

# 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\*

马俊<sup>1)2)</sup> 杨万民<sup>1)†</sup> 李杰伟<sup>1)</sup> 王妙<sup>1)</sup> 陈森林<sup>1)</sup>

1) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

2) (青海师范大学物理系, 西宁 810008)

(2011 年 12 月 1 日收到; 2011 年 12 月 14 日收到修改稿)

通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和方形永磁体在液氮温度、零场冷、轴对称情况下磁悬浮力的测量, 研究了三种不同组态中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. 实验结果表明, 如果处在超导体上方的测量用方形永磁体 N 极向下, 则在轴对称情况下, 当方形辅助永磁体 N 极向上与超导体下表面贴在一起时, 超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体磁化的 14.3 N 增加到 31.8 N, 提高到 222%; 当方形辅助永磁体放置在超导体上表面、N 极垂直向上且场冷后去掉辅助永磁体时, 超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体磁化的 14.3 N 增加到 21.6 N, 增加到 151%; 当方形辅助永磁体放置在超导体上表面、N 极垂直向下且场冷后去掉方形辅助永磁体时, 超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体磁化的 14.3 N 减小到 8.6 N, 减小为无辅助永磁体时的 60%. 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

## 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]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[20]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[21]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, 磁悬浮力与永磁体的组合方式、磁场分布和场冷时捕获磁通紧密相关, 而且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悬浮力特性, 而就辅助永磁体的引入方式对超导体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>[22-24]</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>[25]</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

\* 教育部科学技术研究重大项目 (批准号: 311033)、国家自然科学基金 (批准号: 50872079, 51167016)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA03Z241) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: GK200901017) 资助的课题.

† E-mail: yangwm@snnu.edu.cn

体良好的自稳定磁悬浮特性,通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和方形永磁体在液氮温度、零场冷、轴对称情况下磁悬浮力的测量,研究了三种不同组态中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,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 [26] 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, 我们用该超导块材和这两个永磁体设计了 5 种实验方案, 如图 1(a), (b), (c), (d), (e) 分别表示方形永磁体 (PM1) 和超导体呈轴对称 PM1 ↓ -HTS、在图 1(a) 的基础上引入方形辅助永磁体 N 极向上且与超导体下表面贴在一起 PM1 ↓ -(HTS + PM2 ↑)、在图 1(b) 的基础上去掉超导体 PM1 ↓ -PM2 ↑、在图 1(a) 的基础上超导体上表面引入磁化方向 N 反平行于方形永磁体的辅助永磁体且与超导体一起场冷后移去辅助永磁体 PM1 ↓ -SCPM ↑、在图 1(a) 的基础上超导体上表面引入磁化方向 N 平行于方形永磁体的辅助永磁体且与超导体一起场冷后移去辅助永磁体 PM1 ↓ -SCPM ↓ 的 5 种实验方案, 箭头表示超导体和永磁体的磁化方向, 在实验过程中, 辅助

