批准号: 2016KY1213)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cwnanmao@126.com

了研究和详细的分析^[11],但是对于其中的生长机理并没有进行深入的探讨.因此,本文在文献^[11]工作的基础上,对不同比例BaO粒子掺杂的单畴GdBCO超导块材的微观结构和临界电流密度进行了更加深入的分析研究.

2 实验内容

采用固态烧结法制备相纯的BaCuO₂先驱粉体.首先将Gd₂O₃, BaCuO₂以及BaO粉体按照质量比1:1.2:*x*的进行混合(其中,*x*分别为1, 2, 3, 4, 单位: wt%),即为固相先驱粉,并压制成圆柱形坯块作为固相源先驱块;液相采用Y基液相源^[12,13],将Y₂O₃, CuO以及BaCuO₂按照1:6:10的摩尔比进行混合,然后压制成圆柱形坯块并作为液相源先驱块;最后再将Yb₂O₃粉体压制成与液相源先驱块等直径的圆柱形坯块,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,并采用改进后的TSIG法进行生长,热处理程序可参考文献^[11].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,使之完成四方相向正交相的转变,从而具有超导性能.

3 实验结果与分析

3.1 样品的宏观形貌

图1是不同比例BaO掺杂的GdBCO超导块材的宏观形貌图.从图中可以清楚地看出,不同掺杂样品的表面均泛着金属光泽,伴随有明显的十字花纹图形,并且没有任何随机现象出现,这体现出了GdBCO超导样品的典型特征,说明样品具有良好的织构和单畴性特征.由此可见,掺杂有1 wt%—4 wt%的BaO对样品的宏观形貌没有任

何影响,均能生长成为表面宏观形貌较好的单畴GdBCO超导块材.

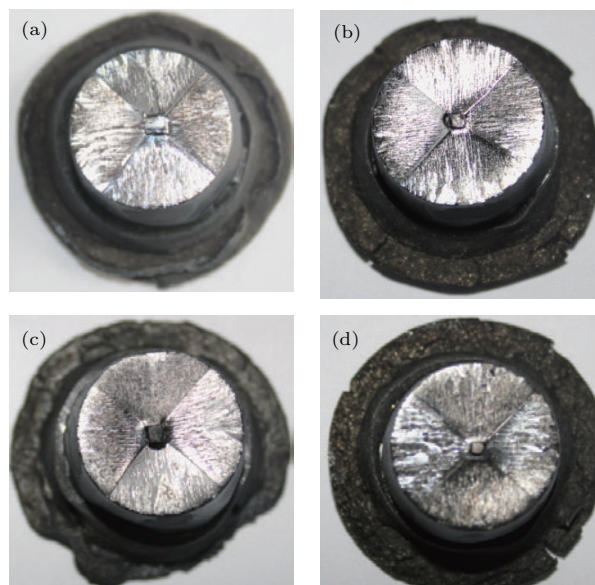


图1 (网刊彩色) 不同比例BaO添加的单畴GdBCO超导块材宏观形貌图^[11] (a) 1 wt%; (b) 2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%

Fig. 1. (color online) The top views of the single domain GdBCO bulk superconductors with different BaO doping: (a) 1 wt%; (b) 2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%^[11].

3.2 样品的微观结构

为了深入分析和研究系列BaO掺杂的单畴GdBCO超导块材的微观结构和局部超导性能,分别在样品上表面距籽晶约5 mm的位置切割大小约为2 mm × 2 mm × 2 mm的小试样品,并对小试样品的上表面进行抛光处理,然后进行了环境扫描电镜(ESEM)测试.

图2所示为掺杂量为1 wt% BaO的GdBCO超导样品的小试样品中不同位置处的微观形貌图.从图中可以看到,样品中存在大量的大小、形状各不相同的片层状的物相,即Gd123ss,在图2(a)和图2(b)中用椭圆进行了标注,从图中可以清楚地看到,生成的这种物相沿着样品的 $a-b$ 面向四周横向生长并连成一片,而且Gd123ss的生长没有方向性,这一点与Gd123超导相不同.

为了进一步分析生长过程中Gd/Ba的替换量,对图2(b)中Gd123基体中的任意一点进行点扫式的能谱测试(EDX),如图3(a)所示.从能谱测试得到的数据可以看到,图3(a)中Gd123基体上的Gd, Ba, Cu三者的原子占有量分别为12.12 at%, 22.47 at%, 33.24 at%,即得到的原子个数比例为

Gd : Ba : Cu = 1.09 : 2.02 : 3. 由此可以看出, 在 1 wt% BaO 掺杂的 GdBCO 样品中基体的物相可认为是 Gd123 超导相, 样品中所存在的 Gd/Ba 替换现象通过 BaO 粒子的添加已经得到了很好的抑

制和改善.

为了测试数据的普遍性, 对图 2(c) 中 Gd123 基体中的任意一点也进行了点扫式的 EDX 测试, 如图 3(b) 所示.

