

# 辅助永磁体磁化方式对单畴 GdBCO 超导块材捕获 磁场分布及其磁悬浮力的影响\*

马俊<sup>1)2)</sup> 杨万民<sup>2)†</sup> 王妙<sup>2)</sup> 陈森林<sup>2)</sup> 冯忠岭<sup>1)2)</sup>

1) (青海师范大学物理系, 西宁 810008)

2) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2013年4月7日收到; 2013年8月15日收到修改稿)

通过对方形永磁体和方形辅助永磁体在液氮温度下对 GdBCO 超导体磁化后超导磁悬浮力的测量, 研究了两种组态中方形辅助永磁体对超导体的磁化方式对单畴 GdBCO 超导块材磁场分布及其磁悬浮力的影响. 结果发现, 方形辅助永磁体的下表面和超导体上表面保持在同一个水平面上, 磁化进程中方形辅助永磁体在 GdBCO 超导体上表面水平面内沿直径方向的位置  $x$  从  $-15\text{ mm}$  增加到  $+15\text{ mm}$  时, 超导磁悬浮力大小与超导体的磁化方式有着密切关系 (以  $Z = 0.1\text{ mm}$  为例): 1) 当方形辅助永磁体 N 极垂直向上且场冷后去掉辅助永磁体时, 超导体最大磁悬浮力先从  $16.7\text{ N}$  增大到  $23.1\text{ N}$ , 再减小到  $16.6\text{ N}$ ; 2) 当方形辅助永磁体 N 极垂直向下且场冷后去掉辅助永磁体时, 超导体最大磁悬浮力先从  $17.7\text{ N}$  减小到  $7\text{ N}$ , 再增加到  $17.6\text{ N}$ ; 3) 两种组态中最大磁悬浮力不相等, 而且与零场冷下的最大磁悬浮力 ( $17.1\text{ N}$ ) 也不同. 这些结果说明: 只有通过科学合理地设计超导体和永磁体的组合方式, 才能获得较高的磁场强度, 有效地提高超导体的磁悬浮力特性, 该结果对促进超导体的应用具有重要的指导意义.

**关键词:** 单畴 GdBCO, 永磁体, 捕获磁场, 磁悬浮力

**PACS:** 74.25.-q, 74.72.-h, 74.25.Ha

**DOI:** 10.7498/aps.62.227401

## 1 引言

高温超导体因具有高的磁悬浮力和良好自稳定磁悬浮特性, 使得其在超导磁悬浮轴承<sup>[1,2]</sup>、储能飞轮<sup>[3,4]</sup>和磁悬浮运输系统<sup>[5-7]</sup>等领域具有广泛的应用前景. 对于实际应用而言, 提高超导体和永磁体之间的磁悬浮力显得尤为重要. 超导体和永磁体之间的磁悬浮力主要依赖于超导材料的性能和永磁体磁场分布, 超导体磁悬浮力与超导块材的半径<sup>[8]</sup>、晶粒取向<sup>[9]</sup>、厚度<sup>[10,11]</sup>、冷却温度、冷却高度、磁化程度<sup>[12,13]</sup>、所用永磁体的磁场强度<sup>[14]</sup>和磁场分布<sup>[15-18]</sup>等参数密切相关. 文献[19]研究了  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  氧化物掺杂对单畴 YBCO 超导块材磁悬浮力的影响, 文献[20]就不同粒径

纳米  $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{CuBiO}_y$  相掺杂对顶部籽晶溶渗法单畴 YBCO 超导块材性能的影响进行了研究, 结果表明, 氧化物掺杂在样品中生成纳米粒子, 而纳米磁通钉扎中心的引入可有效提高超导块材的磁悬浮性能. 文献[21]就永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和永磁体之间的磁悬浮力进行了研究, 文献[22]研究了条状永磁体的组合形式及间距对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响, 文献[23]研究了辅助永磁体的引入方式对单畴 GdBCO 超导块材磁场分布及其磁悬浮力的影响, 文献[24]研究了不同场冷进程下单畴 YBCO 超导块悬浮力和吸引力特征. 这些研究结果表明, 磁悬浮力与超导材料的性能相关外, 还与永磁体的组合方式、磁场分布、磁体的引入方式和场冷时捕获磁场紧密相关. 这些研究主要针对单个超导体与单个永磁体或超导体与组合磁体间的

