(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 112889121 B
(45)授权公告日 2023.08.18

(21)申请号 201980069685.6
(22)申请日 2019.09.26
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112889121 A
(43)申请公布日 2021.06.01
(30)优先权数据
62/738,758 2018.09.28 US
62/800,796 2019.02.04 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2021.04.22
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2019/053094 2019.09.26
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2020/069081 EN 2020.04.02
(73)专利权人 哈佛学院院长及董事
地址 美国马萨诸塞
(72)发明人 S·葛 G·M·怀特赛德斯
(74)专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所有限公司 11038
专利代理师 李跃龙
(51)Int.Cl.
H01F 7/02(2006.01)
(56)对比文件
US 2010285606 A1,2010.11.11
US 2014123461 A1,2014.05.08
US 2015037128 A1,2015.02.05
US 2015147746 A1,2015.05.28
WO 2017067967 A1,2017.04.27
US 4427960 A,1984.01.24
US 2015135829 A1,2015.05.21
US 2013314080 A1,2013.11.28
CN 108350939 A,2018.07.31
US 2009160279 A1,2009.06.25
CN 101882903 A,2010.11.10
US 2016370386 A1,2016.12.22
CN 105548343 A,2016.05.04
审查员 王英

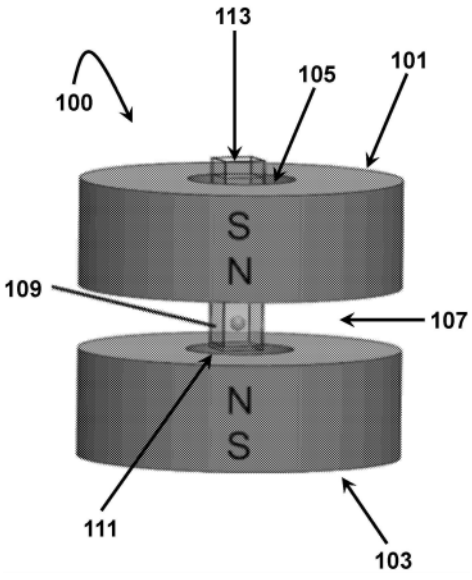
权利要求书3页 说明书17页 附图16页

(54)发明名称

磁悬浮

(57)摘要

描述了一种磁悬浮系统,其包括第一圆柱状磁体;与第一圆柱状磁体同轴对准的第二圆柱状磁体;与第一圆柱状磁体同轴对准的第一腔,其中第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面彼此平行并且彼此面对,从而在第一和第二磁体之间产生线性磁场。还描述了使用磁悬浮系统分析抗磁性或顺磁性样品的方法。



CN 112889121 B

1.一种用于悬浮抗磁性或顺磁性样品的磁悬浮系统,所述系统包括:

第一圆柱状磁体;

与第一圆柱状磁体同轴对准的第二圆柱状磁体;

第一腔,其与第一圆柱状磁体同轴对准并形成在第一圆柱状磁体中;和

构造成容纳顺磁性介质的容器;

其中第一圆柱状磁体的表面具有一种极性,且平行并面对于具有相同极性的第二圆柱状磁体的表面,从而使磁场的B_z分量在第一和第二圆柱状磁体之间沿着中心轴线性变化。

2.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一腔是圆柱状的。

3.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一腔跨过所述第一圆柱状磁体的整个高度。

4.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中线性磁场延伸到所述第一腔中。

5.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一和第二圆柱状磁体具有不同的半径或高度。

6.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一和第二圆柱状磁体具有相同的半径、高度或两者。

7.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述系统还包括第二腔,所述第二腔形成在所述第二圆柱状磁体中并且与所述第二圆柱状磁体同轴对准。

8.根据权利要求7所述的系统,其中所述第二腔是圆柱状的。

9.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为d,并且所述第一和第二圆柱状磁体的高度分别为h_1和h_2;且h_1和h_2中至少之一与d之比为0.2:1至10:1。

10.根据权利要求9所述的系统,其中h_1和h_2中的至少一个与d之比为1.67:1。

11.根据权利要求9所述的系统,其中

第一圆柱状磁体的内径为id_1;和

id_1与d之比为0.2:1至10:1。

12.根据权利要求11所述的系统,其中id_1与d之比为1.67:1。

13.根据权利要求9所述的系统,其中

第一圆柱状磁体的外径为od_1;和

od_1与d之比为0.3:1至100:1。

14.根据权利要求13所述的系统,其中od_1与d之比为5:1。

15.根据权利要求9所述的系统,其中

该系统还包括第二圆柱状腔,该第二圆柱状腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准;

第二圆柱状磁体的内径为id_2;和

id_2与d之比为0.2:1至10:1。

16.根据权利要求15所述的系统,其中id_2与d之比为1.67:1。

17.根据权利要求9所述的系统,其中

该系统还包括第二腔,该第二腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准;

第二圆柱状磁体的外径为od_2;和

od_2与d之比为0.3:1至100:1。

18.根据权利要求17所述的系统,其中od_2与d之比为5:1。

19.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一腔是圆柱状的,并且所述第一圆柱状磁体的内径id_1:外径od_1:高度h_1:第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离d之比为1.67:5:1.67:1。

20.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中

该系统还包括第二圆柱状腔,该第二圆柱状腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准;和

第二圆柱状磁体的内径id_2:外径od_2:高度h_2:第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离d之比为1.67:5:1.67:1。

21.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述构造成容纳顺磁性介质的容器至少部分地设置在所述第一和第二圆柱状磁体之间。

22.根据权利要求21所述的系统,其中所述容器还包括入口,其构造成允许添加或去除所述顺磁性介质或者顺磁性或抗磁性样品。

23.根据权利要求21所述的系统,其中所述容器包括两个端部,其中至少一个端部延伸到所述第一腔中或穿过所述第一腔。

24.根据权利要求23所述的系统,其中

该系统还包括第二腔,该第二腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准;和

容器两端的另一端延伸到第二圆柱状腔或穿过第二圆柱状腔。

25.根据权利要求21所述的系统,其中所述容器是杯皿。

26.根据权利要求21所述的系统,其中所述顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液。

27.根据权利要求26所述的系统,其中所述顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。

28.根据权利要求27所述的系统,其中所述Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。

29.根据权利要求21所述的系统,其中所述顺磁性介质包括$MnCl_2$水溶液。

30.根据权利要求21所述的系统,其中所述顺磁性介质包括疏水的顺磁性介质或顺磁性离子液体。

31.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中沿着所述第一和第二圆柱状磁体的公共轴的最大磁场为0.20-0.50T。

32.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一圆柱状磁体和第二圆柱状磁体是NdFeB磁体。

33.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述系统包括第二圆柱状腔,所述第二圆柱状腔跨过所述第二圆柱状磁体的整个高度并且与所述第二圆柱状磁体同轴对准;并且第一或第二圆柱状磁体的内径为15mm至40mm。

34.根据权利要求33所述的系统,其中所述第一或第二圆柱状磁体的内径为25mm。

35.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述系统包括第二圆柱状腔,所述第二圆柱状腔跨过所述第二圆柱状磁体的整个高度并且与所述第二圆柱状磁体同轴对准;并

且第一或第二圆柱状磁体的外径为50mm至100mm。

36.根据权利要求35所述的系统,其中所述第一或第二圆柱状磁体的外径为76mm。

37.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一或第二圆柱状磁体的高度是从15mm到50mm。

38.根据权利要求37所述的系统,其中所述第一或第二圆柱状磁体的高度为25mm。

39.根据权利要求1-3中任一项所述的系统,其中所述第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为5mm至50mm。

40.根据权利要求39所述的系统,其中所述第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为15mm。

41.一种分析抗磁性或顺磁性样品的方法,包括:

提供根据权利要求1-40中任一项所述的系统;

提供容器,其构造成在第一圆柱状磁体和第二圆柱状磁体之间容纳顺磁性介质;

将顺磁性介质和抗磁性或顺磁性样品分别或一起添加到容器中;和

使抗磁性或顺磁性样品在第一和第二圆柱状磁体之间的线性磁场下悬浮。

42.根据权利要求41所述的方法,其中通过所述第一圆柱状腔添加所述顺磁性介质或所述抗磁性或顺磁性样品。

43.根据权利要求41所述的方法,还包括去除所述顺磁性介质或所述抗磁性或顺磁性样品。

44.根据权利要求43所述的方法,其中通过所述第一圆柱状腔去除所述顺磁性介质或所述抗磁性或顺磁性样品。

45.根据权利要求41至44中任一项所述的方法,其中所述顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液、疏水的顺磁性介质或顺磁性离子液体。

46.根据权利要求45所述的方法,其中所述顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。

47.根据权利要求46所述的方法,其中所述Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。

48.根据权利要求41所述的方法,其中所述顺磁性介质包括$MnCl_2$水溶液。

49.根据权利要求41所述的方法,其中所述顺磁性介质还包括十六烷基三甲基溴化铵。

50.根据权利要求41所述的方法,其中所述抗磁性或顺磁性样品包含交联聚合物。

51.根据权利要求50所述的方法,还包括确定所述交联聚合物的密度。

52.根据权利要求51所述的方法,还包括生成使系统中样品的悬浮高度与其密度相关的标准曲线,并使用该标准曲线及其在系统中的悬浮高度来确定交联聚合物的密度。

53.根据权利要求50所述的方法,其中所述交联聚合物包括聚二甲基硅氧烷。

磁悬浮

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2018年9月28日提交的美国临时专利申请第62/738,758号和2019年2月4日提交的美国临时专利申请第62/800,796号的优先权,其全文内容通过引用合并入本文。

[0003] 通过引用并入

[0004] 本文所引用的所有专利、专利申请和出版物均通过引用以全文并入本文,以便更全面地描述截至本文所述的发明之日本领域技术人员已知的现有技术水平。

技术领域

[0005] 本申请总体上涉及磁悬浮(MagLev)装置。

[0006] 关于联邦赞助研究或开发的声明

[0007] 本发明是在美国能源部授予的ER45852的政府支持下完成的。美国政府享有本发明的某些权利。

发明内容

[0008] 在一个方面,描述了一种磁悬浮系统,其包括第一圆柱状磁体;与第一圆柱状磁体同轴对准的第二圆柱状磁体;第一腔,其与第一圆柱状磁体同轴对准并形成在第一圆柱状磁体中;其中第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面彼此平行并且彼此面对,从而在第一和第二磁体之间产生线性磁场。

[0009] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一腔是圆柱状的。

[0010] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一腔跨过第一圆柱状磁体的整个高度。

[0011] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,线性磁场延伸到第一腔中。

[0012] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一和第二圆柱状磁体具有不同的半径或高度。

[0013] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一和第二圆柱状磁体具有相同的半径、高度或两者。

[0014] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,系统还包括第二腔,该第二腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准。

[0015] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第二腔是圆柱状的。

[0016] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为d,并且第一和第二圆柱状磁体的高度分别为h_1和h_2;h_1和h_2中至少之一与d之比为约0.2:1至约10:1。

[0017] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,h_1和h_2中的至少一个与d之比为约1.67:1。

[0018] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中,第一圆柱状磁体的内径为id_1;id_1与d

之比约为0.2:1至10:1。

[0019] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，id_1与d之比为约1.67:1。

[0020] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一圆柱状磁体的外径为od_1；od_1与d之比约为0.3:1至100:1。

[0021] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，od_1与d之比为约5:1。

[0022] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统还包括第二圆柱状腔，该第二圆柱状腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准；第二圆柱状磁体的内径为id_2；id_2与d之比约为0.2:1至10:1。

[0023] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，id_2与d之比为约1.67:1。

[0024] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，系统还包括第二腔，该第二腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准；第二圆柱状磁体的外径为od_2；od_2与d之比约为0.3:1至100:1。

[0025] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，od_2与d之比为约5:1。

[0026] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一腔是圆柱状的，并且第一圆柱状磁体的内径(id_1)：外径(od_1)：高度(h_1)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比约为1.67:5:1.67:1。

[0027] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统还包括第二圆柱状腔，该第二圆柱状腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准；第二圆柱状磁体的内径(id_2)：外径(od_2)：高度(h_2)：第一圆柱状磁体和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比约为1.67:5:1.67:1。

[0028] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统还包括容器，该容器构造成容纳顺磁性介质并且至少部分地设置在第一和第二圆柱状磁体之间。

[0029] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，容器还包括入口，该入口构造成允许添加或去除顺磁性介质或者顺磁性或抗磁性样品。

[0030] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，容器包括两个端部，其中至少一个端部延伸到第一腔中或延伸穿过第一腔。

[0031] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统还包括第二腔，该第二腔形成在第二圆柱状磁体中并与第二圆柱状磁体同轴对准；容器两端的另一端延伸到第二圆柱状腔或延伸穿过第二圆柱状腔。

[0032] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，容器是杯皿(cuvette)。

[0033] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液。

[0034] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。

[0035] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，所述Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。

[0036] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质包括$MnCl_2$水溶液。

[0037] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质包括疏水顺磁性介质或顺磁性离子液体。

[0038] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，沿着第一和第二圆柱状磁体的公共轴的最大磁场为约0.20-0.50T。

[0039] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一和第二圆柱状磁体是NdFeB磁体。

[0040] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统任选地包括第二圆柱状腔，该第二圆柱状腔跨过第二圆柱状磁体的整个高度并且与第二圆柱状磁体同轴对准；并且第一或第二圆柱状磁体的内径为约15mm至约40mm。

[0041] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的内径为约25mm。

[0042] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该系统任选地包括第二圆柱状腔，该第二圆柱状腔跨过第二圆柱状磁体的整个高度并且与第二圆柱状磁体同轴对准；并且第一或第二圆柱状磁体的外径为约50mm至约100mm。