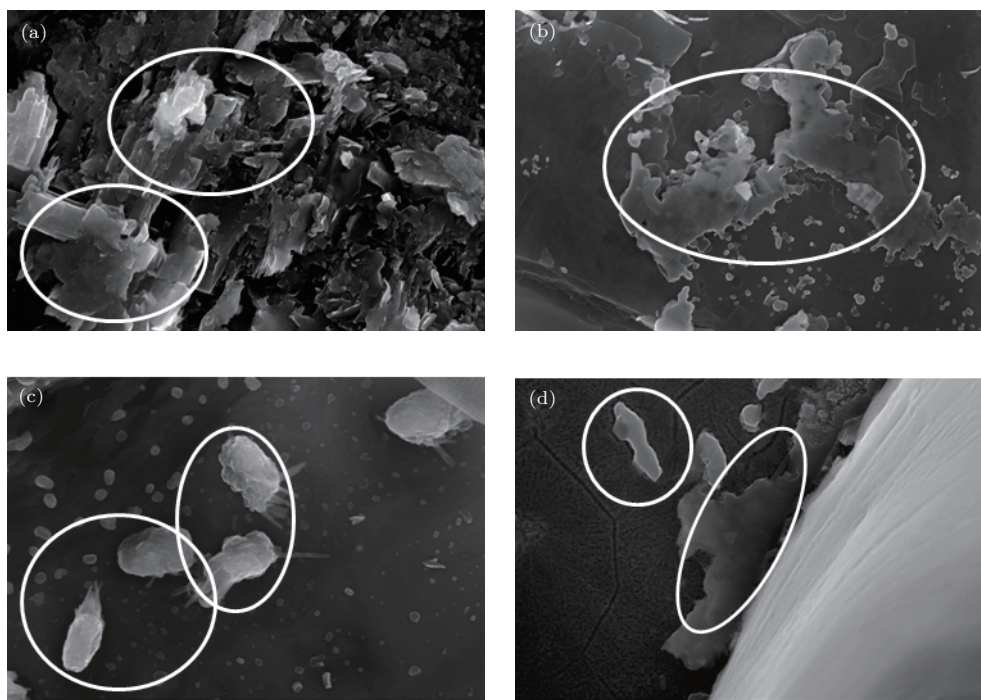


图 2 (网刊彩色) 掺杂量为 1 wt% 的 GdBCO 超导样品中的未知物相的微观形貌图

Fig. 2. (color online) The microstructure of the solid solution phase in the GdBCO bulk superconductor with 1 wt% BaO doping.

同样, 从能谱测试得到的数据可以看到, 图 3(b) 中 Gd123 基体上的 Gd, Ba, Cu 三者的原子占有量分别为 8.82 at%, 17.38 at%, 25.58 at%, 换算后得到的原子个数比例为 Gd : Ba : Cu = 1.03 : 2.04 : 3. 由此也可以看出, 在 1 wt% BaO 掺杂的 GdBCO 样品中 Gd/Ba 的替换现象通过 BaO 粉体的添加已经得到了很好的抑制和改善. 该结果与文献结果相一致^[14].

在图 2 中已经发现, BaO 掺杂的 GdBCO 样品中存在着大量的附着在基体之上固溶体 Gd123ss. 为了探究该物相的属性, 同样选取点扫方式对其分别进行了能谱测试, 如图 4 所示.

从能谱测试得到的数据可以看到, 图 4(a) 中的未知物相中任一点的 Gd, Ba, Cu 三者的原子占有量分别为 12.01 at%, 11.19 at%, 23.01 at%, 换算后得到的原子比为 Gd : Ba : Cu = 1.566 : 1.459 : 3. 由此可以看出, 该成分不同于 Gd123 超导相的 Gd : Ba : Cu = 1 : 2 : 3, 而是一种缺钡相成分.

对于该物相, 目前已有的文献中并未见报道. 为了数据的可靠性, 同样重新选取位置进行点扫式能谱测试, 如图 4(b) 所示. 从图中可以看到, 该处的物相中 Gd, Ba, Cu 三者的原子占有量分别为 13.8 at%, 17.88 at%, 30.32 at%, 即它的原子比为 Gd : Ba : Cu = 1.365 : 1.769 : 3. 同样可以看出, 该处的物相也是一种缺钡的成分. 而且该物相与 GdBCO 样品中存在的第二相粒子 Gd211 不同, 该物质是继 Gd211 后的另一种新的粒子, 因此, 对于该物相的确定还需要做进一步研究.

通过能谱分析可以清晰地看到, 当在 GdBCO 超导块材中掺杂 1 wt% 的 BaO 粉体时, 此时样品中的 Gd/Ba 替换已经得到了很好的抑制, 即 Gd123 基体中的物相成分基本上满足 Gd : Ba : Cu = 1 : 2 : 3. 然而, 在该样品中同时还发现了大量的未知物相的存在, 该物相的成分远远偏离 Gd123 基体的成分, 是一种缺钡的全新的一种物相(本文中称其为 Gd123 衍生物相, 用 Gd123ss 表示), 该物相

在生长的过程中也会发生团聚现象,如图2(c)和图2(d)所示. 这一点类似于样品中的第二相粒子,即非超导相Gd123粒子的生成过程.