\* 国家自然科学基金(批准号: 51167016, 50872079)、教育部科学技术研究重大项目(批准号: 311033)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: GK201101001, GK201305014)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn

悬浮力特性, 而且当永磁体和超导体在竖直方向沿轴线呈轴对称放置时, 样品的捕获磁场呈轴对称分布. 磁悬浮力测量中, 随着悬浮间距变化, 样品捕获磁场的强度随之变化, 导致磁悬浮力大小不同. 而有关辅助永磁体在非轴对称情况下磁化方式对超导块材捕获磁场分布和磁悬浮力影响方面的研究尚无报道. 现有的超导磁悬浮实验表明<sup>[25-27]</sup>, 超导体的磁悬浮力会随着时间的增加而衰减, 悬浮高度会随着外加荷载的增加而降低, 但当外加荷载移除后, 磁悬浮系统并不能恢复到原来的高度, 这些问题严重地阻碍了超导体的应用进程. 众所周知, 永磁体之间的相互作用力强、刚度好<sup>[28]</sup>, 但无法实现稳定的磁悬浮; 超导体与永磁体之间的磁悬浮力较大, 磁悬浮稳定性好<sup>[5]</sup>, 但磁悬浮刚度较差. 为了有效利用永磁体间较大的磁悬浮力、良好的刚性以及超导体良好的自稳定磁悬浮特性, 通过对方形永磁体和方形辅助永磁体在液氮温度下对 GdBCO 超导体磁化后超导磁悬浮力的测量, 研究了两种不同组态中辅助永磁体对超导体的磁化方式对单畴 GdBCO 超导块材磁场分布及其磁悬浮力的影响, 并取得了明显的效果. 这些结果对促进超导体的应用具有重要的指导意义.

## 2 实验

实验所用的单畴 GdBCO 超导块材 (直径为 20 mm, 厚度为 3 mm) 是从通过顶部籽晶熔融织构方法 (MTG) 制备的<sup>[29]</sup> 样品 (直径为 20 mm, 厚度为 12 mm) 上切割下来. 所用方形永磁体 (PM1) 和方形辅助永磁体 (PM2) 的尺寸均为 10 mm × 10 mm × 10 mm, 表面中心最大磁场约 0.5 T. 为了能够有效地研究辅助永磁体对超导体的磁化方式对单畴 GdBCO 超导块材磁场分布及其磁悬浮力的影响, 我们用该超导块材和这两个永磁体设计了 4 种实验方案, 如图 1 所示. 其中图 1(a), (b) 分别表示在液氮温度下方形辅助永磁体 PM2 的 N 极垂直向上 PM2↑-HTSC 和 PM2 的 N 极垂直向下 PM2↓-HTSC 对 GdBCO 超导体进行磁化的两种组态, 磁化后超导体变成捕获磁场的超导磁体 (SCPM), 相应的超导磁体 (SCPMs) 分别为 SCPM↑ 和 SCPM↓, 在磁化进程中使 PM2 的下表面和超导体上表面保持在同一个水平面上, PM2 在 GdBCO 超导体上表面水平面内沿直径方向移动或停止在任何位置, 如:  $x = -15, -10, -5, 0, 5, 10$  和 15 mm; 图 1(c), (d) 分别表示在图 1(a) 中超导体进行磁化并去掉 PM2 后方形永磁体 (PM1) 与超导磁体 SCPM↑ 在液氮温