[0043] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的外径为约76mm。

[0044] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的高度为约15mm至约50mm。

[0045] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的高度为约25mm。

[0046] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为约5mm至约50mm。

[0047] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为约15mm。

[0048] 在一个方面，描述了一种分析抗磁性或顺磁性样品的方法，包括提供前述权利要求中任一项的系统；设置构造成在第一圆柱状磁体和第二圆柱状磁体之间容纳顺磁性介质的容器；将顺磁性介质和抗磁性或顺磁性样品分别或一起添加到容器中；使抗磁性或顺磁性样品在第一和第二圆柱状磁体之间的线性磁场下悬浮。

[0049] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，通过第一圆柱状腔添加顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。

[0050] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该方法还包括去除顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。

[0051] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，通过第一圆柱状腔去除顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。

[0052] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液、疏水的顺磁性介质或顺磁性离子液体。

[0053] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。

[0054] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。

[0055] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质包括$MnCl_2$水溶液。

[0056] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，顺磁性介质还包括十六烷基三甲基溴

化铵。

[0057] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，抗磁性或顺磁性样品包括交联的聚合物。

[0058] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该方法还包括确定交联聚合物的密度。

[0059] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，该方法还包括生成将系统中样品的悬浮高度与其密度相关联的标准曲线，并使用该标准曲线及其在系统中的悬浮高度确定交联聚合物的密度。

[0060] 在本文公开的任何一个或多个实施方案中，交联的聚合物包括聚二甲基硅氧烷。

[0061] 本文公开的任何方面或实施方案可以与本文公开的另一个方面或实施方案组合。明确考虑了本文描述的一个或多个实施方案与本文描述的其他一个或多个实施方案的组合。

附图说明

[0062] 参考以下附图来描述本申请，以下附图仅出于说明的目的而呈现，并且不意图是限制性的。在图中：

[0063] 图1A示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，包括同轴定位的块状磁体的MagLev装置。

[0064] 图1B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，轴向MagLev装置，其包括同轴定位的环形磁体。

[0065] 图2A示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，以同性极面对的同轴布置的一对不可区分的磁体以及悬浮在顺磁性介质中的抗磁性样品。

[0066] 图2B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，在穿过中心轴的垂直截面上的磁场的空间分布。

[0067] 图2C示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，沿着图2B中的垂直虚线的磁场强度Bz。

[0068] 图3A示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，使用$MnCl_2$水溶液，使用悬浮在顺磁性介质水溶液中的一串不溶于水的有机液滴来校准MagLev装置。

[0069] 图3B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，由图3A所示的校准产生的校准曲线。

[0070] 图4示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，可以使用轴向MagLev分析的扩展的密度范围。

[0071] 图5A显示了根据本文所述的一个或多个实施方案，悬浮在顺磁性水溶液中的液体聚二甲基硅氧烷预聚物的液滴。

[0072] 图5B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，悬浮在顺磁性水溶液中的Vaseline®凝胶的塞子。

[0073] 图5C示出了根据本文所述的一个或多个实施方案，在顺磁溶液中悬浮的密度标准珠粒的子群的取回。

[0074] 图6A是示出根据本文所述的一个或多个实施方案，用于定义MagLev装置的构造的

四个独立的物理参数的示意图。

[0075] 图6B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,沿磁体之间的中心轴具有约0.4T的最大场强的线性梯度的示例(插图中的虚线)。

[0076] 图6C示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,沿着磁体之间的中心轴具有约0.5T的最大场强的非线性梯度的示例(插图中的虚线)。

[0077] 图6D示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,在MagLev装置中使用的两个磁体之间的分离距离的微调。

[0078] 图6E示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,随着分离距离变化,沿着两个磁体之间的中心轴的场强Bz。

[0079] 图6F示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,在图6E中d=0.6时的曲线图。

[0080] 图7A示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,MagLev装置的组装。

[0081] 图7B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,图7A的MagLev装置的折叠图。

[0082] 图8A示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,使用单一环形磁体的磁悬浮。

[0083] 图8B示出了根据本文所述的一个或多个实施方案,图8A的单一环形磁体的磁场。

具体实施方式

[0084] 磁悬浮法(MagLev)是一种简单而有用的在各学科(例如化学、生物化学和材料科学)中利用(exploit)密度(所有物质的通用物理特性)的技术。图1A中所示的MagLev构造具有磁体的空间布置,其中样品容器(例如具有例如45mm高度的方形杯皿)被夹在两个块状NdFeB永磁体之间。这种构造不允许用户(i)轻松添加或去除顺磁性介质或悬浮样品(特别是黏性或粘性样品);(ii)从顶部或底部观察悬浮的样品;(iii)使容器内的顺磁性介质沿着磁体之间的中心轴移动;(iv)容纳比磁体之间的分离距离高的样品容器,例如高的瓶和试管。

[0085] 在本文中描述的一些实施方案中的是使用圆柱状磁体(例如环形磁体)的MagLev系统。这些“轴向”MagLev装置使得能够沿着磁场的中心轴到达样品,这对于使用MagLev装置(例如图1A的装置)的块型磁体是不可能的。在一些实施方案中,轴向MagLev使执行基于密度的磁-阿基米德分析、分离和其他操作的简单过程成为可能。在一些实施方案中,密度可以用于例如(i)分离或分析不同类型的非生物和生物材料(例如玻璃、金属、晶体多晶型物、聚合物颗粒、哺乳动物细胞、酵母和细菌);(ii)监测伴随密度变化的化学过程(例如固体载体上的化学反应和聚合反应);监测结合事件(例如配体与酶的结合,抗体与抗原的结合以及抗体与细胞的结合);(iii)进行物体的无接触定位和三维自组装;(iv)进行注塑成型塑料零件的质量控制。

[0086] 一方面,描述了一种磁悬浮系统,包括:

[0087] 第一圆柱状磁体;

[0088] 与第一圆柱状磁体同轴对准的第二圆柱状磁体;和

[0089] 与第一圆柱状磁体同轴对准的第一腔;

[0090] 其中

[0091] 第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面彼此平行并且彼此面对,从而在第一和第二磁体之间产生线性磁场。

[0092] 在一些实施方案中，第一腔是圆柱状的。在其他实施方案中，第一腔的横截面为三角形、正方形或六边形或任何其他对称形状。在一些实施方案中，申请人惊奇地发现，当一对具有同性极面对(类似于使用电磁铁的反亥姆霍兹构造)的圆柱状磁体(例如环形磁体)时，获得了线性、轴向对称的磁场，其可用于在顺磁性介质(例如$MnCl_2$或$GdCl_3$的水溶液)中悬浮抗磁性和弱顺磁性的物体(即，具有相对较弱的顺磁性质和相对较低的磁化率值的物体；例如铝)，以用于基于密度的分析、分离和操作(例如参见图1B)。在一些实施方案中，在环形磁体之间使用线性磁场有助于简化校准和执行密度测量的过程。在一些实施方案中，磁场的非线性部分，特别是环形磁体腔中的场，也可以用于执行基于密度的分离和操作。

[0093] 在一些实施方案中，参照图1B描述了轴向MagLev系统。如图1B所示，根据一个或多个实施方案，描述了轴向MagLev系统100，其包括第一圆柱状磁体101，与第一圆柱状磁体101同轴对准的第二圆柱状磁体103，以及与第一圆柱状磁体101同轴对准的第一圆柱状腔105。在一些实施方案中，第一圆柱状腔105跨过第一圆柱状磁体101的整个高度。在其他实施方案中，第一圆柱状腔105跨过第一圆柱状磁体101的高度的一部分。在一些实施方案中，磁悬浮系统100包括与第二圆柱状磁体103同轴对准的第二圆柱状腔111。在一些实施方案中，第二圆柱状腔111跨过第二圆柱状磁体103的整个高度。在其他实施方案中，第二圆柱状腔111跨过第二圆柱状磁体103的一部分高度。在一些实施方案中，第一和第二圆柱状磁体101和103是NdFeB磁体。在一些实施方案中，第一腔105和第二腔111分别是圆柱状的。在其他实施方案中，第一和/或第二腔的横截面为三角形、正方形、六边形或任何其他对称形状。

[0094] 申请人惊奇地发现，根据本文所公开的一个或多个实施方案的轴向MagLev系统(包括两个同性极面对的圆柱状磁体)在第一磁体和第二磁体之间产生线性磁场。在一些实施方案中，进一步优化磁体的尺寸、磁体的纵横比和/或两个磁体之间的距离以产生线性磁场。在一些实施方案中，在两个环形磁体(同轴对准并且同性极面对)之间产生的优化线性磁场使得能够在顺磁性悬浮介质中悬浮抗磁性和弱顺磁性材料，并且使得密度测量更直接。

[0095] 在一些实施方案中，线性磁场分别存在于第一磁体101和第二磁体103之间的空间107处。在一些实施方案中，线性磁场分别延伸到第一和/或第二圆柱状腔105和111中。在一些具体实施方案中，线性磁场分别延伸到第一和/或第二圆柱状腔105和111的高度的至少约一半。根据一个或多个实施方案，本文所使用的术语“线性磁场”是指这样的场景，其中磁场的矢量沿着构造的中心轴性地变化，使得磁场具有线性梯度。

[0096] 在一些实施方案中，圆柱状磁体也被称为“环形磁体”。在一些实施方案中，第一和第二圆柱状磁体具有不同的半径和/或高度。在一些实施方案中，第一和第二圆柱状磁体具有相同的半径或相同的高度，或两者。

[0097] 在一些实施方案中，轴向MagLev系统还包括容器(例如图1B中的109)，该容器构造成容纳顺磁性介质并且至少部分地设置在第一和第二圆柱状磁体之间。在一些实施方案中，容器109还包括入口113，其构造成允许添加或去除顺磁性介质或者顺磁性或抗磁性样品。如图1B所示，容器109包括两个末端(顶端和底端)，并且在某些实施方案中，末端中的至少一个(例如容器109的顶端)延伸进入或穿过第一圆柱状腔105。在一些实施方案中，第一圆柱状腔体105允许容器109容易地放置在两个面对的磁体101和103之间，并且容易地通过第一圆柱状腔105将容器109从轴向MagLev系统100移除。在一些实施方案中，容器的另一端

(例如容器109的底端)延伸进入或穿过第二圆柱状腔111(图1B中未示出)。类似地,在某些实施方案中,第二圆柱状腔体111允许容器109容易地放置在两个面对的磁体101和103之间,并且易于通过第二圆柱状腔111将容器109从轴向MagLev系统100中移出。容器的非限制性示例包括杯皿和试管。

[0098] 在一些实施方案中,描述了第一和/或第二圆柱状磁体的尺寸和/或纵横比,其导致两个圆柱状磁体之间的线性磁场。在一些实施方案中,第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为d,第一和第二圆柱状磁体的高度分别为h_1和h_2,并且h_1和h_2至少之一与d之比为约0.2:1至约10:1。在一些实施方案中,h_1和h_2至少之一与d之比为约0.5:1、0.8:1、1:1、1.5:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1、7:1、8:1、9:1或10:1,或本文公开之比的两值中任一个所限定的范围内。

[0099] 因此,在一些实施方案中,h_1与d之比或h_2与d之比为从约0.5:1至约10:1,从约1:1至约10:1,从约2:1至约10:1,从约3:1至约10:1,从约4:1至约10:1,从约5:1至约10:1,从约6:1至约10:1,从约7:1至约10:1,从约8:1至约10:1,或约9:1至约10:1。在一些实施方案中,h_1与d或h_2与d之比为从约0.5:1到约9:1,从约1:1到约9:1,从约2:1到约9:1,从约3:1到约9:1,从约4:1到约9:1,从约5:1至约9:1,从约6:1至约9:1,从约7:1至约9:1,或从约8:1至约9:1。在一些实施方案中,h_1与d或h_2与d之比为从约0.5:1至约8:1,从约0.75:1至约8:1,从约2:1至约8:1,从约3:1至约8:1,从约4:1到约8:1,从约5:1到约8:1,从约6:1到约8:1,或从约7:1到约8:1。

[0100] 在一些实施方案中,h_1与d之比或h_2与d之比是从约0.5:1至约4:1,从约0.75:1至约3:1,从约1:1至约2:1,从约1.5:1至约2:1,或约1.6:1至约1.8。

[0101] 在一些实施方案中,h_1和h_2中的至少一个与d之比为约1.67:1。

[0102] 在一些实施方案中,第一圆柱状磁体的内径是id_1,并且id_1与d之比是从约0.2:1到约10:1。因此,在一些实施方案中,id_1与d之比是从约0.5:1至约10:1,从约1:1至约10:1,从约2:1至约10:1,从约3:1至约10:1,从约4:1至约10:1,从约5:1至约10:1,从约6:1至约10:1,从约7:1至约10:1,从约8:1至约10:1或从约9:1至约10:1。在一些实施方案中,id_1与d之比为约0.5:1至约9:1,从约1:1至约9:1,从约2:1至约9:1,从约3:1到约9:1,从约4:1到约9:1,从约5:1到约9:1,从约6:1到约9:1,从约7:1至约9:1,或从约8:1至约9:1。在一些实施方案中,id_1与d之比为从约0.5:1至约8:1,从约0.75:1到约8:1,从约2:1到约8:1,从约3:1到约8:1,从约4:1到约8:1,从约5:1到约8:1,从约6:1到约8:1或从约7:1到约8:1。

[0103] 在一些实施方案中,id_1与d之比为从约0.5:1至约4:1,从约0.75:1至约3:1,从约1:1至约2:1,从约1.5:1至约2:1,或从约1.6:1至约1.8。

[0104] 在一些实施方案中,id_1与d之比为约1.67:1。

[0105] 在一些实施方案中,第一圆柱状磁体的外径为od_1;并且od_1与d之比为约0.3:1至约100:1。因此,在一些实施方案中,od_1与d之比为从约0.5:1至约50:1,从约1:1至约50:1,从约2:1到约50:1,从约3:1到约50:1,从约4:1到约50:1,从约5:1到约50:1,从约6:1至约50:1,从约7:1至约50:1,从约8:1至约50:1,从约9:1至约50:1或从约10:1至约50:1。在一些实施方案中,od_1与d之比为从约1:1至约10:1,从约2:1至约9:1,从约3:1至约8:1,从约4:1至约7:1,从约4:1至约6:1,或从约4:1至约5:1。