对于在样品中Gd123基体表面上生成的这种衍生物相可这样理解: 在GdBCO超导样品中生成Gd123相的过程中,由于Gd³⁺和Ba²⁺的原子直径相差不大,易于在液相中析出置换固溶体

Gd123ss, 而BaO粒子的添加可以有效地抑制这种置换反应,即发生Gd_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_{7-δ} + BaO → GdBa₂Cu₃O_{7-δ}反应,但这种置换易引起液相成分的进一步偏析,从而形成一种缺钡的液相,该液相很容易在样品生长的过程中被Gd123基体所俘获或者形成残留物附着在Gd123基体之上从而发生团簇现象.

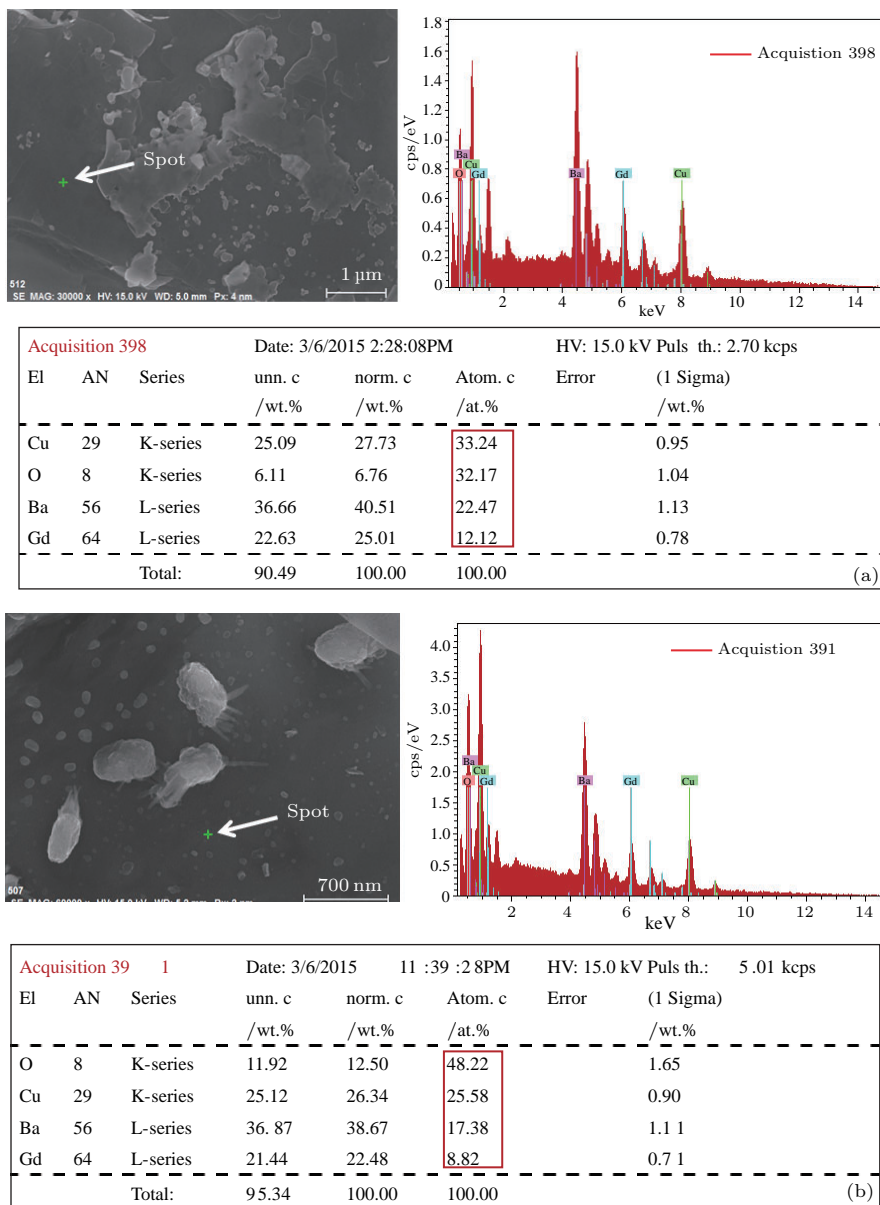


图3 (网刊彩色) 掺杂量为1 wt%的GdBCO超导样品中Gd123基体的能谱分析图

Fig. 3. (color online) The EDX of the Gd123 matrix in the GdBCO bulk superconductor with 1 wt% BaO doping.

图5是掺杂量为2 wt%的样品微观形貌图. 由图可见, 样品中形成的Gd123ss物相粒子呈现分散状分布, 可以看出, 相比1 wt%掺杂样品, Gd123ss物相粒子的密度增加, 但是粒子的平均尺寸较小, 即呈现出不同程度的粒子细化现象. 通过ImageJ

软件^[15]可以近似地得到图5(a)中粒子的平均尺寸约为50—120 nm之间. 这一结果说明, 在掺杂BaO粒子的单畴GdBCO超导块材中生成了一种纳米状新的物相粒子, 而根据RE123超导体中的第二相非超导相粒子的磁通钉扎机制理论可知^[16,17],