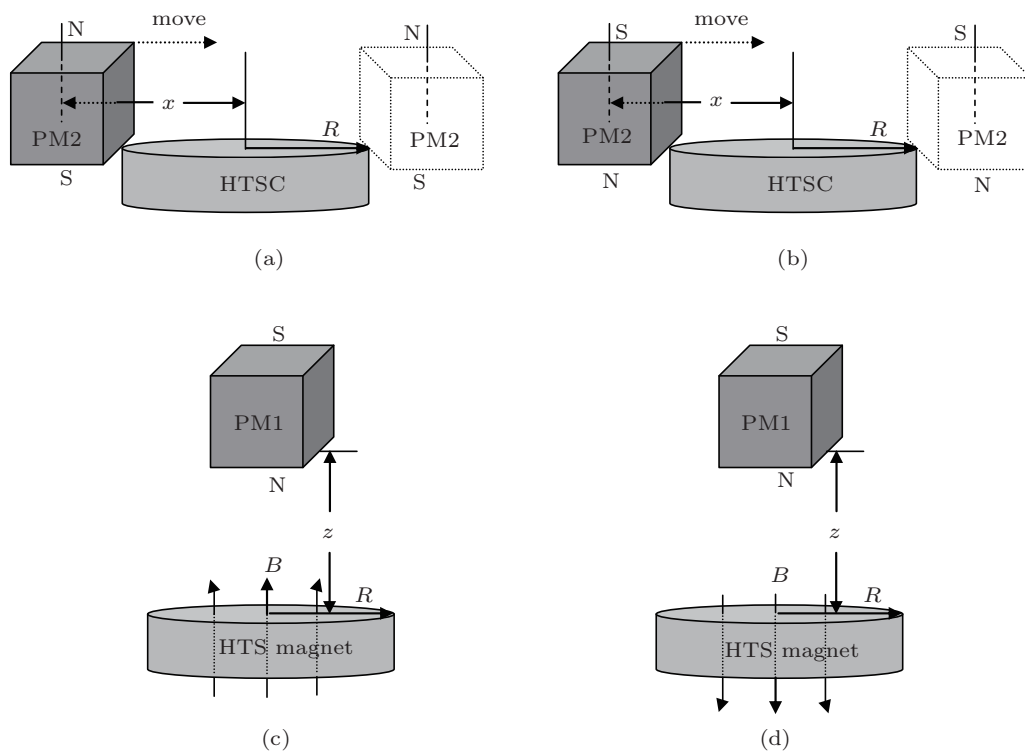


图 1 永磁体和超导体在两种组态下磁化和磁悬浮力测量示意图 (a), (b) 两种组态下磁化示意图; (c), (d) 两种组态下磁悬浮力测量示意图

度、呈轴对称 PM1↓-SCPM↑, 图 1(b) 中超导体进行磁化并去掉 PM2 后方形永磁体 (PM1) 与超导磁体 SCPM↓ 在液氮温度、呈轴对称 PM1↓-SCPM↓ 的四种实验方案, 箭头表示超导磁体和永磁体的磁化方向, 在实验过程中, 辅助永磁体是和超导体一起冷却的. 我们采用三维空间磁场及磁力测试系统 [30], 对图 1(c), (d) 两种情况下的磁悬浮力进行了测量. 每次测量前, 方形永磁体与超导体一直处于轴对称状态, 它们之间的距离  $Z = 35$  mm, 且超导体一直处于液氮温度 (77 K) 中. 让方形永磁体 PM1 从  $Z = 35$  mm 的位置开始垂直接近超导体上表面, 当两者间距达到  $Z = 0.1$  mm 时, 让方形永磁体沿原路返回, 完成一次测量.

### 3 结果与讨论

图 2 为超导体在不同位置  $x$  被磁化后 PM1↓-SCPM↑ 组态中磁悬浮力与悬浮间距间的关系曲线. 从图中可清楚看到, 在 PM1↓-SCPM↑ 组态中不同的位置  $x$  处磁悬浮力不同, 当  $x$  从  $-15$  mm 增加到  $0$  mm 后继续增加到  $15$  mm 时, 最大磁悬浮力首先从  $16.7$  N 增大到  $23.1$  N, 然后又减小到  $16.6$  N, 该结果也不等于相同组态下零场冷时的磁悬浮力 ( $17.1$  N). 但是对超导体经过合理的磁化后, 可提高磁悬浮力大小, 最大磁悬浮力峰值是在磁化位置  $x = 0$  mm 处获得的.

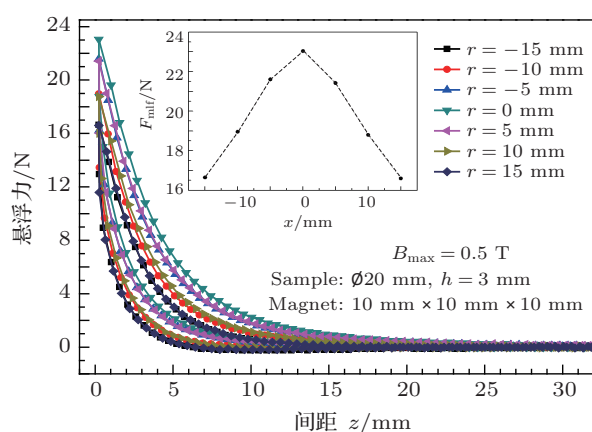


图 2 PM1↓-SCPM↑ 组态下永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 间磁悬浮力与悬浮间距之间的关系