[0106] 在一些实施方案中,od_1与d之比为约5:1。

[0107] 在一些实施方案中，第一圆柱状磁体的内径(id_1)：外径(od_1)：高度(h_1)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比为约1-5:1-10:1-5:1。在一些实施方案中，第一圆柱状磁体的内径(id_1)：外径(od_1)：高度(h_1)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比为约1-3:2-8:1-3:1。在一些实施方案中，第一圆柱状磁体的内部直径(id_1)：外径(od_1)：高度(h_1)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面(d)之间的距离约为1-2:3-6:1-2:1。在一些实施方案中，第一圆柱状磁体的内径(id_1)：外径(od_1)：高度(h_1)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离之比(d)约为1.67:5:1.67:1。

[0108] 在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的内径是id_2，并且id_2与d之比是从约0.2:1到约10:1。因此，在一些实施方案中，id_2与d之比是从约0.5:1至约10:1，从约1:1至约10:1，从约2:1至约10:1，从约3:1至约10:1，从约4:1至约10:1，从约5:1至约10:1，从约6:1至约10:1，从约7:1至约10:1，从约8:1至约10:1或从约9:1至约10:1。在一些实施方案中，id_2与d之比为从约0.5:1至约9:1，从约1:1至约9:1，从约2:1至约9:1，从约3:1到约9:1，从约4:1到约9:1，从约5:1到约9:1，从约6:1到约9:1，从约在约7:1至约9:1或从约8:1至约9:1。在一些实施方案中，id_2与d之比为从约0.5:1至约8:1，从约0.75:1到约8:1，从约2:1到约8:1，从约3:1到约8:1，从约4:1到约8:1，从约5:1到约8:1，从约6:1到约8:1或从约7:1到约8:1。

[0109] 在一些实施方案中，id_2与d之比为从约0.5:1至约4:1，从约0.75:1至约3:1，从约1:1至约2:1，从约1.51:1至约2:1，或从约1.6:1至约1.8。

[0110] 在一些实施方案中，id_2与d之比为约1.67:1。

[0111] 在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的外径为od_2；并且od_2与d之比为从约0.3:1至约100:1。因此，在一些实施方案中，od_2与d之比为从约0.5:1至约50:1，从约1:1至约50:1，从约2:1到约50:1，从约3:1到约50:1，从约4:1到约50:1，从约5:1到约50:1，从约6:1至约50:1，从约7:1至约50:1，从约8:1至约50:1，从约9:1至约50:1或从约10:1至约50:1。在一些实施方案中，od_2与d之比为从约1:1至约10:1，从约2:1至约9:1，从约3:1至约8:1，从约4:1至约7:1，从约4:1至约6:1，或从约4:1至约5:1。

[0112] 在一些实施方案中，od_2与d之比为约5:1。

[0113] 在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的内径(id_2)：外径(od_2)：高度(h_2)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比为约1-5:1-10:1-5:1。在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的内径(id_2)：外径(od_2)：高度(h_2)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比为约1-3:2-8:1-3:1。在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的内径(id_2)：外径(od_2)：高度(h_2)：第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比为约为1-2:3-6:1-2:1。在一些实施方案中，第二圆柱状磁体的内径(id_2)：外径(od_2)：高度(h_2)：第一和第二柱体磁体的同性极的表面之间的距离(d)之比约为1.67:5:1.67:1。

[0114] 在一些实施方案中，第二圆柱状腔111跨过第二圆柱状磁体103的整个高度并且与第二圆柱状磁体103同轴对准；第一和/或第二圆柱状磁体的内径为约15mm至约40mm。在一些实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的内径为约15mm至约40mm，约20mm至约30mm或约22mm至约27mm。在一些实施方案中，第一和/或第二圆柱状磁体的内径为约25mm。

[0115] 在一些实施方案中，第一和/或第二圆柱状磁体的外径为约50mm至约100mm。在一些实施方案中，第一和/或第二圆柱状磁体的外径是约60mm至约90mm。在一些实施方案中，第一和/或第二圆柱状磁体的外径为约70mm至约80mm。在某些特定实施方案中，第一或第二

圆柱状磁体的外径为约75、76或77mm。

[0116] 在一些实施方案中，第一和/或第二圆柱状磁体的高度为约15mm至约50mm，约15mm至约40mm，约20mm至约30mm，或约20mm至25mm。在一些实施方案中，第一或第二圆柱状磁体的高度为约25mm。

[0117] 在一些实施方案中，第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离是约5mm到约50mm，约10mm到约50mm，约10mm到约40mm，约10mm至约30mm或约10mm至约20mm。在一些实施方案中，第一和第二圆柱状磁体的同性极的表面之间的距离为约15mm。

[0118] 在一些实施方案中，沿着第一和第二圆柱状磁体的公共轴的最大磁场为约0.20-0.50T。在一些特定实施方案中，沿着第一和第二柱体之间的中心轴的最大Bo约为0.33T，线性磁场延伸到环形磁体的腔中(大约是磁体之间分离距离的一半)。不希望受任何特定理论的束缚，据信，如本文一个或多个实施方案中所述的装置的几何形状有利于进行基于密度的分析和抗磁性样品和弱顺磁性样品的分离，以及围绕悬浮物体(例如通过相对于磁体移动样品容器)交换顺磁性介质。

[0119] 在一些实施方案中，顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液。在一些实施方案中，顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。在一些具体的实施方案中，Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。

[0120] 在一些实施方案中，顺磁性介质包括$MnCl_2$的水溶液。在一些实施方案中，顺磁性介质包括疏水顺磁性介质或顺磁性离子液体。

[0121] 在另一方面，描述了一种分析抗磁性或顺磁性样品的方法，包括：

[0122] 提供本文描述的实施方案中的任何一个的系统；

[0123] 设置容器，其构造成用于在第一圆柱状磁体和第二圆柱状磁体之间容纳顺磁性介质；

[0124] 将顺磁性介质和抗磁性或顺磁性样品分别或一起添加到容器中；和

[0125] 使抗磁性或顺磁性样品在第一和第二圆柱状磁体之间的线性磁场下悬浮。

[0126] 在一些实施方案中，通过第一圆柱状腔添加顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。在一些实施方案中，该方法还包括去除顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。在一些实施方案中，通过第一圆柱状腔去除顺磁性介质或者抗磁性或顺磁性样品。

[0127] 在一些实施方案中，顺磁性介质包括顺磁性化合物的水溶液、疏水顺磁性介质或顺磁性离子液体。在一些实施方案中，顺磁性化合物选自$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$、Gd螯合化合物及其组合。在一些实施方案中，Gd螯合化合物是二亚乙基三胺五乙酸钆(III)。在一些实施方案中，顺磁性介质包括$MnCl_2$的水溶液。在一些实施方案中，顺磁性介质还包括十六烷基三甲基溴化铵。在一些具体的实施方案中，抗磁性或顺磁性包括交联的聚合物。

[0128] 在一些实施方案中，该方法进一步包括确定交联聚合物的密度。在一些实施方案中，该方法进一步包括产生将系统中样品的悬浮高度与其密度相关联的标准曲线，并使用该标准曲线及其在系统中的悬浮高度来确定交联聚合物的密度。在一些实施方案中，交联的聚合物包含PDMS。

[0129] 尽管本文可以使用术语第一、第二、第三等来描述各种元件，但是这些元件不受这些术语的限制。这些术语仅用于将一个元件与另一个元件区分开。因此，在不脱离示例性实

施方案的教导的情况下，下面讨论的第一元件可以被称为第二元件。为了便于描述一个元件与另一元件的关系，如图中所示，在本文中可以使用空间相对术语，例如“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”等。应当理解，除了本文所述和附图所示的方位以外，空间相对术语以及所示的构造还意图涵盖设备在使用或工作中的不同方位。例如，如果翻转附图中的设备，则被描述为在其他元件或特征“下”或“之下”的元件将会被定位为在其他元件或特征“上”。因此，示例性术语“上”可以包括上和下两个方位。该设备可以以其他方式定向(例如旋转90度或以其他定位)，并且相应地解释本文使用的空间相对描述语。更进一步，在本公开中，当一个元件被称为“连接至另一元件”、“在另一元件上”、“连接到另一元件”、“连合至另一元件”、“与另一元件接触”等时，它可以是直接地连接至另一元件、在另一元件上、连接到另一元件、连合至另一元件或与另一元件接触，或者可存在中间元件，除非另有说明。

[0130] 本文使用的术语是出于描述特定实施方案的目的，并且不旨在限制示例性实施方案。在某些实施方案中，单数形式(例如“一个”和“一种”)也意图包括复数形式，除非上下文另有指示。另外，术语“包括”和“包含”指定存在所述元件或步骤，但不排除一个或多个其他元件或步骤的存在或增加。

[0131] 实施例

[0132] 现在将在以下非限制性实施例中描述某些实施方案。

[0133] 图1A示例了根据一些实施方案的MagLev装置构造，其包括两个同轴地布置的同性极面对的块状磁体(例如NdFeB永磁体，W×L×H:50.8mm×50.8mm×25.4mm)，分离距离为45.0mm。在一些实施方案中，杯皿(例如45mm高)是用于在顺磁性介质(例如$MnCl_2$的水溶液)中悬浮抗磁性样品(在图1A中由3mm的球体表示)的普通容器。

[0134] 在一些实施方案中，轴向MagLev装置包括圆柱状磁体，例如环形磁体，其产生的构造移除了在图1A的MagLev装置中存在的磁场中的物理采样的物理障碍。因此，在一些实施方案中，轴向MagLev简化了用于执行基于密度的分析、分离和操作的过程。在某些实施方案中，在两个环形磁体(同轴对准并且同性极面对)之间产生的优化线性磁场使得能够在顺磁性悬浮介质中悬浮抗磁性(和弱顺磁性；例如铝)材料，并使密度测量更直接。在某些实施方案中，轴向构造使得能够(i)从容器的开口端添加样品和/或顺磁性介质，以及在它们于磁场中悬浮时从容器中取回样品(例如一簇小颗粒的子群)；(ii)能够在样品容器周围以及从其顶部和底部360°观察样品；(iii)少量样品(如所示，小至单个亚毫米颗粒)的方便密度测量。轴向MagLev装置的紧凑设计、便携性、可承受性以及使用简便性将拓宽磁性方法在分析、分离和/或操作不同类型样品(例如固体、液体、粉末、糊剂、凝胶、和生物实体)在例如材料科学、化学和生物化学中的应用。

[0135] 在一些实施方案中，将一对环形磁体放置成具有同性极面对(类似于使用电磁铁的反亥姆霍兹构造)以设计线性的、轴向对称的磁场，并且该磁场用于使抗磁性和弱顺磁性(例如铝)物体悬浮于顺磁性介质(例如$MnCl_2$或$GdCl_3$的水溶液)中，以用于基于密度的分析、分离和操作(图1B)。在一些实施方案中，在环形磁体之间使用线性磁场有助于简化校准和执行密度测量的过程。在其他实施方案中，磁场的非线性部分，特别是环形磁体腔中的场，也可以用于执行基于密度的分离和操作。

[0136] 图1B例示了根据一个或多个实施方案的轴向MagLev装置，该装置包括同轴放置的两个同性极面对的环形磁体(例如NdFeB永磁体，OD×ID×H:76.2mm×25.4mm×25.4mm)，分

离距离为15.0mm。在这些实施方案中，包括了包含样品(在图1B中由3mm的球体表示)的杯皿以示出装置的尺寸。

[0137] 在一些实施方案中，优化磁体的尺寸和纵横比以产生线性磁场。在某些实施方案中，沿着磁体之间的中心轴的最大Bo为约0.3T、0.4T、0.5T、0.6T、0.7T、0.8T、0.9T、1.0T，或者在由本文公开的任何两个值限定的范围内。在某些实施方案中，沿着磁体之间的中心轴的最大Bo为约0.33T，并且线性磁场延伸到环形磁体腔中(约是磁体之间的分离距离的一半)。在这些实施方案中，这种几何形状使得可以进行抗磁性和弱顺磁性样品的基于密度的分析和分离，以及交换悬浮物体周围的顺磁性介质(例如通过相对于磁体移动样品容器)。

[0138] 在一些实施方案中，使用两个环形磁体的轴向MagLev构造使许多新过程比常规MagLev更易得或更方便。因为在一些实施方案中，在该轴向构造中样品容器的顶部和底部均易于接近，所以可直接回收样品并交换悬浮物体周围的顺磁性介质，而不必从磁场取出样品容器。

[0139] 装置设计

[0140] 在一些实施方案中，将两个环形磁体(例如NdFeB永磁体)以同性极面对同轴地放置，使得磁体之间的磁场梯度是线性的，然后中心轴与重力矢量对准。如图2A所示，使用Comsol®模拟磁场以优化环形磁体的几何形状，包括内径(id)、外径(od)、磁体高度(h)以及磁体之间的分离距离磁体(d)，以使它们之间的线性磁场强度最大化。在一些实施方案中，利用了由永磁体产生的磁场的“同位(homothetic)”性质，即，当磁体的物理尺寸增加或减少时，磁场的空间分布(即其空间的分布)保持不变。在一些实施方案中，因此优化了磁体的“纵横比”(即id:od:h:d)以最大化场强度(有关细节，请参见图6A-6F和表2)。这些模拟的结果表明，在一些实施方案中，磁体之间的磁场强度对于Bo可以是线性的，直到约0.4T或0.5T。尽管聚焦了磁体之间的间隙中的线性梯度，但在一些实施方案中，线性梯度的最大范围稍微延伸到环形磁体的腔中，并且大约为图1B所示的装置的环形磁体的内径的尺寸。