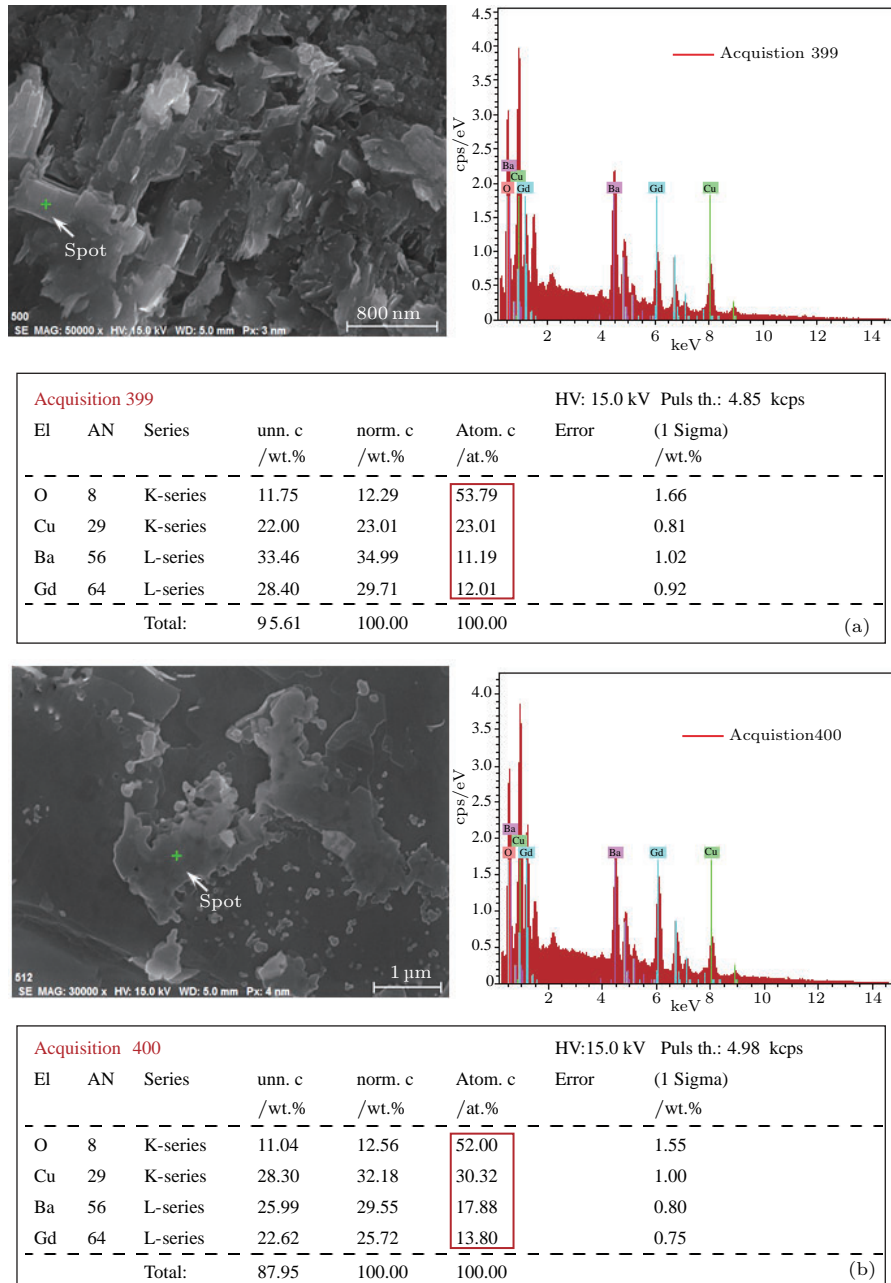


图 4 (网刊彩色) 掺杂量为 1 wt% 的 GdBCO 超导样品中的未知物相的能谱分析图

Fig. 4. (color online) The EDX of the unknow phase in the GdBCO bulk superconductor with 1 wt% BaO doping.

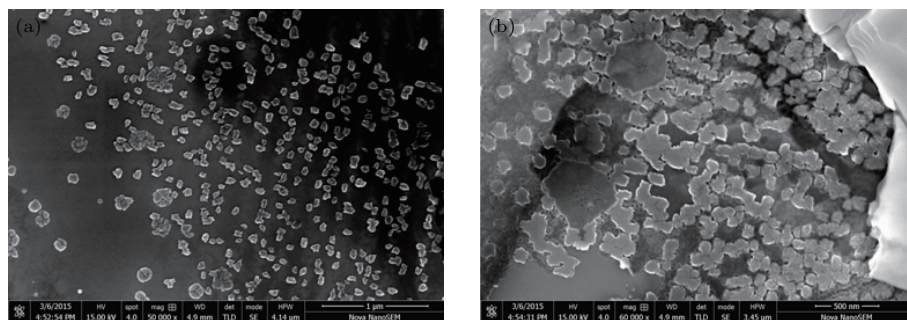


图 5 (网刊彩色) 掺杂量为 2 wt% 的 GdBCO 超导样品中的未知物相的微观形貌图

Fig. 5. (color online) The microstructure of the unknow phase in the GdBCO bulk superconductor with 2 wt% BaO doping.

磁通钉扎力密度与第二相非超导相粒子数密度成正比关系,即单畴REBCO超导块材中存在的纳米粒子可以有效地成为样品中的磁通钉扎中心,从而进一步提高样品的磁通钉扎能力和超导性能.因此,这些纳米状的新物相粒子在GdBCO超导块材样品中同样也起到了磁通钉扎中心的作用,进一步提高了GdBCO超导样品的磁悬浮力和俘获磁通密度.