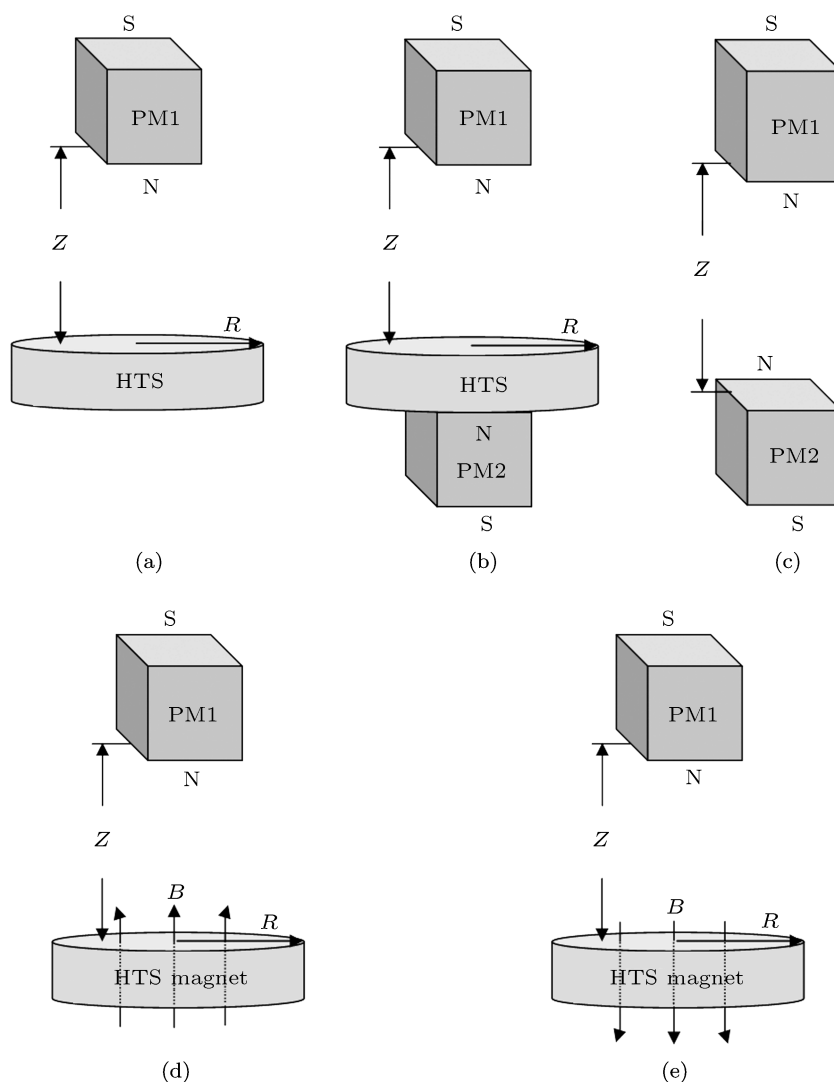


图 1 永磁体、辅助永磁体和超导体之间不同组合方式示意图

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<sup>[27]</sup>, 对这几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, 且它们之间的距离  $Z = 43 \text{ mm}$ , 待超导体被冷却(无超导体时不需要冷却过程)至液氮温度(77 K)后. 让方形永磁体从  $Z = 43 \text{ mm}$  的位置开始垂直接近超导体(或辅助永磁体)上表面, 当两者间距达到  $Z = 0.5 \text{ mm}$ (接近辅助永磁体时  $Z = 3.5 \text{ mm}$ )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 a 组合、b 组合和 c 组合情况下方形永磁体所受的磁悬浮力随其与超导体(或辅助永磁体)上表面垂直距离 ( $F-Z$ ) 变化曲线. 从图中可清楚看到, 在这三种情况下, 方形永磁体所受的磁悬浮力都随着两者之间距离的减小逐渐增加, 但增加的幅度不同. 其中 a 组合的磁悬浮力曲线反映了超导体和方形永磁体之间的相互作用力, 最大磁悬浮力为 14.3 N; c 组合的磁悬浮力曲线表明, 方形永磁体和辅助永磁体之间的相互作用力, 在方形永磁体接近和离开辅助永磁体上表面时磁相互作用力曲线几乎是完全重合的, 无磁滞现象, 表明永磁体之间的相互作用力具有很好的重复性和刚度, 最大磁悬浮力为 17.3 N; b 组合的磁悬浮力曲线与 a 组合的磁悬浮力曲线类似, 但整体向右上方向移动, 最大磁悬浮力为 31.8 N, 是 a 组合最大磁悬浮力 14.3 N 的 222% 倍. 同时我们还发现, 当  $Z \leq 30 \text{ mm}$  时, b 组合的磁悬浮力不但比 a 组合有明显提高, 而且其悬浮系统的刚度也明显提高. 譬如在下降至  $Z = 5 \text{ mm}$  时, a 组合和 b 组合的磁悬浮力分别为 3.5 N 和 9.5 N, 刚度分别为  $1.2 \times 10^3 \text{ N/m}$  和  $2.9 \times 10^3 \text{ N/m}$ , 显然 b 组合中磁悬浮力有了较大的提高, 增加的部分来自辅助永磁体的贡献. 在有超导体的 a 组合和 b 组合中, 磁悬浮力曲线均存在着明显的磁滞现象, 但在有辅助永磁体作用下的磁悬浮力却有了成倍的增加, 磁悬浮系统的刚度也明显提高; 这说明在这种情况下辅助永磁体的引入明显的提高了系统的磁悬浮力特性, 对超导磁悬浮的应用具有积极的促进作用.