[0141] 图2A至图2C示出了根据一个或多个实施方案的使用环形磁体的轴向MagLev装置的设计。如图2A示出了根据一个或多个实施方案，以同性极面对同轴布置的一对不可区分的磁体(内径:外径:高度:分离距离＝1:3:1:0.6)，和悬浮在顺磁性介质中的抗磁性物体(样品)。在这些实施方案中，装置的z轴与重力矢量不对准。图2B示出了根据一个或多个实施方案的在穿过中心轴的垂直截面上的磁场的空间分布(中心轴与垂直虚线重叠)。如图2C示出了根据一个或多个实施方案的沿(图2B)中的垂直虚线的磁场强度Bz。对于本文显示的构造，使用两个N45级NdFeB永磁体，Bo＝约0.33T。此图的z轴无单位。

[0142] 在一些实施方案中，使用了两个NdFeB环形磁体，它们具有相同的形状(外径76mm、内径25mm、高度25mm)，相距15mm。不希望受任何特定理论的束缚，据信在一些实施方案中，这种构造(i)在磁体之间产生强的线性场(Bo＝约0.33T)；(ii)磁体之间的工作距离大(15mm)；(iii)紧凑的，因此便于观察样品(与使用具有较大od/id之比的磁体的构造相反)；(iv)使用市售的磁体；(v)使用相对便宜的磁体(例如每个磁体约50美元)。在一些实施方案中，使用3D打印的塑料外壳，金属棒和螺钉来将磁体机械地固定在空间中(图7A-7B)。在一些实施方案中，不同尺寸的环，以及与一个或多个通量集中器(例如软铁板)的组合，也可以用于成形磁场，从而悬浮抗磁性物体。

[0143] 如图8A所示，根据一个或多个实施方案，将沿其中心轴具有两个局部最小值的单

个环形磁体用于在顺磁性介质中悬浮抗磁性物体。已经发现，在这些实施方案中，场的这种空间分布导致沿着任一侧的中心轴的非线性磁场，而不是如本文公开的轴向MagLev系统(例如图1B的轴向MagLev系统)中产生的线性磁场。在一些实施方案中，优化的线性磁场简化了校准和执行密度测量的过程。而且，在一些实施方案中，轴向MagLev构造使得可(i)从容器的开口端容易地添加样品和/或顺磁性介质，以及在它们悬浮在磁场中时取回样品(例如小颗粒簇的子群)；(ii)能够在样品容器周围以及从顶部和底部360°观察样品；(iii)少量样品(如所示的小至单一亚毫米颗粒)密度的方便测量。

[0144] 顺磁性介质的选择

[0145] 在一些实施方案中，使用顺磁性物质(例如$MnCl_2$、$MnBr_2$、$CuSO_4$、$GdCl_3$、$DyCl_3$、$HoCl_3$和Gd螯合物(例如二亚乙基三胺五乙酸钆(III))的水溶液来悬浮物体。在一些实施方案中，这些顺磁性物质是廉价的、在光谱的可见区域透明(即使在高浓度下)且可商购。在一些实施方案中，MagLev还与疏水的顺磁性介质和顺磁性离子液体一起使用。

[0146] 选择交联聚合物材料和溶剂以测量溶胀率

[0147] 在一些实施方案中，轴向MagLev用于通过使用含水$MnCl_2$悬浮介质而测量干的和完全溶胀的样品的密度来测量疏水性溶剂中的交联的聚合物材料，特别是不规则形状和少量的那些交联的聚合物材料的溶胀率。

[0148] 在一些实施方案中，交联的聚合物材料的溶胀率(体积比)可以表征其通过溶剂的吸附(即，溶剂吸附到材料的交联网络中)而膨胀的趋势。在一些实施方案中，该比率部分反映了聚合物材料中存在的交联密度以及溶剂与聚合物链相互作用的方式；因此，它是表征跨不同领域的交联聚合物的有用参数，例如固相有机合成，超吸附性材料的开发以及聚合物材料在药物释放应用中的用途。

[0149] 在一些实施方案中，可以使用多种技术来测量交联的聚合物材料的溶胀率，包括使用刻度量筒(以监视例如颗粒集合的总体积)，重量分析技术(以称量样品)、光学显微镜(以测量样品的尺寸)和专用仪器。然而，这些技术在一些实施方案中可能是乏味的，需要大量的样品(以克为单位)，和/或与不同类型的样品(例如不规则形状的样品、粉末、细腻的或凝胶状材料)具有有限的相容性。

[0150] 在一些实施方案中，轴向MagLev被开发为一种简单且广泛相容的工具来测量交联的聚合物材料在溶剂中的溶胀率。在一些实施方案中，选择交联的PDMS作为该演示的模型材料。已经表征了PDMS在多种有机溶剂中的溶胀行为(在开发基于PDMS的微流体装置的背景下)。

[0151] 在一些实施方案中，轴向MagLev技术使用$MnCl_2$的水溶液悬浮样品；用于使PDMS样品溶胀的溶剂不应溶于水溶液中。在先前研究中表征的39种溶剂中，在此研究了以下三种示例性疏水溶剂：氯仿、氯苯和甲苯。在一些实施方案中，与水混溶的溶剂的使用可要求样品(用溶剂浸泡的PDMS)和悬浮介质(例如使用溶解在疏水性溶剂中的疏水性Gd螯合物)的溶解度的相同相容性。

[0152] 校准

[0153] 在一些实施方案中，使用疏水性有机液体来校准装置，因为：(i)它们具有已知的密度；(ii)它们可以用作小液滴(例如直径为1-2mm)，该特征有助于精确定位质心(与约4mm，通常常用的不规则形状的标准玻璃珠粒相比)；(iii)它们是可商购的。在一些实施方

案中，水在疏水性溶剂中的溶解度对溶剂密度的影响可忽略不计。例如，在一些实施方案中，在室温下水在氯苯中的溶解度为0.3mol％，并且溶解的水仅引起其密度小于0.01％的变化。

[0154] 图3A-3B示出了根据一或多个实施方案的使用水不溶性有机液体校准轴向MagLev装置。图3A示出了根据一个或多个实施方案的一串五滴(约3mL)有机液体，其通过移液器被顺序地添加到方形杯皿中并悬浮在0.5M $MnCl_2$的水溶液中。图3B示出了根据一或多个实施方案的使用$MnCl_2$水溶液获得的校准曲线。在这些实施方案中，将具有毫米刻度的标尺放置在杯皿旁(读至±0.1毫米)，并使用数码相机拍摄液滴的照片。在一些实施方案中，悬浮高度h是液滴的质心与底部磁体的上表面之间的距离(h的图示参见图2A)。在一些实施方案中，用于校准3.0M $MnCl_2$溶液的有机液体为环己烷($\rho=0.779g/cm^3$)、氟苯($\rho=1.024g/cm^3$)、二氯甲烷($\rho=1.325g/cm^3$)、1,1,2-三氯三氟乙烷($\rho=1.57g/cm^3$)和FC40($\rho=1.85g/cm^3$)。在这些实施例中，线性拟合的方程对于0.5M $MnCl_2$为$h=-61.5\rho+71.9$($R^2=0.9997$)，而对于3.0M $MnCl_2$则$h=-11.4\rho+21.9$($R^2=0.9999$)。在这些实施方案中，所有密度均取自Sigma-Aldrich报告的值。将数据绘制为平均值±标准偏差(所有测量，N＝7)。误差线远小于符号尺寸，因此在图上不可见。在一些实施方案中，液滴的悬浮高度在30分钟的时间内没有变化。

[0155] 可以测量的密度范围

[0156] 在一些实施方案中，在图4中所示，使用包含0.01％(v/v)Tween-20的3.0M $DyCl_3$浓缩水溶液来悬浮物体，其范围从气泡($\rho\approx0g/cm^3$)到硅酸锆($\rho\approx3.7g/cm^3$)。在这些实施方案中，除了铝样品外，所有样品都是球形的，该铝样品的形状是不规则的(是从250mm厚的箔切下来的)。在一些实施方案中，使用方形杯皿(1cm光程长度)使样品悬浮，并且使用以下溶剂校准装置：环己烷($\rho=0.779g/cm^3$)、二氯甲烷($\rho=1.325g/cm^3$)、1,2-二溴乙烷($\rho=2.18g/cm^3$)和三溴甲烷($\rho=2.89g/cm^3$)。在这些实施方案中，数据的线性拟合给出$h=-3.43\rho+12.9$($R^2=0.9999$)。在一些实施方案中，所报告的密度是从购买材料的商业供应商获得的(例如McMaster-Carr和Sigma-Aldrich)。N＝7次测量。

[0157] 在一些实施方案中，具有高磁化率($DyCl_3=5.5\times10^{-7}m^3/molvs.MnCl_2=1.83\times10^{-7}m^3/mol$)的浓缩顺磁性盐(例如$DyCl_3$)和磁场强度的陡峭梯度(约43T/m的轴向MagLev，vs.约17T/m的常规MagLev)的组合使用可导致宽的可得密度范围(从约$0g/cm^3$到约$3.7g/cm^3$)。相比之下，使用$MnCl_2$的水溶液和常规的MagLev装置，较早期的工作仅达到约$0.8g/cm^3$至约$3g/cm^3$的范围。在某些实施方案中，倾斜的MagLev(常规MagLev的一种变体，其中装置相对于重力矢量倾斜，并且在样品沿装置的中心轴悬浮时样品部分地搁在样品的容器壁上)可以测量在环境条件下在物质中观察到的整个密度范围(从约$0g/cm^3$到约$23g/cm^3$)。在一些实施方案中，如本文所公开的轴向MagLev系统展示出超出常规MagLev密度范围的密度范围，在实验上显著更加方便，并且避免了倾斜的MagLev的一些潜在问题(例如样品搁在样品容器壁上)

[0158] 添加和/或取回样品的程序

[0159] 在一些实施方案中，轴向MagLev构造方便地使得能够从容器添加和/或取回样品。图5A-5C通过悬浮“粘性”或黏性样品(PDMS预聚物滴和Vaseline®凝胶塞)，展示了根据一个或多个实施方案的这些程序，使用常规或倾斜的MagLev装置不方便测量这些样品类

型,因为样品倾向于粘附至容器壁,并且也粘附至液-气界面。根据一个或多个实施方案的轴向MagLev构造还容易地使得能够(例如从颗粒的集合)取回样品的目标部分。

[0160] 在一些实施方案中,将充满顺磁性介质的试管放置在轴向MagLev装置中,并将"粘性"样品从其顶部添加到容器中。在这些实施方案中,样品通过重力进入介质,并在其中悬浮(对于mm尺寸的样品几乎是瞬时的,图5A-5C)。

[0161] 图5A-5B示出了根据一个或多个实施方案的添加或取回样品的过程。图5A示出了根据一个或多个实施方案的悬浮在0.5M $MnCl_2$的水溶液中的PDMS预聚物液滴(为了可视化而掺杂有黑色石墨粉末)。在一些实施方案中,由于圆柱状试管的弯曲壁的视觉畸变,液滴看起来是椭圆形的。图5B示出了根据一个或多个实施方案的从注射器挤出的Vaseline®凝胶塞,其悬浮在含有0.1%(v/v)Tween-20的3.0M $MnCl_2$的水溶液中。图5C示出了根据一个或多个实施方案的密度标准珠粒的子群的取回。在一些实施方案中,取回的珠粒悬浮在与它们最初被除去的高度相同的高度上(参见第三子图)。在这些实施方案中,悬浮液包含0.5M $MnCl_2$、1.4M NaCl(用于使溶液和颗粒的密度匹配的抗磁性共溶质)和0.1%(v/v)的Tween-20。如图5C所示,箭头指示根据一个或多个实施方案的颗粒的密度分布(单位:g/cm^3)。

[0162] 在一些实施方案中,由于其轴向构造,可直接从放置在MagLev装置中的容器中取回样品。根据一个或多个实施方案,使用密度标准(聚乙烯颗粒,直径约200微米,标称密度1.13g/cm^3)来证明这一点。在某些实施方案中,将尖端弯曲约90°的巴斯德(Pasteur)玻璃移液管从样品容器(直径约25mm的试管)的顶部插入,并移除悬浮在$MnCl_2$水溶液中的颗粒子群。在某些实施方案中,其余样品保持悬浮且不受干扰。在某些实施方案中,当放回装置时(图5C),可预期,在相同介质中以相同的高度悬浮所除去的部分,但是密度分布变窄约5倍(因此改善了精度)。因此,在某些实施方案中,如本文所公开的轴向MagLev提供了制备高品质密度标准的直接方法。

[0163] 溶剂中交联聚合物的溶胀率

[0164] 在一些实施方案中,选择PDMS作为模型交联聚合物以证明轴向MagLev在表征交联聚合物在溶剂中的溶胀行为中的用途。在某些实施方案中,将PDMS小片(直径1.5mm,厚度约1mm,由1.5mm活检穿孔器制备)浸入溶剂中24小时。在某些实施方案中,将样品吸干,并使用含有0.1%(v/v)十六烷基三甲基溴化铵(有助于除去气泡的表面活性剂)的1.5M $MnCl_2$水溶液添加到MagLev装置中用于密度测量。在一些实施方案中,MagLev能够直接测量样品的密度,而不管其体积(或形状)如何。在一些实施方案中,使用等式1将测量的密度转换为体积溶胀比(参见表1)。

[0165] $$f = \frac{V_{sp}}{V_p} = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_{sp} - \rho_s} \qquad (1)$$

[0166] 在等式1中,在一些实施方案中,V_{sp}是溶胀样品的体积,V_p是干燥样品的体积,ρ_p是样品的密度,ρ_{sp}是溶胀样品的密度,ρ_s是溶剂的密度。

[0167] 在一些实施方案中,使用悬浮高度测量来自相同图像的干燥和溶胀样品的直径,并估计溶胀率。在一些实施方案中,结果的一致性(在10%偏差内)验证了MagLev技术的性能。在一些实施方案中,与文献值的差异可源自不同的样品制备。在一些实施方案中,该演