图6所示为掺杂量为3 wt% BaO的GdBCO超导样品中的Gd123ss的微观形貌图和能谱分析图.从图中可以看到,该衍生相在样品中的分布情况与掺杂量为2 wt%的样品中的情况类似,即都呈现出均匀的纳米尺寸的点状分布特点.此外,还有一点不同,即在3 wt%的BaO掺杂的样品中,纳米粒子存在着两种明显不同的尺寸,可通过ImageJ软件对图6中的两种纳米粒子的平均尺寸进行近似估算,分别为20—50 nm和180—300 nm两种尺度分布.样品中存在20—50 nm尺寸量级的Gd123衍生相相对要少一些,对于这类有两种不同尺寸的Gd123衍生相的形成可以借用Oswald熟化理论^[18,19]进行解释,即Gd123ss衍生物相粒子在样品中进行生长的同时,有一部分粒子由于会经历Oswald熟化反应过程,在此过程中,较小的Gd123ss粒子可发生自我溶解过程并消失在液相中,从而容易在样品中形成更小尺寸的20—50 nm纳米状的Gd123ss粒子,而溶解的Gd123ss粒子会

迁移至较大的粒子处(小尺寸粒子的Gibbs自由能高于大粒子,致使其在液相中的浓度偏高,从而容易向大粒子区域进行扩散),使得大粒子进一步粗化长大,形成180—300 nm尺度的Gd123ss衍生物相粒子.

为了进一步定量分析掺杂量为3 wt%的GdBCO超导样品中形成的Gd123ss,对图6中的任意一点分别进行点扫式的能谱测试.从能谱测试得到的数据可以看到,该处物相中的Gd, Ba, Cu三者的原子占有量分别为8.88 at%, 16.14 at%, 24.53 at%,经换算其原子比为Gd : Ba : Cu = 1.086 : 1.974 : 3,即, Gd, Ba, Cu三者的原子比例约为1 : 2 : 3,可近似地认为其是Gd123超导相.由此可见,这种Gd123ss衍生物相的成分并不是单一不变的,而是随着BaO掺杂量的增加呈现出有规律的变化.随着单畴GdBCO超导样品中BaO含量的逐渐增加,样品中的Gd123ss衍生物相所表现出的缺钡现象逐渐得到了抑制和改善,其成分也接近于Gd123的成分比例.

通过对该处的Gd123ss的定量分析可以看到,当在GdBCO超导块材中掺杂3 wt%的BaO粉体时,此时样品中的Gd123ss衍生物相的成分比例接近于Gd123的成分,即样品中存在的Gd123超导相在逐渐增加,这为提高GdBCO超导样品的超导性能提供了重要的理论依据.

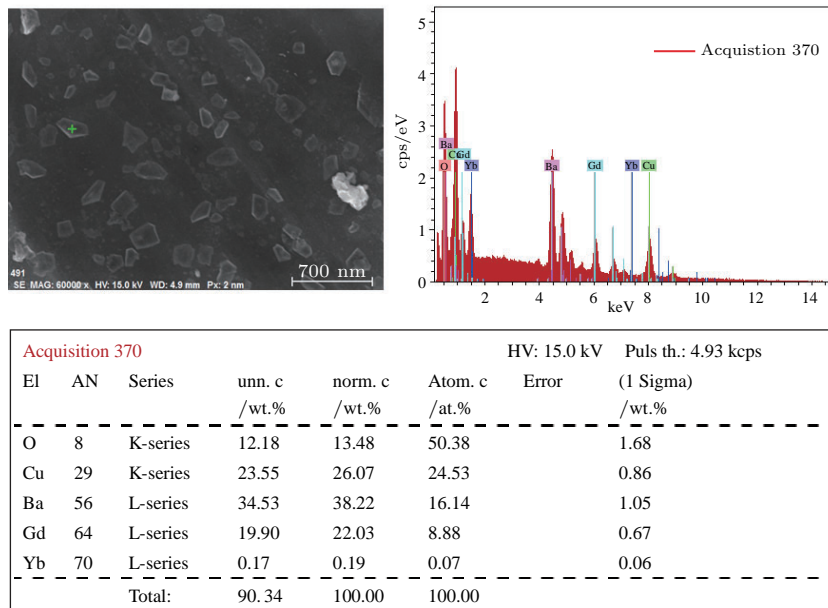


图6 (网刊彩色) 掺杂量为3 wt%的GdBCO超导样品中的未知物相的能谱分析图
 Fig. 6. (color online) The EDX of the unknown phase in the GdBCO bulk superconductor with 3 wt% BaO doping.