图 3 为超导体在不同位置  $x$  被磁化后 PM1↓-SCPM↓ 组态中磁悬浮力与悬浮间距间的关系曲线. 从图中可清楚看到, 在 PM1↓-SCPM↓ 组态中不同的位置  $x$  处磁悬浮力仍然不同, 磁悬浮力特征

与 PM1↓-SCPM↑ 组态中有着明显的区别, 当  $x$  从  $-15$  mm 增加到  $0$  mm 后继续增加到  $15$  mm 时, 最大磁悬浮力首先从  $17.7$  N 减小到  $7$  N, 然后又增加到  $17.6$  N, 该结果也不等于相同组态下零场冷时的磁悬浮力 ( $17.1$  N). 但是对超导体经过合理的磁化后, 可提高磁悬浮力大小, 最大磁悬浮力谷值 ( $7$  N) 是在磁化位置  $x = 0$  mm 处获得的. 该结果表明, 在 PM1↓-SCPM↓ 组态中很难提高磁悬浮力大小. 从上面的分析得知, 在零场冷态下, 永磁体 PM1 和 GdBCO 超导体间的最大磁悬浮力大小为  $17.1$  N. 但是, 当 GdBCO 超导体被磁化为 SCPM↑ 和 SCPM↓ 两种超导磁体后, 在 PM1↓-SCPM↑ 组态中最大磁悬浮力存在一个峰值为  $23.1$  N, 而 PM1↓-SCPM↓ 组态中最大磁悬浮力存在一个谷值为  $7.0$  N. 这些变化与辅助永磁体对超导体的磁化方式以及超导体与辅助永磁体一起场冷 (磁化) 时超导体捕获磁场分布密切相关.

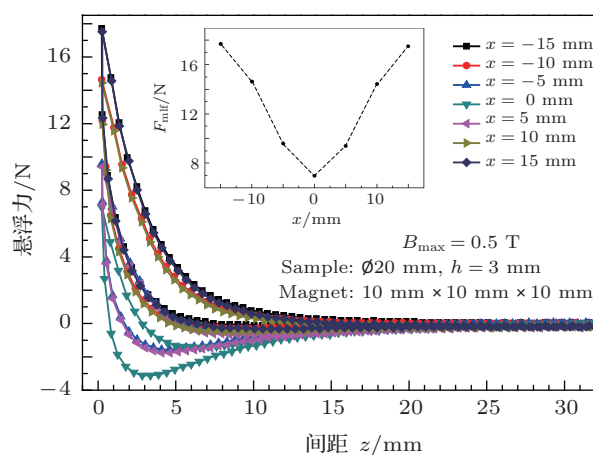


图 3 PM1↓-SCPM↓ 组态下永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 间磁悬浮力与悬浮间距之间的关系

为了进一步弄清为什么两种组态中磁悬浮力存在如此大差别, 我们利用 Lake shore 低温霍尔探头, 分别测量了永磁体 PM1 和两个磁化后的超导磁体 SCPM↑ 和 SCPM↓ 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 沿直径  $x$  方向磁场强度垂直分量, 图 4 为永磁体 PM1 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 磁场强度垂直分量随横向位移 ( $B_z-x$ ) 变化曲线, 在实验测试过程中该磁场分布始终保持不变.

图 5 为 SCPM↑ 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 处磁场强度垂直分量沿直径 ( $B_z-x$ ) 变化曲线. 从图中可看出, SCPM↑ 的捕获磁场强度垂直分量 ( $B_z$ ) 都为正值, 并且存在一个峰值, 在磁悬浮力测量过程中, SCPM↑ 磁体的磁场反平行与永磁体 PM1 的磁场,

从而导致在 PM1↓-SCPM↑ 组合系统中存在一个斥力. 因而, 在 PM1↓-SCPM↑ 组合系统中总磁悬浮力等于永磁体 PM1 的磁场与 GdBCO 超导体内感应环流产生磁场之间的作用力和永磁体 PM1 的磁场与 SCPM↑ 磁体磁场 (超导体磁化时捕获磁场) 之间的作用力 (斥力) 之和, 除此之外, 无其他相互作用力. 图 5 表明, 当  $x$  从 -15 mm 增加到 0 mm 后继续增加到 15 mm 时, 捕获磁场强度垂直分量的峰值和总强度先增大后减小, 最大的峰值  $B_z = 0.185$  T, 对应于最大磁悬浮力峰值获得时的磁化位置  $x = 0$  mm, 该结果与图 2 中最大磁悬浮力结果相一致.