示还突出了MagLev技术在测量少量样品中的简单性和相容性，而无需使用更复杂的工具(例如显微镜)。

[0168] 表1.PDMS样品在某些溶剂中的溶胀率。

[0169]

	体积溶胀率(*f*)		
溶剂	**MagLev**[a]	**成像**[b]	**文献**[c]
氯仿	2.1	1.9	2.7
氯苯	2.2	2.1	1.8
甲苯	2.2	2.2	2.2

[0170] a.N＝3;3次测量的平均值。

[0171] b.使用等式$f=(D/D_0)^3$计算体积溶胀率，其中D是溶胀的PDMS盘的直径，D_0是干燥的PDMS盘的直径。假定PDMS样品在溶剂中各向同性溶胀。N＝3。

[0172] C.在Lee等人，“Solvent Compatibility of Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices”，2003,Vol.75,pp.6544-6554报道了PDMS小片的溶胀率。使用以下比例的溶胀的PDMS样品与干燥的样品的长度之比：氯仿1.39、氯苯1.22、甲苯1.31。这些值被转换为体积溶胀率。

[0173] 在一些实施方案中，轴向MagLev悬浮利用由两个同性极面对的环形磁体产生的轴向对称磁场来执行基于密度的分析、分离和操作。在一些实施方案中，MagLev的这种构造消除了沿常规MagLev装置的中心轴的物理屏障，在常规MagLev装置中，样品容器(例如方形杯皿或毛细管)物理地夹在两个块状磁体之间。在某些实施方案中，轴向MagLev具有四个有用的特性：(i)它提供了对悬浮样品和顺磁性介质的便捷到达，可直接添加或去除样品或悬浮介质：(ii)围绕着样品容器保持观察悬浮样品的全间隙(360°)，并且还提供了从顶部和底部观察样品的便捷到达。(iii)不限制样品容器的高度，并且与不同类型的容器(例如杯皿、瓶、试管、刻度量筒等)广泛相容，只要它们适合环形磁体内径即可。(iv)它沿共同的垂直轴集中小和/或稀的颗粒，并有助于它们的可视化和操作。

[0174] 在一些实施方案中，轴向MagLev在磁体之间产生线性磁场。在某些实施方案中，非线性磁场也可以用于执行基于密度的测量和分离，提供适当的校准。在某些实施方案中，两个磁体之间的工作距离可以至少延伸到约38mm，同时单调改变磁场梯度(从而改变密度)。

[0175] 图6A-F示出了根据一个或多个实施方案的使用Comsol®模拟对环形磁体之间的几何形状和分离距离的选择。图6A是示出根据一个或多个实施方案的用于限定装置构造的四个独立的物理参数的示意图(od:外径，id:内径，h:磁体的高度，d:分离距离)。在表2中给出了在这些实施方案中使用Comsol®模拟探索的参数组合。图6B示出了根据一个或多个实施方案的沿磁体之间的中心轴具有约0.4T的最大场强度的线性梯度的具体示例(插图中的虚线)。图6C示出了根据一个或多个实施方案的沿着磁体之间的中心轴具有约0.5T的最大场强度的非线性梯度(插图中的虚线)。图6D示出了根据一个或多个实施方案的两个磁体之间的分离距离的微调(od:3，id:1，h:1)。图6E示出了根据一个或多个实施方案的当分离距离以0.2的步长从0.2变化到2时沿着两个磁体之间的中心轴的场强度Bz。图6F示出了图6E中d＝0.6时的曲线的重绘。在一些实施方案中，聚焦这些参数的纵横比(d＝1)以优化磁场分布，因此，这些参数都是无单位的。

[0176] 密度是所有物质的通用属性，并且简单、便宜且有用的MagLev装置(例如本文所述

的轴向MagLev装置)可以扩展基于MagLev的密度分析在化学、生物化学和材料科学中的实用性。在一些实施方案中,轴向MagLev装置的紧凑设计、便携性、可负担性以及使用的简单性可以使材料的表征(例如交联的聚合物材料在溶剂中的溶胀行为)、样品的分离(特别是少量,例如晶体),以及在没有物理接触的情况下操作样品(例如硬的、软的和粘性物体,例如凝胶)成为可能。

[0177] 表2.使用Comsol®模拟检查的参数。

[0178]

参数	范围	说明
d	1	两个磁体的分离距离
id	0.25,0.5,1,2,4	环形磁体的内径
k_{od}	0.5,1,2,4,8,16	定义环形磁体的外径的参数(od=id×(1+k_{od})
h	0.25,0.5,1,2,4	环形磁体的高度

[0179] 材料

[0180] 在一些实施方案中,聚酰胺-酰亚胺(Torlon®)和聚四氟乙烯(Torlon®)获自McMaster-Carr。在一些实施方案中,铝箔获自Sigma-Aldrich。在一些实施方案中,硅酸锆获自Cosphere LLC。在一些实施方案中,空气密度获自CRC Handbook of Chemistry and Physics,98^{th} Edition。

[0181] 溶胀率与密度的相关性

[0182] 在一些实施方案中,等式S1给出了干燥状态下的交联聚合物样品的密度,等式S2给出了溶胀状态下的密度,等式S3给出了样品的溶胀率:

[0183] $$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \qquad (S1)$$

[0184] $$\rho_{sp} = \frac{m_p + m_s}{V_{sp}} \qquad (S2)$$

[0185] $$f = \frac{V_{sp}}{V_p} \qquad (S3)$$

[0186] 在等式S1-3中,m_p是样品的质量,m_s是溶胀样品中存在的溶剂的质量,V_{sp}是溶胀样品的体积,V_p是干燥样品的体积,ρ_p是样品密度,ρ_{sp}为溶胀样品的密度,ρ_s为溶剂的密度。

[0187] 在一些实施方案中,对于溶胀的样品,溶剂的质量由等式S4描述:

[0188] $m_s=\rho_s(V_{sp}-V_p)$ (S4)

[0189] 在一些实施方案中,求解等式S1-S4给出等式S5,其描述了膨胀率与密度之间的关系。

[0190] $$f = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_{sp} - \rho_s} \qquad (S5)$$

[0191] 将理解的是,尽管出于解释的目的已经示出和描述了一种或多种特定的材料或步骤,但是这些材料或步骤可以在某些方面进行改变,或者可以将材料或步骤进行组合,同时仍获得期望的结果。另外,对所公开的实施方案和所要求保护的本发明的修改是可能的,并