图 3 为 a 组合、d 组合和 e 组合情况下方形永磁体所受的磁悬浮力随其与超导体上表面垂直距离的 ( $F-Z$ ) 变化曲线. 从图中可清楚看到, 在 a

组合和 d 组合情况下, 方形永磁体所受的磁悬浮力都随着两者之间距离的减小逐渐增加. d 组合的磁悬浮力曲线都在 a 组合磁悬浮力曲线的右上侧, 随着方形永磁体的下降, 曲线整体向右上方向移动, d 组合的磁悬浮力比 a 组合的明显偏高, 如  $Z \geq 5 \text{ mm}$  时, d 组合的磁悬浮力增加较为缓慢, 如  $Z = 5 \text{ mm}$  时, a 组合和 d 组合的磁悬浮力分别为 3.4 N 和 7.6 N; 但当  $Z < 5 \text{ mm}$  时, d 组合的磁悬浮力迅速增加, 如  $Z = 0.5 \text{ mm}$  时, a 组合和 d 组合的磁悬浮力分别为 14.3 N 和 21.6 N, 为 a 组合最大磁悬浮力 14.3 N 的 151%; 但 e 组合的情况则大不相同, 方形永磁体和超导体之间的磁悬浮力在  $7.5 \text{ mm} \leq Z \leq 20 \text{ mm}$  时, 随着两者之间距离的减小逐渐减小,  $Z < 7.5 \text{ mm}$  时, 则随着两者之间距离的减小而逐渐增加, 但当  $Z < 20 \text{ mm}$  时, 曲线相对于 a 组合则向左下方向偏移, 导致 e 组合的磁悬浮力比 a 组合的明显偏低, 如  $Z = 5 \text{ mm}$  时, a 组合和 e 组合的磁悬浮力分别为 3.4 N 和 0.1 N;

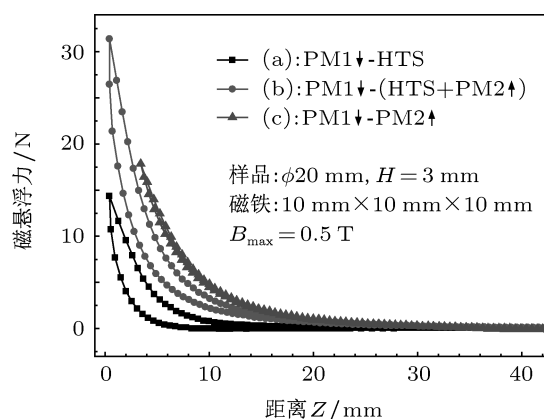


图 2 在 a 组合、b 组合和 c 组合中磁悬浮力随间距 ( $F-Z$ ) 的变化关系

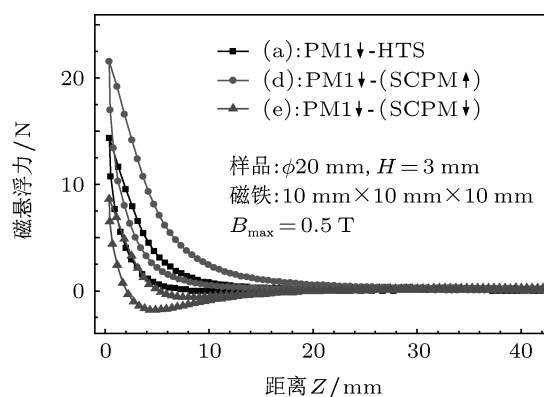


图 3 在 a 组合、d 组合和 e 组合中磁悬浮力随间距 ( $F-Z$ ) 的变化关系

当  $Z = 0.5 \text{ mm}$  时, e 组合的最大磁悬浮力只有  $8.6 \text{ N}$ , 仅为 a 组合最大磁悬浮力  $14.3 \text{ N}$  的  $60\%$ . 这些结果表明, e 组合情况下方形永磁体所受的磁悬浮力只有无辅助永磁体时最大磁悬浮力的  $60\%$ 、b 组合情况下磁悬浮力的  $27\%$ , d 组合情况下磁悬浮力的  $40\%$ , 这些变化与辅助永磁体的引入方式、以及超导体与辅助永磁体一起场冷时超导体捕获磁场分布密切相关.

为了进一步弄清为什么 b 组合和 d 组合能获得较大的磁悬浮力, 我们利用 Lake shore 低温霍尔探头, 对这 5 种情况下 (去掉 a 情况) 距超导体表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  处磁场的垂向分量  $B_z$  进行了测量 (c 组合为距辅助永磁体表面  $Z = 3.5 \text{ mm}$ ). 图 4 是 a 组合情况下距方形永磁体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线.