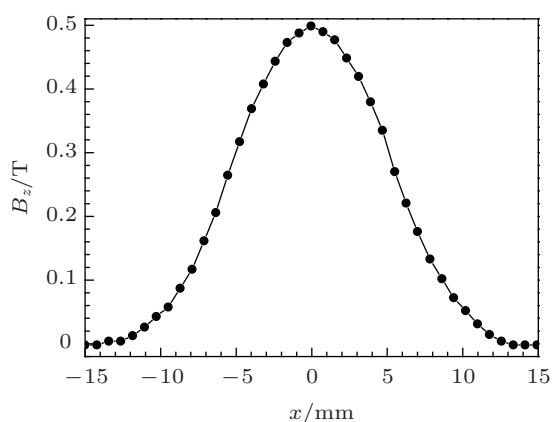


图 4 永磁体 PM1 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 磁场强度垂直分量与横向位移 ( $B_z$ - $x$ ) 之间的关系

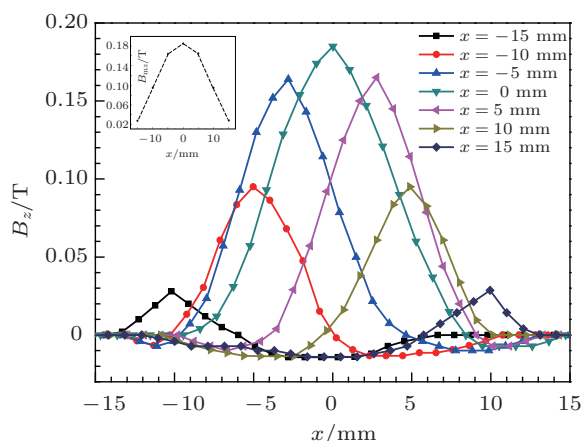


图 5 超导磁体 SCPM↑ 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 磁场强度垂直分量沿径向 ( $B_z$ - $x$ ) 变化曲线

图 6 为 SCPM↓ 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 处磁场强度垂直分量沿直径 ( $B_z$ - $x$ ) 变化曲线. 从图中可清楚看出, SCPM↓ 的捕获磁场强度垂直分量 ( $B_z$ ) 都为负值, 并且存在一个谷值, 在磁悬浮力测量过程中, SCPM↓ 磁体的磁场平行于永磁体 PM1 的磁场, 从而导致在 PM1↓-SCPM↓ 组合系统中存在一个吸引

力, 因而, 在 PM1↓-SCPM↓ 组合系统中总磁悬浮力等于永磁体 PM1 的磁场与 GdBCO 超导体内感应环流产生磁场之间的作用力和永磁体 PM1 的磁场与 SCPM↓ 磁体磁场 (超导体磁化时捕获磁场) 之间的作用力 (吸引力) 之和, 除此之外, 无其他相互作用力. 图 6 表明, 当  $x$  从 -15 mm 增加 15 mm 时, 捕获磁场强度垂直分量的谷值的绝对值和总强度先增大后减小, 最深的谷值  $B_z = -0.185$  T, 对应于最大磁悬浮力谷值获得时的磁化位置  $x = 0$  mm, 该结果与图 3 中最大磁悬浮力结果相一致.