且在本发明的范围内。

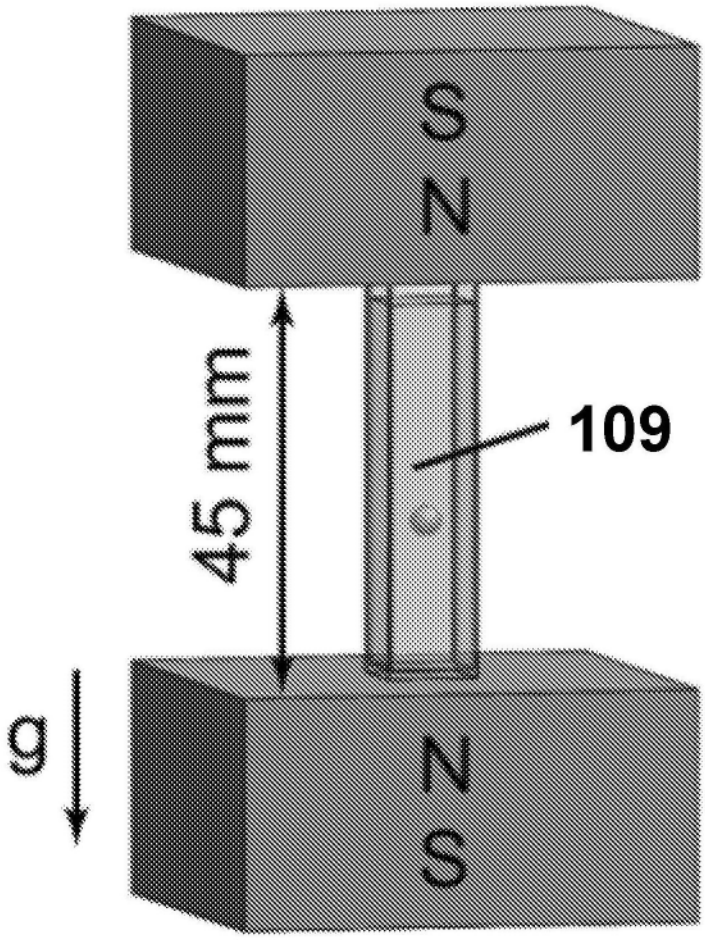


图1A

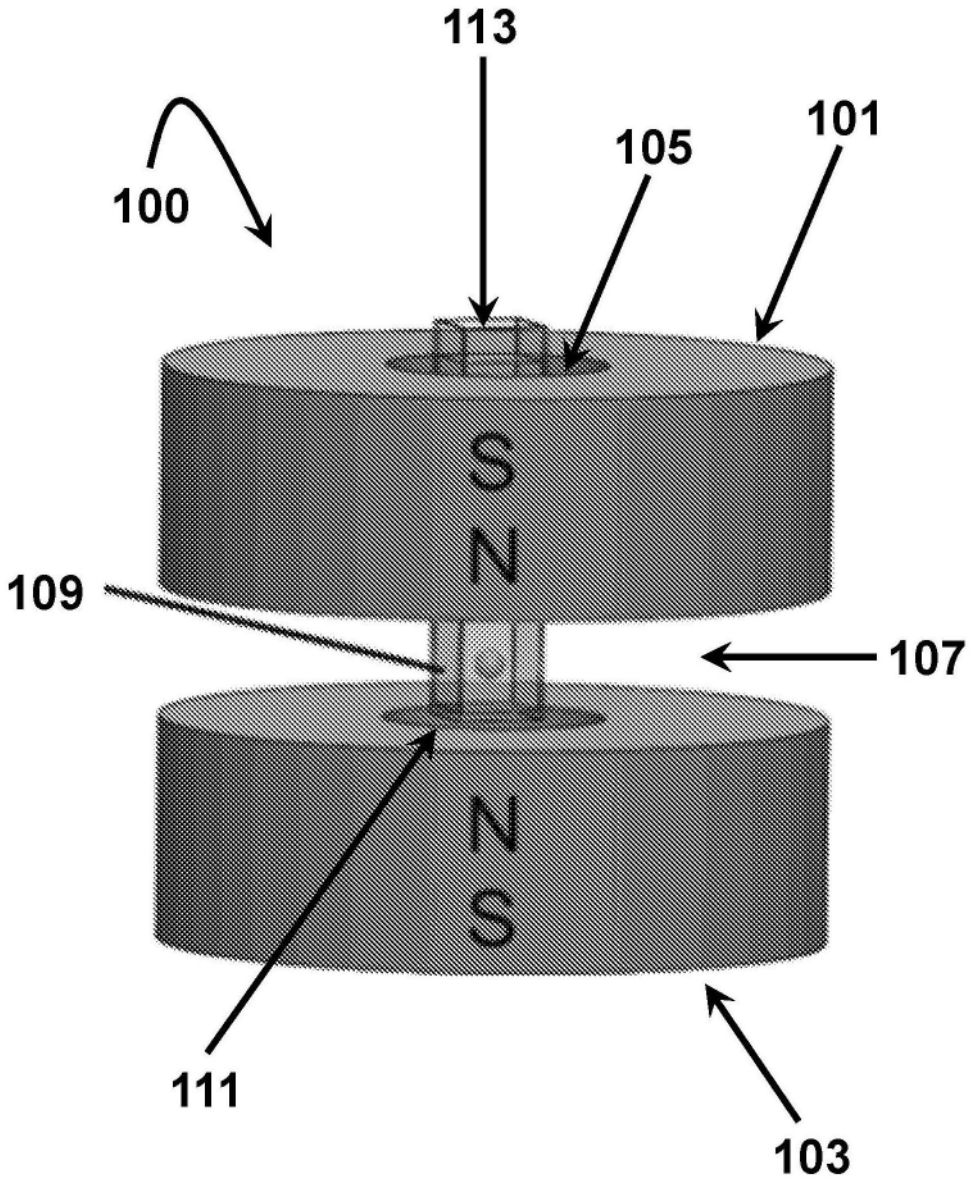


图1B

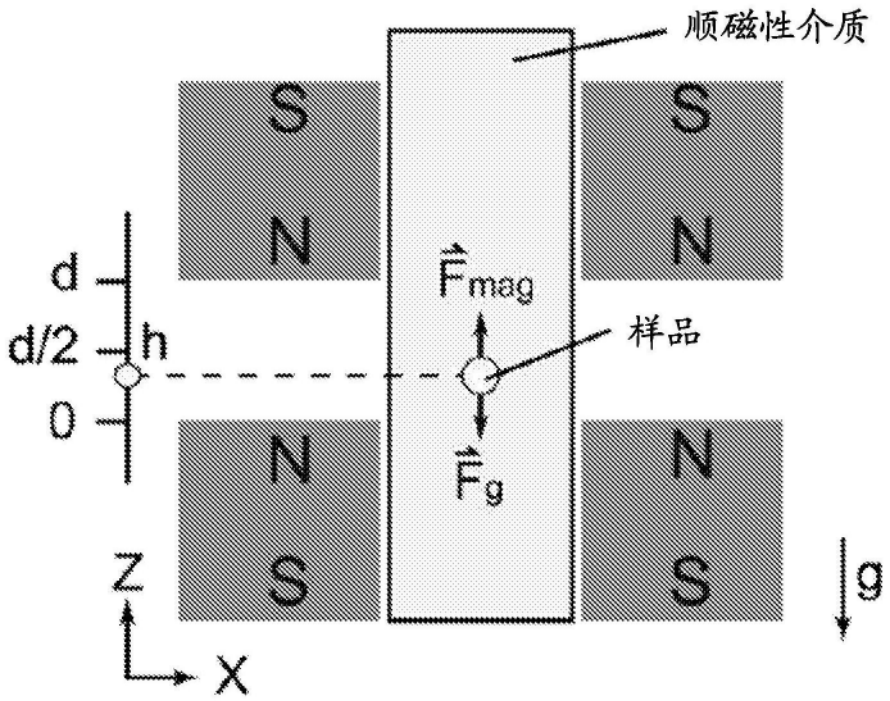

顺磁性介质
S
N
S
N
d
d/2
h
0
$\vec{F}_{mag}$
样品
$\vec{F}_g$
N
S
N
S
Z
X
g

图2A

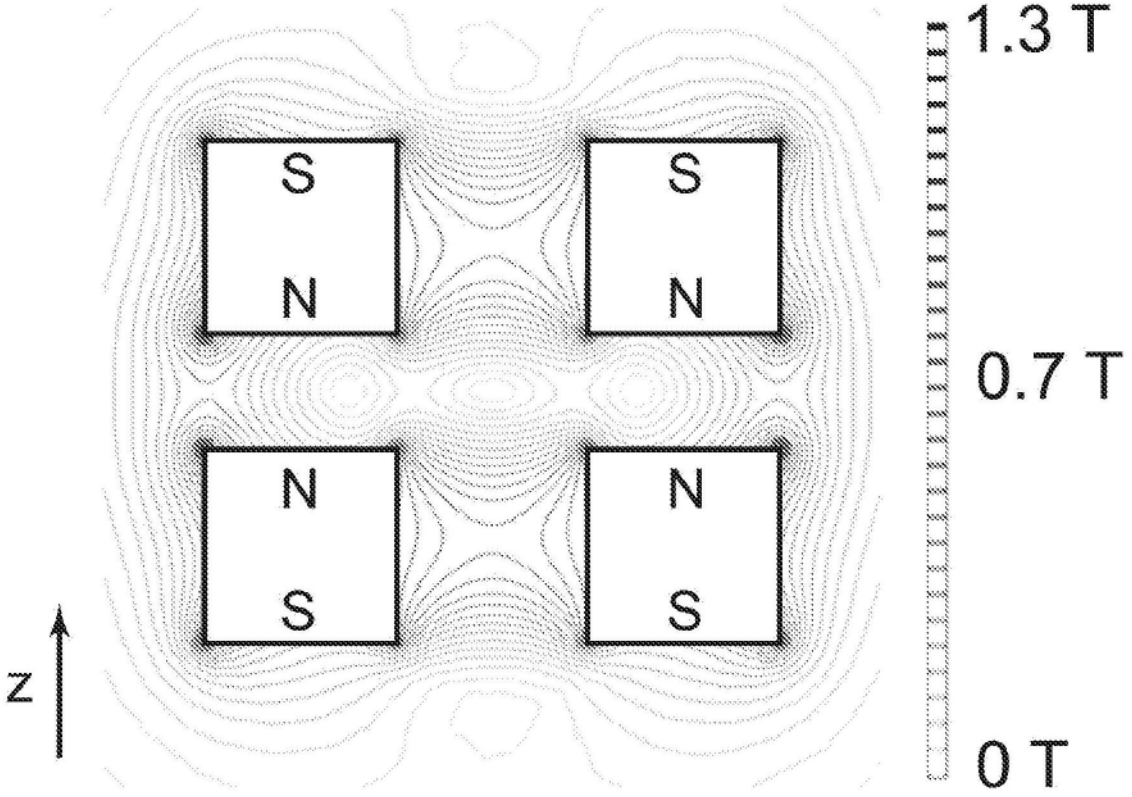

S
N
S
N
N
S
N
S
z
1.3 T
0.7 T
0 T

图2B

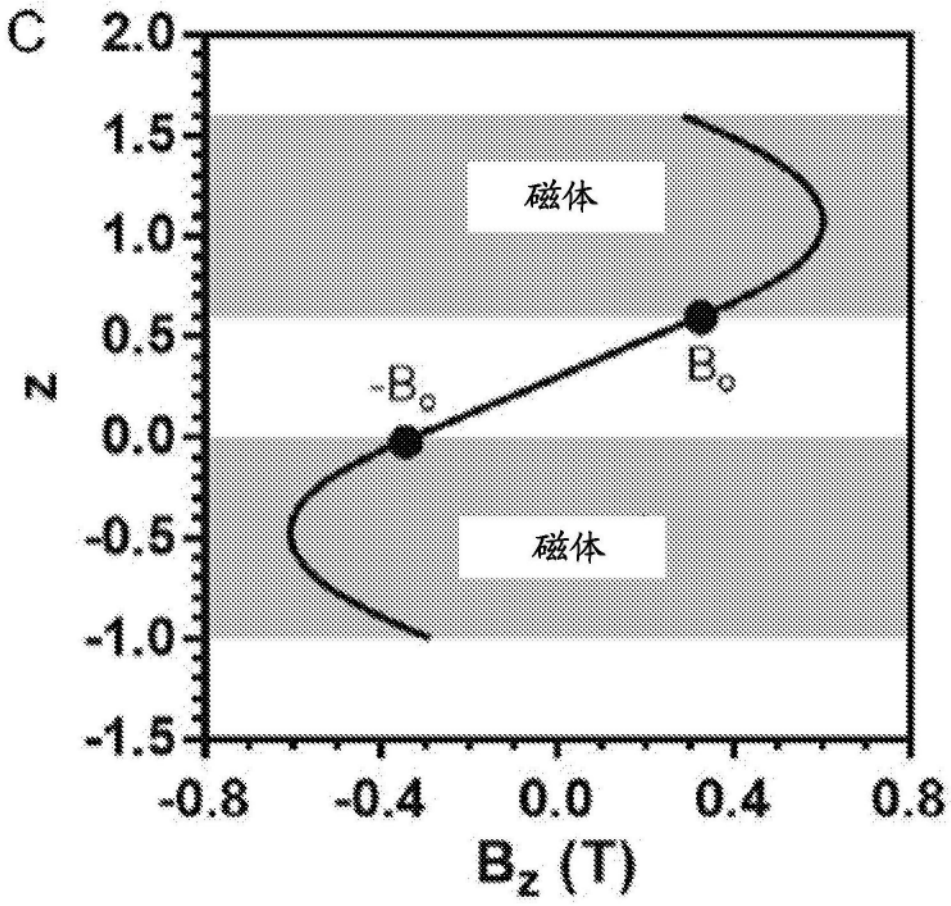


图2C

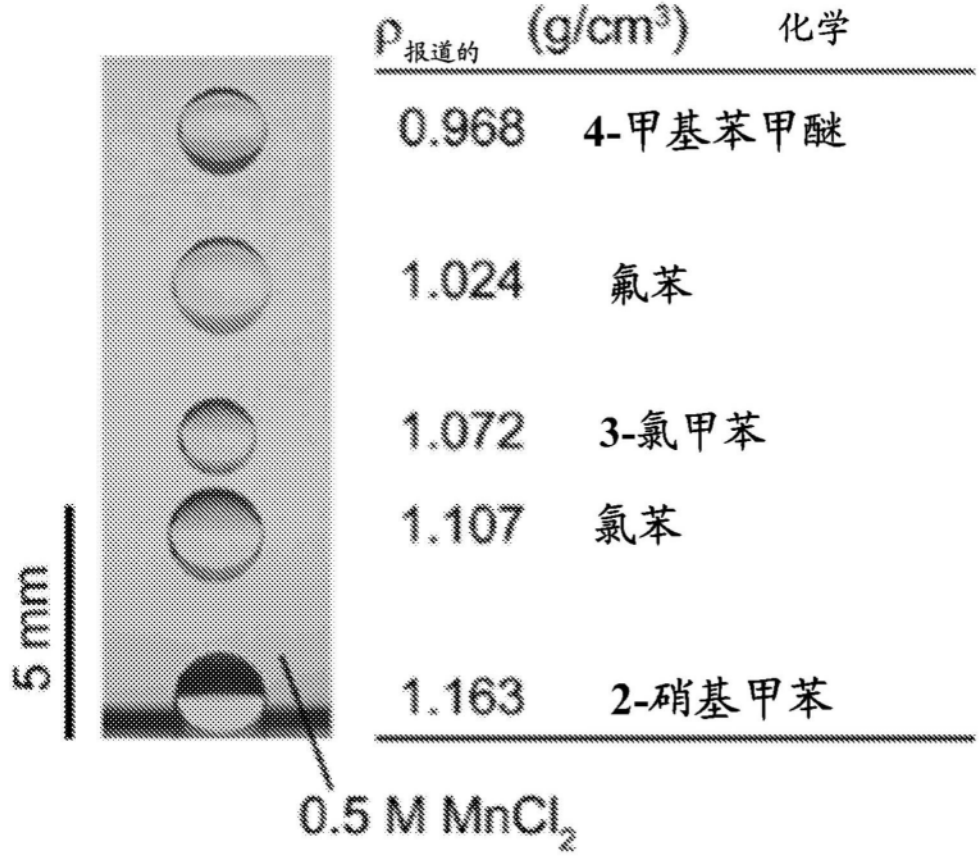

ρ报道的 (g/cm³) 化学
0.968 4-甲基苯甲醚
1.024 氟苯
1.072 3-氯甲苯
1.107 氯苯
1.163 2-硝基甲苯
5 mm
0.5 M MnCl2

图3A

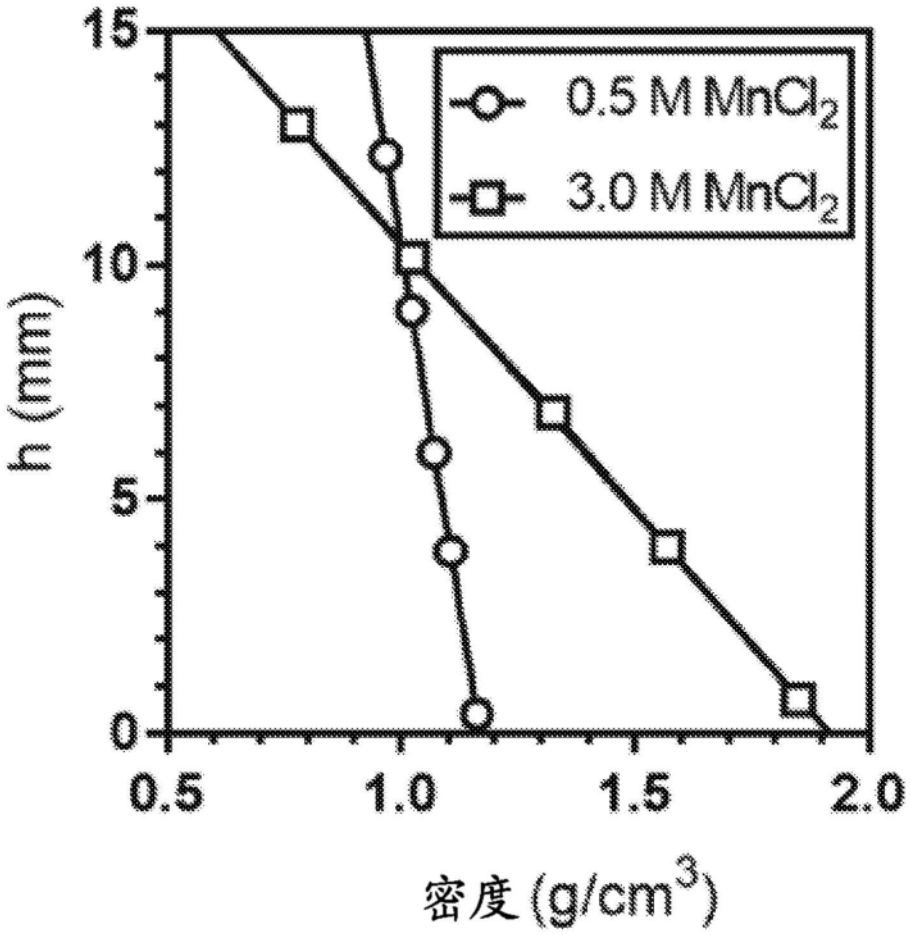
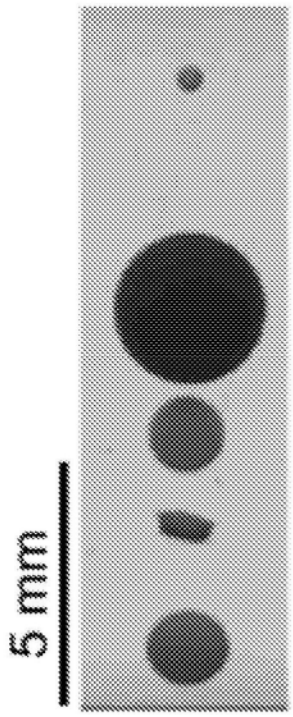


图3B



	ρ (g/cm3) 测量的	报道的
空气	-0.01±0.02	0.001
Torlon®	1.37±0.02	1.40
Teflon®	2.11±0.01	2.15
铝	2.68±0.02	2.74
锆硅酸盐	3.70±0.05	3.73