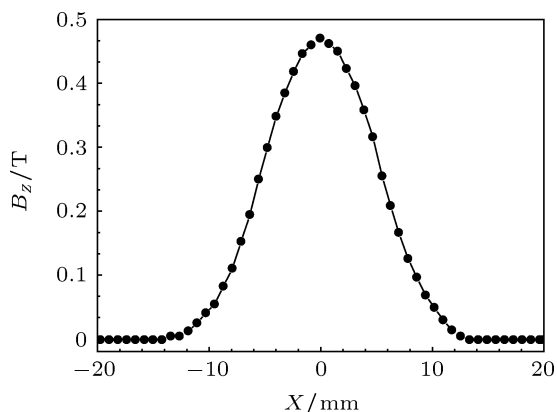


图 4 a 组合情况下距方形永磁体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线

图 5 分别是 b 组合情况下距超导体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  和 c 组合情况下距辅助永磁体上表面  $Z = 3.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线, 从图 5 中可看出, c 组合情况下辅助永磁体的磁场强度明显大于 b 组合情况下超导体表面的磁场强度, 这是由于 b 组合情况下超导体上表面磁场是超导体与辅助永磁体一起场冷时所捕获的磁场和辅助永磁体磁场共同作用的结果, 随着超导体温度的下降, 辅助永磁体磁场线穿透超导体数量逐渐减少, 超导体中的磁场穿透面积逐渐减小, 大部分磁场线被超导体所屏蔽, 从而改变了超导体上表面的磁场分布, 导致 b 组合情况下超导体表面磁场强度反而小于 c 组合情况下只有辅助永磁体时磁场强度. 但就磁悬浮力而言, b 组合情况下超导磁悬浮力来自超导体冻结磁场、辅助永磁体磁场和方形永磁体下降时超导体中屏蔽感

应电流所产生磁场与方形永磁体磁场共同作用, 因此, b 组合超导磁悬浮力大于其他情况下的磁悬浮力, 这些结果与图 2 中几种组合情况下的超导磁悬浮力实验结果一致.

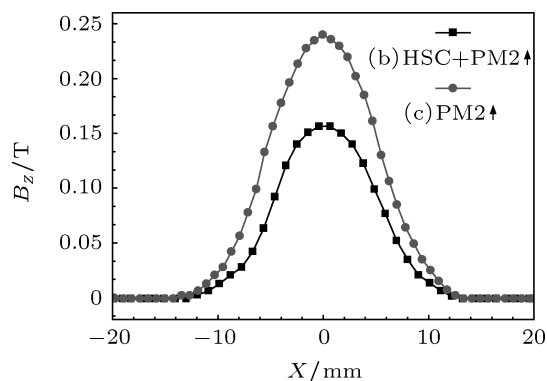


图 5 b 组合、c 组合情况下距超导体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  和辅助永磁体上表面  $Z = 3.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线

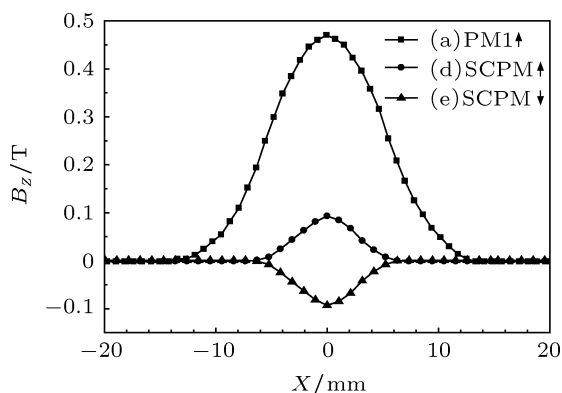


图 6 a 组合、d 组合和 e 组合情况下距超导体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线

图 6 分别是 a 组合、d 组合和 e 组合情况下距超导体上表面  $Z = 0.5 \text{ mm}$  处磁场垂直分量随横向位移 ( $B_z$ - $X$ ) 变化曲线, 从图中可清楚看出, d 组合情况下, 在方形永磁体移动的范围, 超导体冻结的磁场方向是竖直向上的, 刚好与方形永磁体产生的磁场方向相反, 由于与方形永磁体磁场方向相反磁场对其产生具有排斥性的悬浮力, 所以, 使得在该组合形态下, 方形永磁体所受的最大磁悬浮力比无辅助永磁体时的最大磁悬浮力大得多, 相反, 在 e 组合情况下, 超导体冻结的磁场方向则与方形永磁体产生的磁场方向相同, 由于与方形永磁体磁场方向相同的磁场则产生吸引力, 因此 e 组合情况下方形永磁体所受的磁悬浮力  $8.6 \text{ N}$  在两者间距很小的情况下, 小于无辅助永磁体时的最大磁悬浮

力 14.3 N, 小于 d 组合情况下方形永磁体所受的最大磁悬浮力 21.8 N, 远远小于 b 组合情况下方形永磁体所受的最大磁悬浮力 31.4 N.