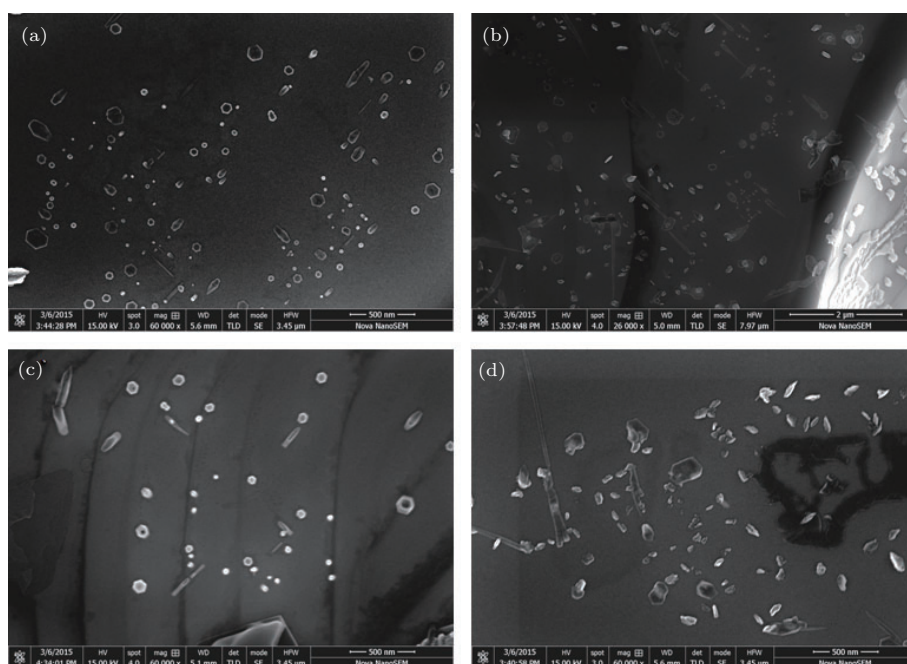


图7 (网刊彩色) 掺杂量为4 wt%的GdBCO超导样品中的未知物相的微观形貌图

Fig. 7. (color online) The microstructure of the unknown phase in the GdBCO bulk superconductor with 4 wt% BaO doping.

图7是掺杂量为4 wt%的超导样品中的Gd123ss衍生物相的微观结构形貌图,从图中可以清楚地看到,样品中所形成的纳米尺寸的Gd123衍生相粒子均匀地分散在Gd123基体上,而且分布密度相比掺杂量为2 wt%和3 wt%的样品明显减少,但是同样分布较为均匀.通过ImageJ软件可以近似地得到图中粒子的平均尺寸约在30—100 nm之间.由于Gd123基体与Gd123ss衍生物相的Gd, Ba, Cu三个原子的成分比极为相似(如图6所描述),而且对于如此小的纳米粒子很难用EDX进行精准的测量,因此有必要选取一个与Gd123衍生相的Gd, Ba, Cu三个原子的成分有差别的粒子进行对比测量.

为了对掺杂4 wt%的样品中Gd123ss衍生物相进行定量分析,选取Gd211粒子附近的Gd123衍生物相进行EDX能谱分析测试.如图8所示,采用线扫描(line scanning)的方式进行测试.扫描线的方式如图中所示,可以看到,图中较大的白色粒子是Gd211粒子,在该条扫描线上有若干个纳米尺寸的Gd123ss衍生物相粒子.通过对这一条扫描线上的成分分析图可以看到,Gd, Ba和Cu三个原子的成分呈现出两种分布:一种是Gd211粒子

所对应的峰谱,该峰谱呈现的正是Gd211粒子的组分比;而另一种分布就是Gd211粒子外面的Gd123基体的峰谱.可以看到,Gd123基体与经过纳米尺寸的Gd123ss衍生相粒子的峰谱值并没有什么区别,也就是说,采用该方法不能对如此小的纳米粒子的组分进行精准的定量分析.

但是,从前面1 wt%—3 wt%掺杂的GdBCO超导样品中的Gd123ss衍生物相成分分析,可以认为在4 wt%BaO掺杂的GdBCO样品中存在的Gd123ss衍生相的原子比基本也可判定为 $Gd : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$.从图7(a)和图7(c)中也可以看到,样品中产生的Gd123衍生相粒子的形状已经发生了细微的变化,与图2、图5和图6中的Gd123衍生物有所不同,图7中产生的纳米粒子的形状规则,基本上都呈正六边形的片层状结构生长,与Gd123超导相的晶体生长类似.即当BaO掺杂量为4 wt%时,GdBCO超导块材中的Gd/Ba替换现象得到抑制的同时,样品中存在的Gd123超导相也逐渐增多,这也进一步证明了GdBCO超导块材中的衍生物相逐渐减少,且超导相呈现出明显增加的趋势,从而使得样品的超导性能得到提高.