图4

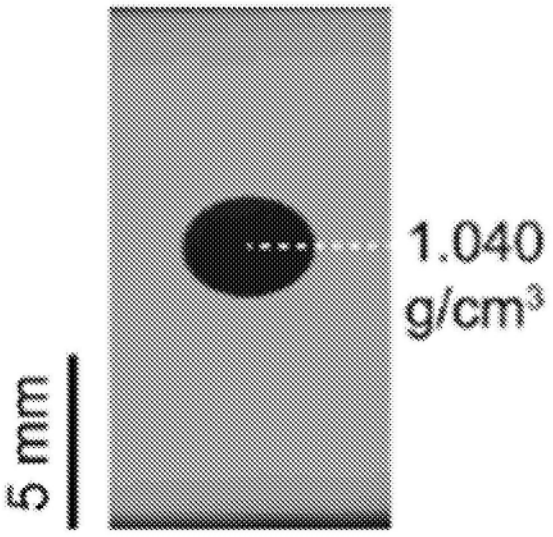


图5A

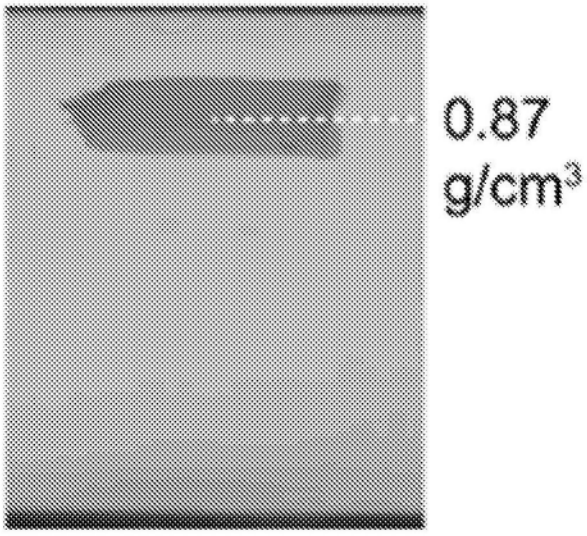


图5B

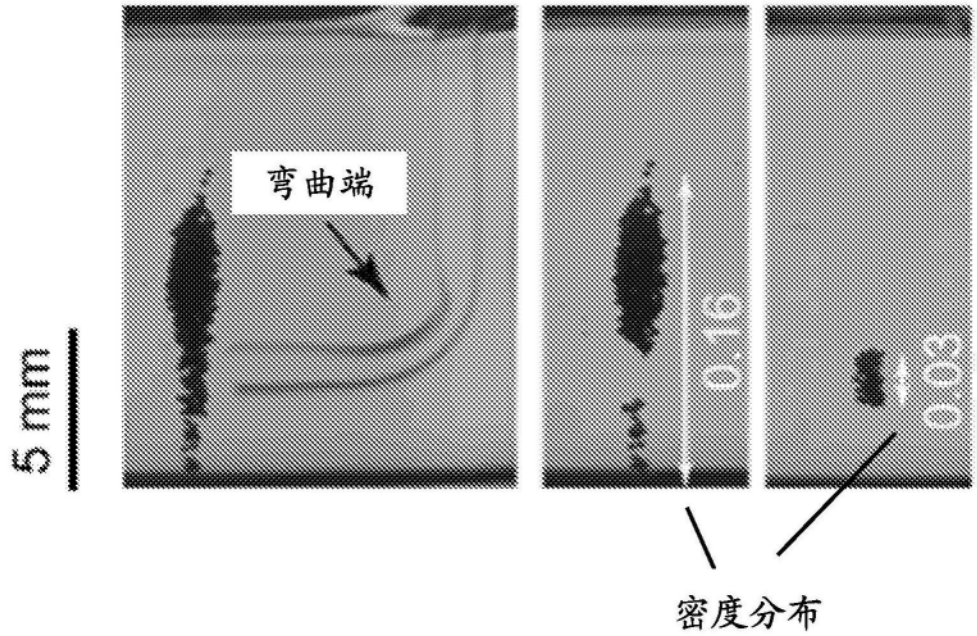


图5C

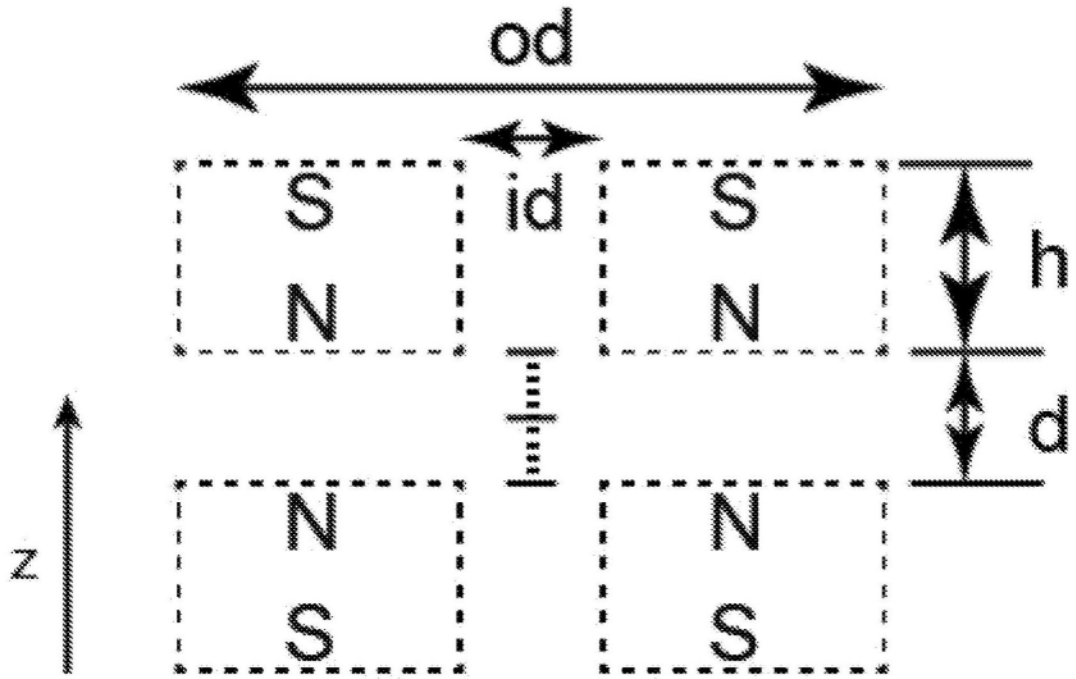


图6A

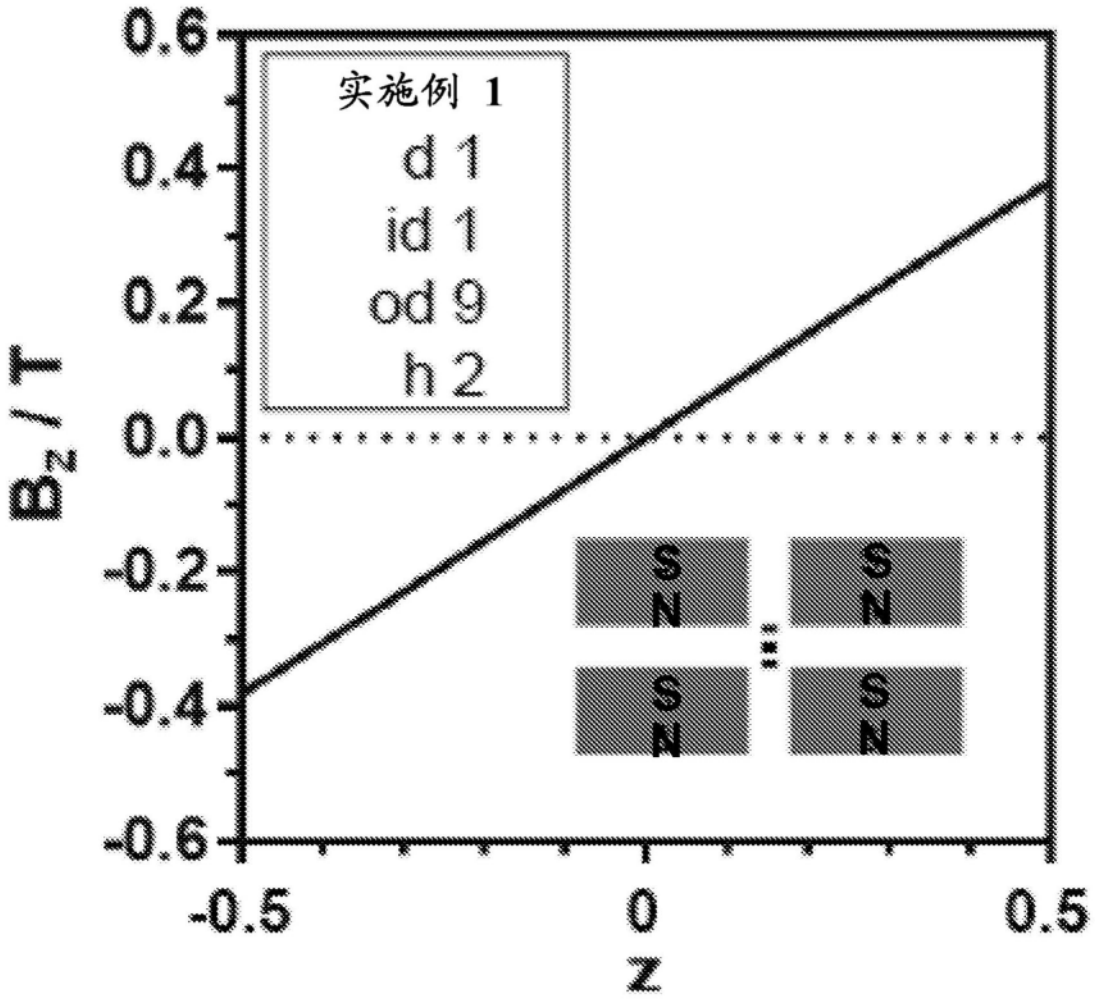


图6B

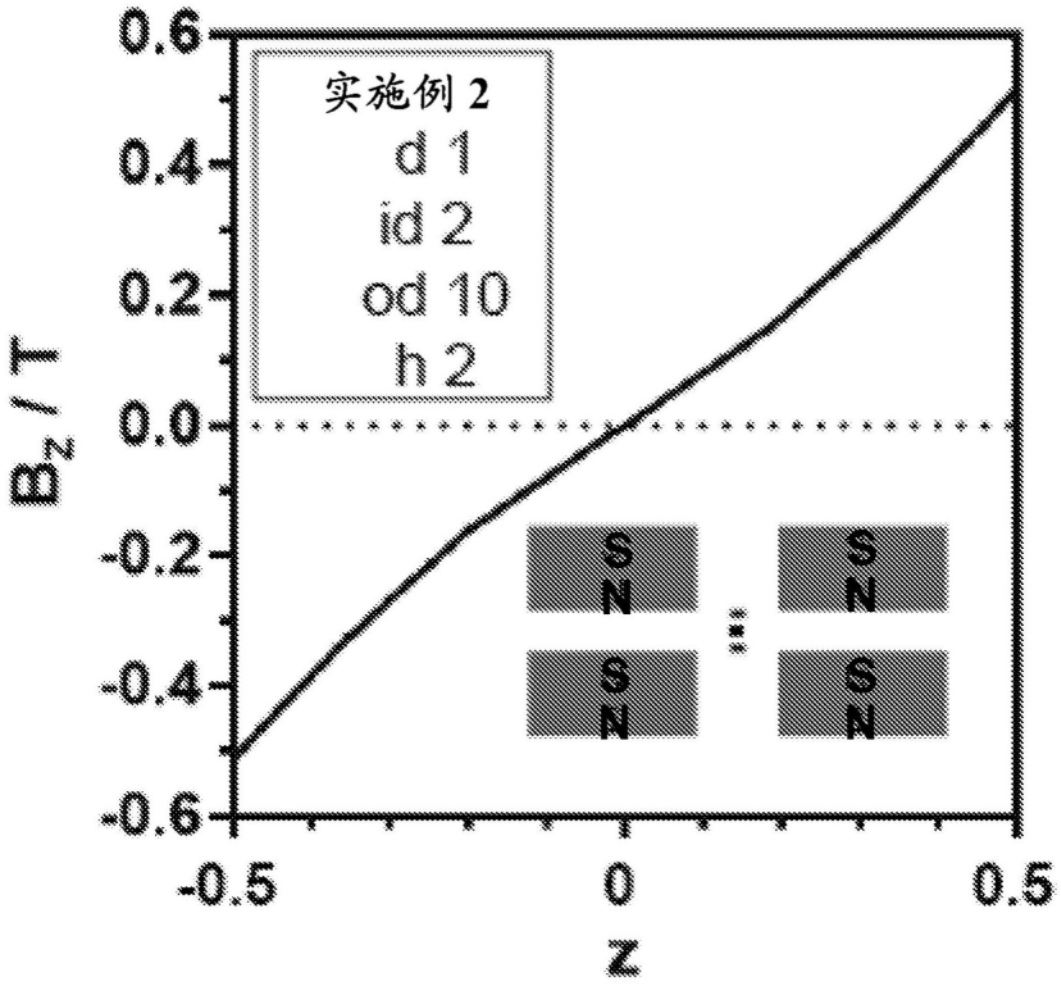


图6C

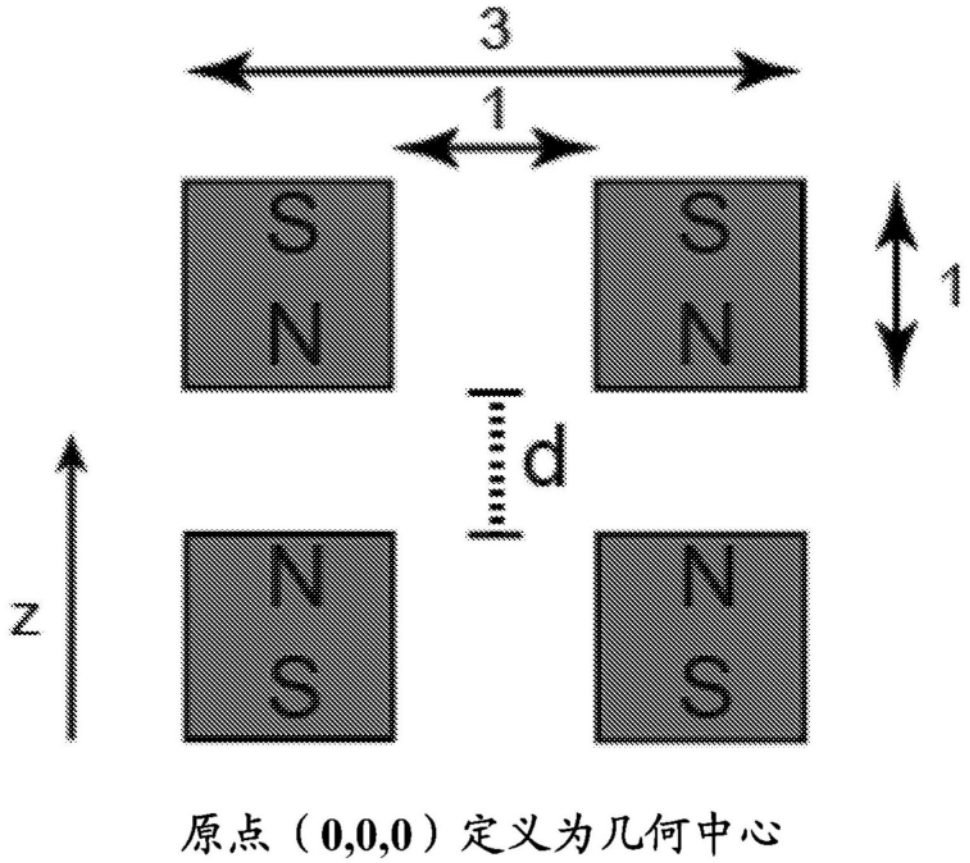


图6D