## 4 结论

通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和方形永磁体磁悬浮力特性的研究发现, 超导体的磁悬浮力与辅助永磁体的引入方式、超导体冷却方式及磁极取向密切相关. 如方形辅助永磁体垂直磁化、且 N 极指向超导体下表面时, 超导体的最大磁悬浮力为 31.8 N; 当辅助永磁体放置在超导体上表

面、N 极垂直向上且场冷后移去辅助永磁体, 超导体的最大磁悬浮力为 21.6 N; 当辅助放置在超导体上表面、N 极垂直向下且场冷后移去辅助永磁体, 超导体的最大磁悬浮力为 8.6 N. 此外, 我们还发现, 超导体和方形永磁体之间的最大磁悬浮力与辅助永磁体和方形永磁体之间的最大磁悬浮力之和, 并不等于引入辅助永磁体后单畴 GdBCO 超导体和方形永磁体之间的最大磁悬浮力. 这些结果说明, 在实际应用中, 我们必须充分考虑磁体的引入方式、超导体的冷却方式及磁极取向等因素, 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* **1103** 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 Engineering* **33** 217
- [8] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, Zhang C P 2002 *Cryogenics* **42** 589
- [9] Koblishka A V, Mücklich F, Koblishka M R 2002 *Crystal Engineering* **5** 411
- [10] Chan W C 2003 *Physica C: Superconductivity* **390** 27
- [11] Zhu M, Ren Zh Y, Wang S Y 2002 *Chinese Journal of Low Temperature Physics* **24** 213 [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 H G, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 839 (in Chinese) [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 *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **304** e454
- [15] Zhang F Y, Huang S L, Cao X W 1989 *Acta Phys. Sin.* **39** 830 (in Chinese) [张凤英, 黄孙利, 曹效文 1989 物理学报 **39** 830]
- [16] Nuria DV, 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] Ma J, Yang W M, Li G Zh 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李国政 2011 物理学报 **60** 027401]
- [20] 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]
- [21] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X 2003 *Physica C: Superconductivity* **398** 141
- [22] Zhang X Y, Zhou J, Zhou Y H 2009 *Supercond. Sci. Technol.* **22** 1
- [23] Deng Z, Zheng J, Song H 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2071
- [24] He Q Y, Wang J S, Wang S Y 2009 *Physica C* **469** 91
- [25] Tsuda M, Kawasaki T, Yagai T 2008 *J. Phys.* **97** 1
- [26] Cheng X F, Yang W M, Li G Zh 2010 *Chinese Journal of Low Temperature Physics* **32** 150 [程晓芳, 杨万民, 李国政 2010 低温物理学报 **32** 150]
- [27] Yang W M, Chao X X, Shu Z B 2006 *Physica C* **445–448** 347

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

Ma Jun<sup>1)2)</sup> Yang Wan-Min<sup>1)†</sup> Li Jia-Wei<sup>1)</sup> Wang Miao<sup>1)</sup> Chen Sen-Lin<sup>1)</sup>

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

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

( Received 2 December 2011; revised manuscript received 14 December 2011 )

## Abstract

The effects of magnetization methods with additional permanent magnet on the magnetic field distribution and the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor are investigated with a cubic permanent magnet in their coaxial configuration in zero field cooled state at liquid nitrogen temperature in three different ways. It is found that when the N pole of the cubic permanent magnet, for the levitation force measurement, is placed above the GdBCO bulk superconductor and in the downward direction, the maximal levitation force can be improved to 31.8 N, and that when the N pole of the additional cubic permanent magnet points to upward and sticks to the bottom of the GdBCO bulk, the maximal levitation force is increased up to about 222% of the levitation force of 14.3 N for the system without additional permanent magnet. The maximal levitation force can be improved to 21.6 N (or reduced to 8.6 N), when the GdBCO bulk superconductor is closely placed below and magnetized by the additional cubic permanent magnet with N pole in the upward (or downward) direction, and the additional permanent magnet is removed away after the magnetization, the maximal levitation force is about 151% (or 60%) of 14.3 N for the system without the additional permanent magnet. The results indicate that the levitation force of high temperature bulk superconductors can be effectively improved by introducing additional permanent magnet based on the scientific and reasonable designing of the system configurations, which is very important for the practical design and application of superconducting magnetic levitation system.

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

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

\* Project supported by the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 311033), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50872079, 51167016), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z241) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. GK200901017).

† E-mail: yangwm@snnu.edu.cn