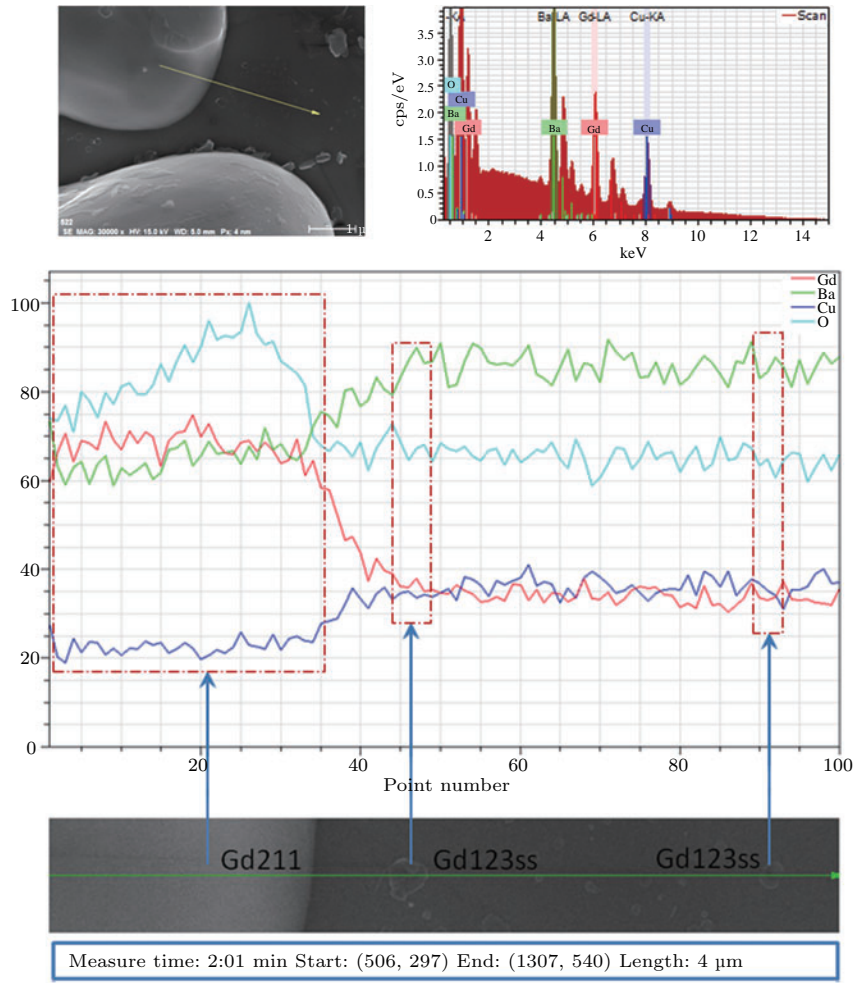


图8 (网刊彩色) 掺杂量为4 wt%的GdBCO超导样品中的未知物相的能谱分析图

Fig. 8. (color online) The EDX of the unknow phase in the GdBCO bulk superconductor with 4 wt% BaO doping.

3.3 临界电流密度 J_c

利用振动样品磁强计 (VSM) 在 77 K 温度下对不同比例 BaO 掺杂的小试样品磁滞回线进行了测量, 测量时所加的外部磁场与样品的 c 轴方向平行, 测量的磁滞回线如图 9 内插图所示. 对于样品的临界电流密度采用 Bean 模型^[20] 进行计算, 计算公式如下:

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a\left(1 - \frac{a}{3b}\right)V},$$

其中, $\Delta M(\text{emu})$ 为测试过程中增加磁场与降低磁场所对应的同一磁场的磁矩之差; $a(\text{mm})$ 和 $b(\text{mm})$ 分别对应的是小样品 ab 面上的尺寸 ($a < b$), $V(\text{mm}^3)$ 是小样品的体积.

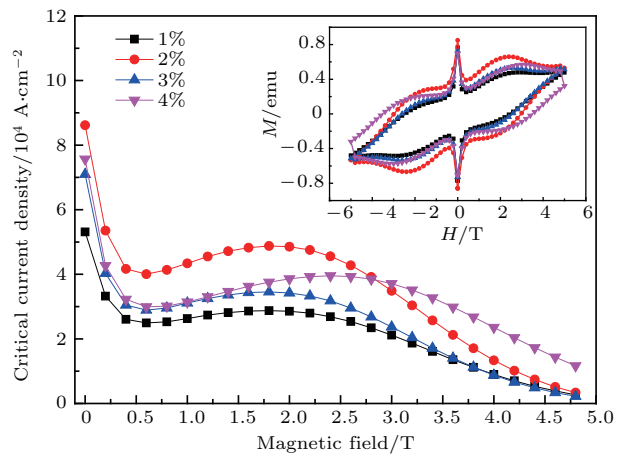


图9 (网刊彩色) 不同比例 BaO 添加的 GdBCO 超导样品的临界电流密度

Fig. 9. (color online) The J_c -B properties at 77 K for the samples with different ratio of BaO doping.

从图9中可以看出,掺杂不同比例BaO粒子的单畴GdBCO超导块材的临界电流密度存在着一定的波动性,其中获得最大临界电流密度的是掺杂量为2%的GdBCO样品,其值为 8.6×10^4 A/cm²;获得最小临界电流密度的是掺杂量为1%的GdBCO样品,其值为 5.3×10^4 A/cm².这表明,当BaO的掺杂量为2 wt%时,GdBCO超导块材的临界电流密度达到最大值,也就是说,适当比例的BaO粒子掺杂可以有效地提高单畴GdBCO超导块材的临界电流密度,这也进一步验证了合适比例的BaO粒子掺杂在一定程度上可以改善和提高单畴GdBCO超导块材的性能.