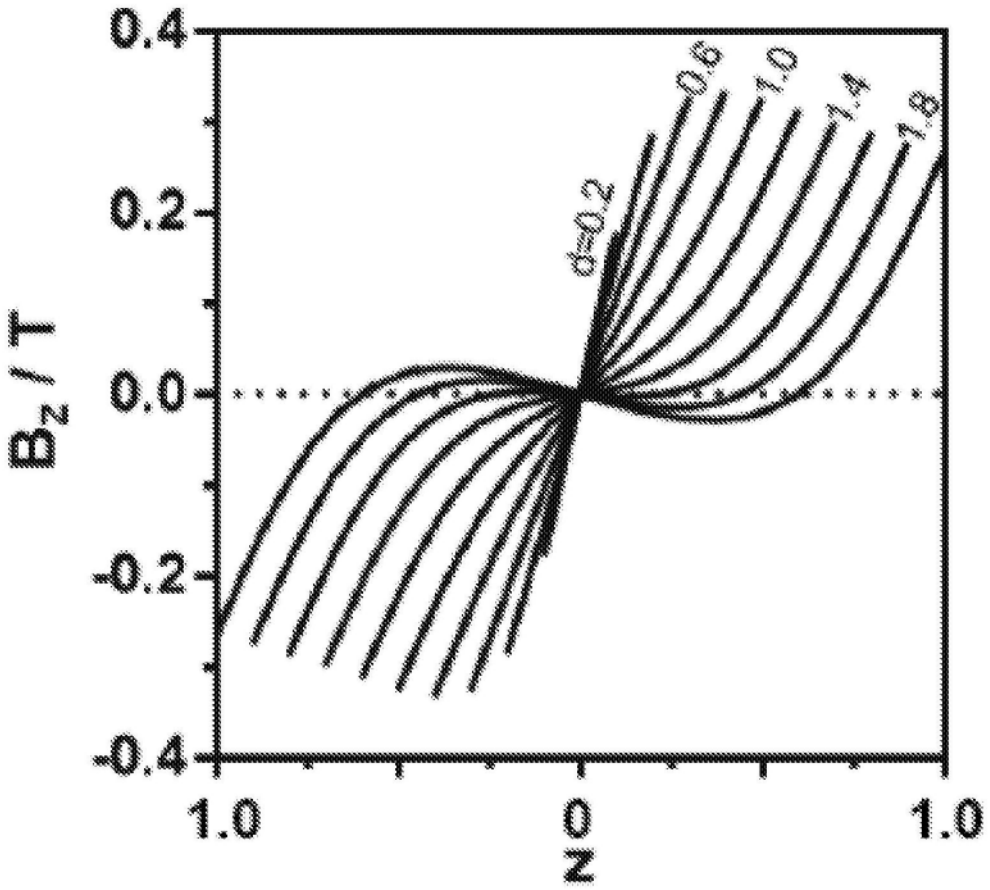


图6E

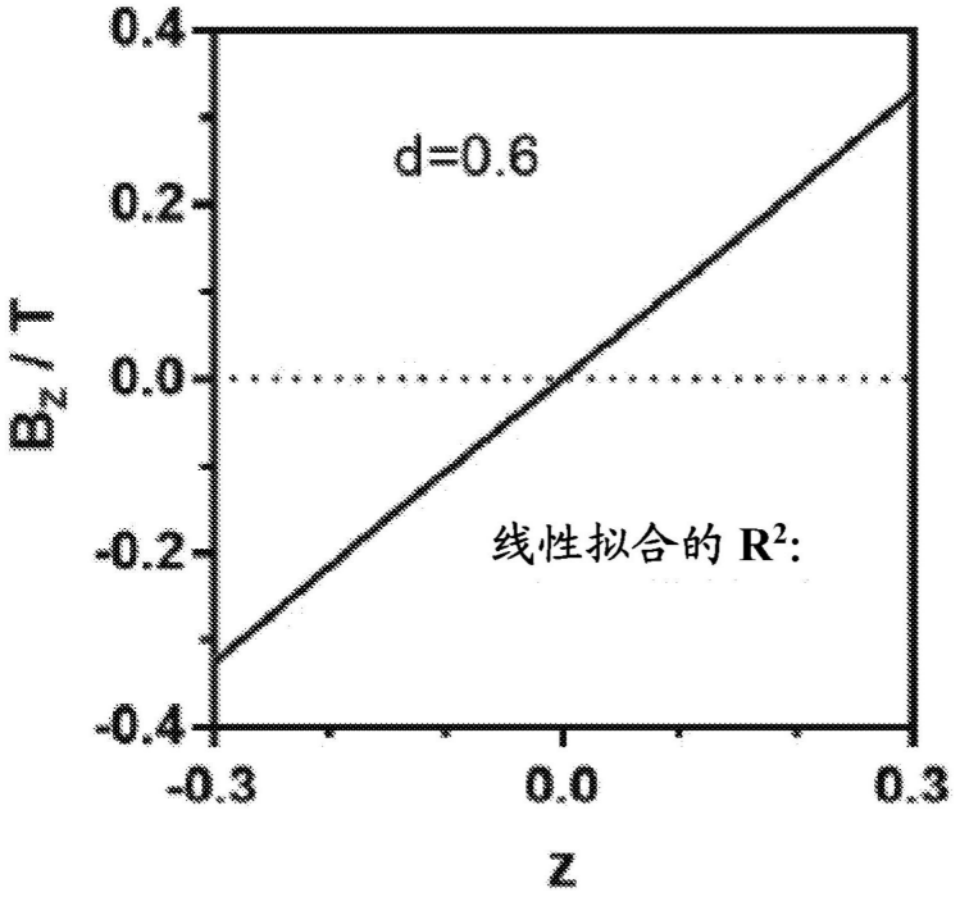


图6F

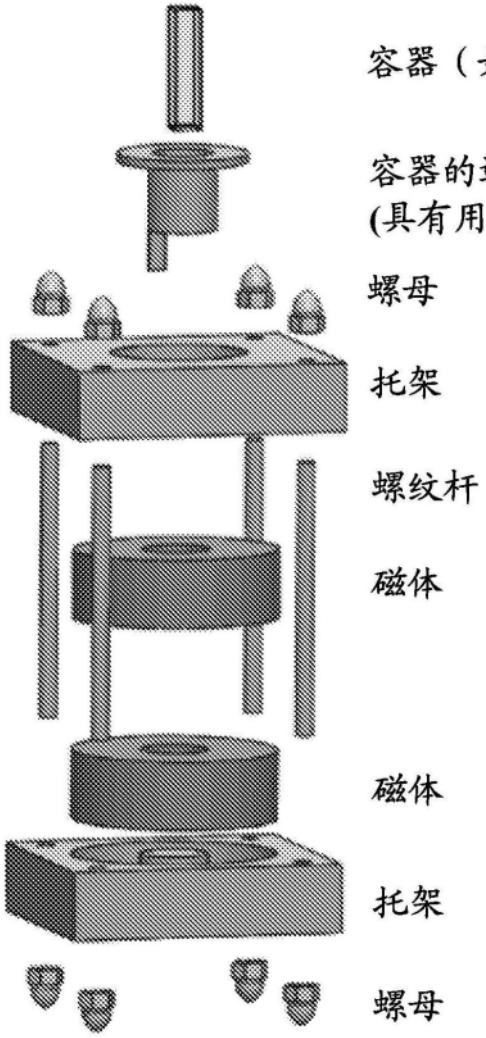

容器（如杯皿和试管）
容器的适配器
(具有用于尺子的支撑体)
螺母
托架
螺纹杆
磁体
磁体
托架
螺母
分解图

图 7A

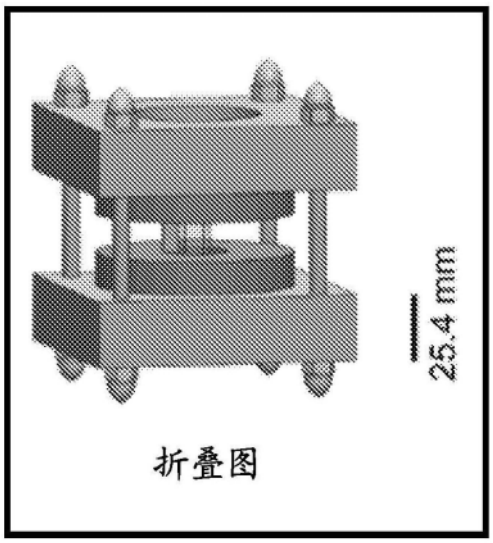

25.4 mm
折叠图

图 7B

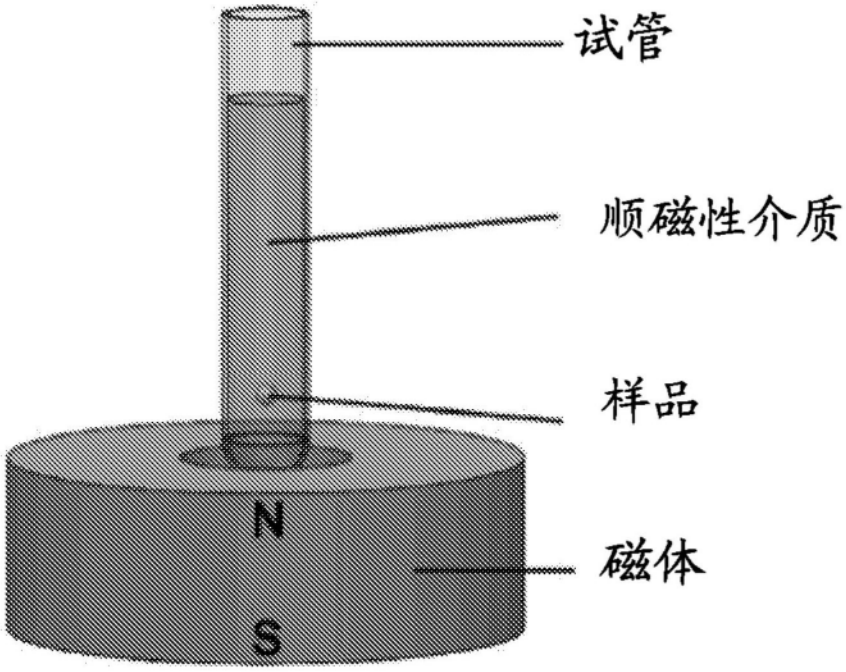


图8A

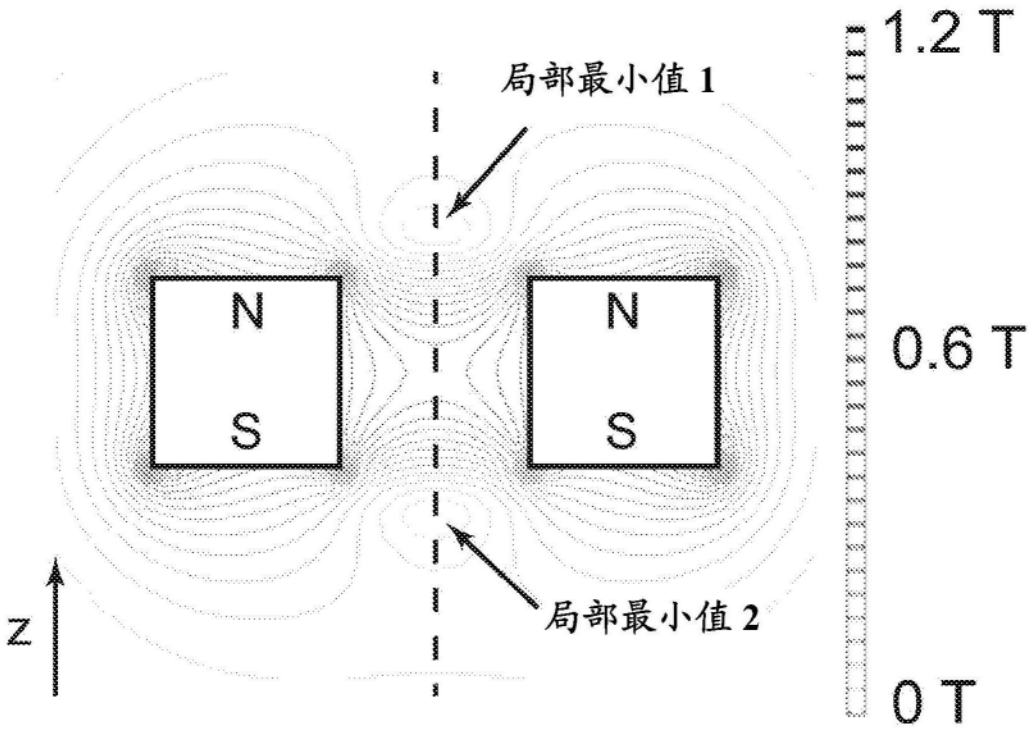


图8B