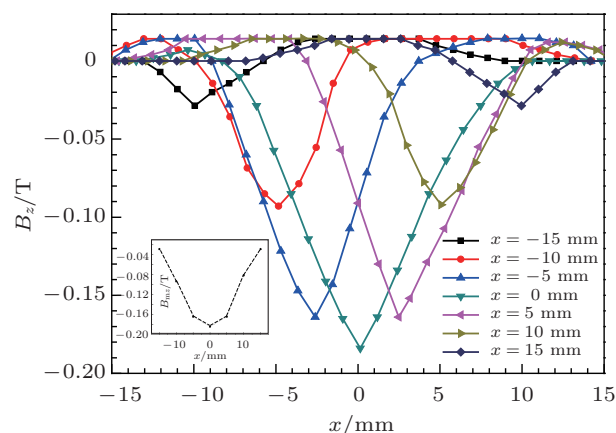


图 6 超导磁体 SCPM↓ 上表面 ( $h = 0.1$  mm) 磁场强度垂直分量沿径向 ( $B_z$ - $x$ ) 变化曲线

在永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 间存在两种作用力, 其中一种作用力是 PM1 和 GdBCO 超导体间所固有的作用力, 另一种附加的力则是 PM1 和超导体被磁化后的超导磁体 SCPM 捕获磁场间的作用力. 我们知道磁体 PM1 和 PM2 表面最大磁场强度为 0.5 T, 该磁场远远小于感应电流所产生的磁场强度. 据此, 可假设 PM1 和 GdBCO 超导体间所固有的作用力是独立的并且不受超导磁体 SCPM 捕获磁场的影响. 因此, 可推断出超导体在两种 SCPM↑ 和 SCPM↓ 状态下磁悬浮力的不同是依赖于 GdBCO 超导体磁化方式和磁化时捕获磁场分布. 在 PM1↓-SCPM↑ 和 PM1↓-SCPM↓ 组合中磁悬浮力被提高或减小, 但磁悬浮力最终被提高或减小多少与超导磁体 SCPM 的捕获磁场分布密切相关.

## 4 结论

通过对非轴对称情况下辅助永磁体对超导体的磁化方式、对 GdBCO 超导体捕获磁场分布及

其超导磁悬浮力的影响进行了研究. 结果表明, 最大磁悬浮力随着超导体场冷位置  $x$  的变化而改变, 这个变化主要来自永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 捕获磁场间的作用力, 超导体在两种 SCPM $\uparrow$  和 SCPM $\downarrow$  状态下磁悬浮力不同主要依赖于 GdB-CO 超导体磁化方式和磁化时捕获磁场分布. 在两种组合中磁悬浮力被提高或减小多少与超导磁体 SCPM 的捕获磁场分布密切相关. 此外, 我

们还发现, 当  $-10 \leq x \leq 10$  mm 时, PM1 $\downarrow$ -SCPM $\uparrow$  组合中磁悬浮力被提高, 最大磁悬浮力的峰值是在  $x = 0$  mm 处获得的, 而在 PM1 $\downarrow$ -SCPM $\downarrow$  组合中悬浮力被减小, 最大磁悬浮力的谷值是在  $x = 0$  mm 处获得. 这些结果表明, 在实际应用中, 通过合理的磁化超导体可调节永磁体和高温超导体间的磁悬浮力, 设计出能够充分发挥超导材料磁悬浮特性的磁场分布, 从而获得最大的磁悬浮力特性.