4 结 论

本文成功地制备出了不同比例的BaO粒子掺杂的系列单畴GdBCO超导块材.实验结果表明:样品的表面宏观生长形貌与BaO粒子的掺杂量没有明显的关系,所有的样品均能表现出典型的单畴形貌特征;对样品的微观结构分析表明,随着单畴GdBCO超导样品中BaO含量的逐渐增加,样品中存在的Gd123ss衍生物相所表现出的缺钡现象逐渐得到了抑制和改善,其成分也接近于Gd123的成分比例,并且随着BaO掺杂量的增加,样品中生成了纳米状的Gd123ss衍生物相粒子,其可以为样品提供有效地磁通钉所中心,从而进一步提高样品的磁通钉扎力及超导性能.

参考文献

- [1] Deng Z, He D, Zheng J 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **25** 3600106
- [2] 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
- [3] Wang J, Wang S, Zheng J 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **19** 2142
- [4] Yang P T, Yang W M, Wang M, Li J W, Guo Y X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 117403
- [5] Zhang C P, Wang J R 2003 *Rare Metals Lett.* **7** 1 (in Chinese) [张翠萍, 汪京荣 2003 稀有金属快报 **7** 1]
- [6] Nitadori T, Ichiki T, Misono M 1988 *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **61** 621
- [7] Nariki S, Sakai N, Murakami M 2002 *Supercond. Sci. Technol.* **15** 648
- [8] Xu C, Hu A, Sakai N, Izumi M, Izumi H 2005 *Physica C* **426** 613
- [9] Shi Y, Babu N, Iida K, Cardwell D A 2008 *Physica C* **468** 1408
- [10] Tsvetkov D, Sereda V, Zuev A Y 2010 *Solid State Ionics* **180** 1620
- [11] Wang M, Yang W M, Yang P T, Wang X M, Zhang M, Hu C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 227401 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 杨芃焘, 王小梅, 张明, 胡成西 2016 物理学报 **65** 227401]
- [12] Li G Z, Yang W M, Liang W, Li J W 2011 *Mater. Lett.* **65** 304
- [13] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Chen S L 2013 *Physica C* **492** 129
- [14] Shi Y, Babu N H, Iida K, Cardwell D A 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **17** 2984
- [15] <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>[2017-2-8]
- [16] Murakami M, Gotoh S, Fujimoto H, Yamaguchi K, Koshizuka N, Tanaka S 1991 *Supercond. Sci. Technol.* **4** 1S
- [17] Tang T W, Qiu F J, Wu D J, Xu K X 2015 *J. Inorg. Mater.* **30** 9 (in Chinese) [唐天威, 邱傅杰, 吴董杰, 徐克西 2015 无机材料学报 **30** 9]
- [18] Izumi T, Nakamura Y, Shiohara Y 1993 *J. Cryst. Growth.* **128** 757
- [19] Izumi T, Nakamura Y, Shiohara Y 1993 *J. Mater. Res.* **8** 1240
- [20] Bean C 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 250

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

Wang Miao^{1)†} Wu Hua-Chun¹⁾ Yang Wan-Min²⁾ Yang Peng-Tao²⁾ Wang Xiao-Mei¹⁾
Hao Da-Peng¹⁾ Dang Wen-Jia¹⁾ 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 8 February 2017; revised manuscript received 7 June 2017)

Abstract

In order to inhibit the Gd/Ba substitution in the growth process effectively, a series of single domain GdBCO bulk superconductors with different ratios of BaO additions in the solid phase pellet is successfully fabricated by the modified top seeded infiltration growth technique on the basis of previous research. In the present work, the macroscopic feature, microstructure and critical current density (J_c) of the single domain GdBCO bulk superconductor are investigated in detail. From the top view of the surface of the single domain GdBCO bulk superconductor, all of the samples exhibit clearly the 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 (from 1 wt% to 4 wt%) cannot affect the growth morphology of the single domain GdBCO bulk superconductor. At the same time, for observations of the microstructure, the small test specimens of dimensions about $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ are cut from the top surface of the single domain GdBCO bulk superconductors with different BaO doping ratios and at a distance 5 mm away from the seed, then microstructure analysis is performed in the cleavage plane of the test specimen by using scanning electron microscope. For the sample with 1 wt% BaO doping, the derivative phase of GdBCO (Gd123ss) is found in the Gd123 superconducting matrix. To detect the atomic ratio of the Gd123ss, energy dispersive X-ray spectrometry measurement is carried out on the samples. It is shown that the atomic ratio of the Gd123ss phase is $\text{Gd} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1.566 : 1.459 : 3$, which proves successfully that the Gd123ss is a kind of phase with lack of barium. With the increase of BaO doping, the phenomenon of lack of barium is effectively controlled and, the nano Gd123ss phase is generated as the flux pinning centre which can be used to improve the superconducting properties in the growth process of GdBCO bulk superconductor. This results can be concluded that the proper doping ratio can control the element substitution effectively, and the solid solution phase can be greatly reduced to some extent, and the critical current can be improved to a certain extent when the amount of BaO added ranges from 2 wt% to 4 wt%, which is very helpful in inhibiting the Gd/Ba substitution and fabricating the high-quality single domain GdBCO bulk superconductors.

Keywords: single domain GdBCO bulk superconductor, microstructure, critical current density, flux pinning

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv, 61.72.-y, 91.60.Ed

DOI: 10.7498/aps.66.167401

* 1Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51572164, 11647050), 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