- [1] John R H, Shaul H, Tomotake M 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** S1
- [2] Werfel F N, Floegel-Delor U, Rothfeld R 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** S19
- [3] Koshizuka N 2006 *Physica C* **445**
- [4] Miyagawa Y, Kameno H, Takahata R 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 996
- [5] Nuria D V, Alvaro S, Carles N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042505
- [6] Wang J S, Wang S Y 2002 *Physica C* **378-381** 809
- [7] Ewoud V W, Yamamoto A, Toshiro H 2009 *Precision Engineer.* **33** 217
- [8] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, Zhang C P 2002 *Cryogenics* **42** 589
- [9] Koblichka A V, Mücklich F, Koblichka M R 2002 *Cryst. Engineer.* **5** 411
- [10] Chan W C 2003 *Physica C: Superconductivity* **390** 27
- [11] Zhu M, Ren Z Y, Wang S Y 2002 *Chin. J. Low Temperature Phys.* **24** 213 (in Chinese) [朱敏, 任仲友, 王素玉 2002 低温物理学报 **24** 213]
- [12] He G L, He Y W, Zhao Z G, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 839 (in Chinese) **55** 839 [何国良, 贺延文, 赵志刚, 刘楣 2006 物理学报 **55** 839]
- [13] Zhou J, Zhang X Y, Zhou Y H 2009 *Physica C: Superconductivity* **469** 207
- [14] Cheng T L, Shih C L 2006 *J. Magnet. Mater.* **304** 454
- [15] Zhang F Y, Huang S L, Cao X W 1989 *Acta Phys. Sin.* **38** 830 (in Chinese) [张凤英, 黄孙利, 曹效文 1989 物理学报 **38** 830]
- [16] Nuria D V, Alvaro S, Enric P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 042503
- [17] Wang F, Sun G Q, Kong X M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1590 (in Chinese) [王峰, 孙国庆, 孔祥木 2001 物理学报 **50** 1590]
- [18] Yang W M, Chao X X, Ma J, Li G Z 2010 *J. Supercond. Nov. Magn.* **23** 1007
- [19] Wang M, Yang W M, Ma J, Tang Y N 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 346 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 马俊, 唐艳妮 2012 中国科学: 物理学, 力学, 天文学 **42** 346]
- [20] Wang M, Yang W M, Zhang X J, Tang Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 196102 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 张晓菊, 唐艳妮 2012 物理学报 **61** 196102]
- [21] Ma J, Yang W M, Li G Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李国政 2011 物理学报 **60** 027401]
- [22] Ma J, Yang W M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 077401 (in Chinese) [马俊, 杨万民 2011 物理学报 **60** 077401]
- [23] Ma J, Yang W M, Li J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李佳伟 2012 物理学报 **61** 137401]
- [24] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X 2003 *Physica C: Superconductivity* **398** 141
- [25] Zhang X Y, Zhou J, Zhou Y H 2009 *Supercond. Sci. Technol.* **22** 1
- [26] Deng Z, Zheng J, Song H 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2071
- [27] He Q Y, Wang J S, Wang S Y 2009 *Physica C* **469** 91
- [28] Tsuda M, Kawasaki T, Yagai T 2008 *J. Phys.* **97** 1
- [29] Cheng X F, Yang W M, Li G Z 2010 *Chin. J. Low Temperature Phys.* **32** 150 (in Chinese) [程晓芳, 杨万民, 李国政 2010 低温物理学报 **32** 150]
- [30] Yang W M, Chao X X, Shu Z B 2006 *Physica C* **445-448** 347

# The effect of additional permanent magnet magnetizing methods on magnetic field distribution and the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor\*

Ma Jun<sup>1)2)</sup> Yang Wan-Min<sup>2)†</sup> Wang Miao<sup>2)</sup> Chen Sen-Lin<sup>2)</sup> Feng Zhong-Ling<sup>1)2)</sup>

1) (Department of Physics Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

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

(Received 7 April 2013; revised manuscript received 15 August 2013)

## Abstract

It has been investigated that the interaction force between a cubic permanent magnet PM1 and a GdBCO bulk (HTSC) superconducting permanent magnet (SCPM) magnetized by a cubic permanent magnet PM2 under different configurations at 77 K. Two configurations were used for the magnetization of the GdBCO bulk, one is that the North pole of the PM2 is in upward direction, the other is in downward direction, so that the North pole of the SCPM is in two states SCPM $\uparrow$  and SCPM $\downarrow$ ; the vertical distance between the bottom surface of PM1 and the top surface of SCPM is kept as a constant value, but the PM2 can be fixed at any positions ( $x$ ) along a diameter of the GdBCO bulk during the magnetization process. It is found that: for the PM1 $\downarrow$ -SCPM $\uparrow$  configuration, the maximum levitation force is increasing from 16.7 N to 23.1 N when  $x$  increases from  $-15$  mm to 0, and then decreases to 16.6 N when  $x$  further increases to 15 mm; but for the PM1 $\downarrow$ -SCPM $\downarrow$  configuration, the maximum levitation force is decreasing from 17.7 N to 7 N when  $x$  increases from  $-15$  mm to 0, and then increases to 17.6 N when  $x$  further increases to 15 mm. These results are not only much different in the two configurations, but also much different from the maximum levitation force 17.1 N of the sample under zero field cooled condition, which is closely related with the trapped field distribution of the SCPM at different  $x$  values. These results indicate that the levitation force of high temperature bulk superconductors can be effectively improved by introducing additional permanent magnet based on scientific and reasonable designing of the system configurations, which is very important during the practical design and applications of superconducting magnetic levitation systems.

**Keywords:** single domain GdBCO, permanent magnet, trapped field, levitation force

**PACS:** 74.25.-q, 74.72.-h, 74.25.Ha

**DOI:** 10.7498/aps.62.227401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51167016, 50872079), the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 311033), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. GK201101001, GK201305014).

† Corresponding author. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn