



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119384774 A

(43) 申请公布日 2025. 01. 28

(21) 申请号 202380047105.X

(22) 申请日 2023.04.28

(30) 优先权数据

2022-096079 2022.06.14 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.12.13

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2023/016938 2023.04.28

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/243246 JA 2023.12.21

(71) 申请人 国立研究开发法人理化学研究所

地址 日本埼玉县

申请人 日本电子株式会社

(72) 发明人 香取秀俊 高本将男 十成悟

(74) 专利代理机构 北京市隆安律师事务所

11323

专利代理师 权鲜枝 张艳凤

(51) Int.Cl.

H01S 3/00 (2006.01)

G04F 5/14 (2006.01)

H01S 1/06 (2006.01)

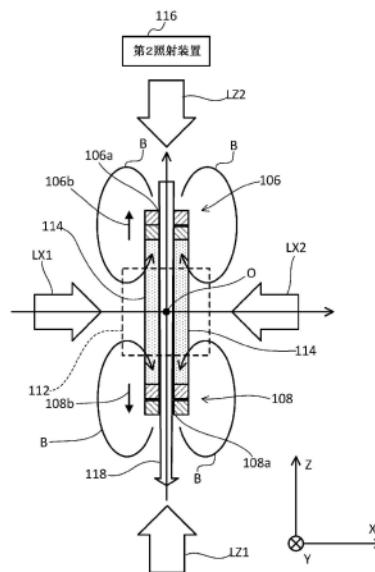
权利要求书2页 说明书12页 附图12页

## (54) 发明名称

磁光阱装置、物理封装、光晶格钟用物理封装、原子钟用物理封装、原子干涉仪用物理封装、量子信息处理设备用物理封装以及物理封装系统

## (57) 摘要

通过由磁铁(106)、(108)形成的四极磁场和3组激光对捕获原子。通过由磁铁(106)、(108)遮蔽激光对(LZ)的一部分,在3组激光对交叉的交叉区域(112)内,形成作为非原子捕获空间的区域(114)。通过向交叉区域(112)内照射激光(118),非原子捕获空间内的原子向交叉区域(112)的外侧移动。



1. 一种磁光阱装置,其特征在于,包含:  
第1形成单元,其通过第1光群和磁场形成捕获原子的原子捕获空间;  
第2形成单元,其在所述第1光群交叉的交叉区域内形成非原子捕获空间;以及  
光照射单元,其通过向所述交叉区域内照射第2光,使所述非原子捕获空间内的原子从所述交叉区域内出射。
2. 根据权利要求1所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述第1形成单元和所述第2形成单元包含产生磁场的一对磁铁,  
在所述一对磁铁中的每个磁铁形成有使光经过的孔,  
所述光照射单元经过所述孔向所述交叉区域照射所述第2光。
3. 根据权利要求2所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述一对磁铁设置在所述第1光群之中的一部分行进的光路上,部分地遮蔽所述第1光群之中的一部分,  
通过所述第1光群之中未被所述一对磁铁遮蔽的光群和由所述一对磁铁产生的磁场在所述一对磁铁之间形成所述原子捕获空间,  
在光被所述一对磁铁遮蔽的空间形成所述非原子捕获空间。
4. 根据权利要求3所述的磁光阱装置,其特征在于,  
还包含用于形成所述原子捕获空间的辅助磁铁。
5. 根据权利要求1所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述第2形成单元是形成有使光经过的孔的一对遮蔽件,  
所述一对遮蔽件设置在所述第1光群之中的一部分行进的光路上,部分地遮蔽所述第1光群之中的一部分,  
所述光照射单元经过所述孔向所述交叉区域照射所述第2光。
6. 根据权利要求5所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述一对遮蔽件是顺磁性物质。
7. 根据权利要求1所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述第2光是推动激光。
8. 根据权利要求1所述的磁光阱装置,其特征在于,  
所述第1光群是波长为461nm的激光或波长为689nm的激光。
9. 一种物理封装,其特征在于,  
包含权利要求1至权利要求8中的任意一项所述的磁光阱装置。
10. 一种光晶格钟用物理封装,其特征在于,  
包含权利要求9所述的物理封装。
11. 一种原子钟用物理封装,其特征在于,  
包含权利要求9所述的物理封装。
12. 一种原子干涉仪用物理封装,其特征在于,  
包含权利要求9所述的物理封装。
13. 一种针对原子或离子化的原子的量子信息处理设备用物理封装,其特征在于,  
包含权利要求9所述的物理封装。
14. 一种物理封装系统,其特征在于,包含:

权利要求9所述的物理封装;以及  
控制装置,其控制所述物理封装的动作。

## 磁光阱装置、物理封装、光晶格钟用物理封装、原子钟用物理封装、原子干涉仪用物理封装、量子信息处理设备用物理封装以及物理封装系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及磁光阱装置、物理封装、光晶格钟用物理封装、原子钟用物理封装、原子干涉仪用物理封装、量子信息处理设备用物理封装以及物理封装系统。

### 背景技术

[0002] 光晶格钟是本申请的发明人之一香取秀俊在2001年提出的原子钟。在光晶格钟中,将原子集团封闭在由激光形成的光晶格内,计测可见光区域的谐振频率,因此,能进行18位的精度的计测,远远超过现行的铯钟的精度。光晶格钟不仅由发明人团体进行了锐意研究开发,国内外的各种团体也进行了研究开发,正在发展为下一代原子钟。

[0003] 关于最近的光晶格钟的技术,例如可举出下述专利文献1~3。在专利文献1中记载有在具有中空的通道的光波导的内部形成一维的移动光晶格。在专利文献2中记载有设定有效魔法频率的方案。实际上,利用铷、铯、汞、镉和镁等在理论上和实验上确定了魔法波长。另外,在专利文献3中记载有降低来自于从周围的壁放射出的黑体辐射的影响的辐射屏蔽件。

[0004] 在光晶格钟中,由于以高精度进行时间计测,因此,能够将基于重力的广义相对论效应的地球上的1cm的高度差检测为时间进程上的偏离。因此,如果能够使光晶格钟小型化、便携化而在研究室外的现场使用,则可应用性会扩展到地下资源探测、地下洞穴、岩浆房检测等新的大地测量技术。通过将光晶格钟进行量产并配置在各地,连续监视重力势的时间变动,地壳变动检测、重力场的空间测绘等应用也成为可能。这样,光晶格钟被期待超出高精度的时间计测的界限而作为新的基础技术对社会做出贡献。

[0005] 一般的光晶格钟的物理封装包含原子炉(atomic oven)、塞曼减速器(Zeeman slower)以及磁光阱装置(MOT)。由原子炉和塞曼减速器生成冷却原子束,所生成的冷却原子束被输出到磁光阱装置。

[0006] 一般地,塞曼减速器包含腔孔和产生沿着该腔孔的中心轴的磁场的磁场产生器。塞曼减速器使用塞曼减速法来使从原子炉出射的具有快的初速的原子束的速度减速至能由磁光阱装置捕获的速度。激光从腔孔的开口部照射到腔孔内。该激光是在与原子束的行进方向相反的方向上行进的激光,是具有从原子迁移共振频率对多普勒频移(Doppler shift)项进行校正而得到的频率的激光。原子束通过该激光的强的辐射力被减速。进而,通过由磁场产生器形成以腔孔为中心在空间上具有梯度的磁场,能够用塞曼频移(Zeeman shift)来补偿由减速带来的多普勒频移的变化,创造出减速用的激光始终与原子共振的状况。

[0007] 位于塞曼减速器的后级的磁光阱装置通过多束激光和以原子被捕获的位置为中心形成的四极磁场来捕获原子。

[0008] 激光的频率被设定为从原子的共振频率负失谐的值。在激光的光子被原子吸收

时,光子的运动量被赋予给原子,作为辐射压对原子起作用。在原子以有限的速度运动时,与该运动相对的激光的频率以靠近原子的共振频率的方式进行多普勒频移。另一方面,与该运动的方向平行的激光的频率以远离原子的共振频率的方式进行多普勒频移。因此,原子更强地受到来自与运动相对的激光的辐射压,结果是,原子减速。

[0009] 进而,通过四极磁场,能够产生具有位置依赖性的辐射压。具体来说,该具有位置依赖性的辐射压是使得原子的共振频率随着远离捕获空间的中心而更大地进行塞曼频移这样的辐射压。另外,通过选择激光的偏振,能够使施加辐射压的方向朝向中心。

[0010] 如上所述,通过将塞曼减速器和磁光阱装置组合,能够使高速的原子束减速,在捕获空间捕获原子。

[0011] 例如,在将铯原子用作原子源的情况下,使用波长为461nm(相当于 $^1S_0$ - $^1P_1$ 能级之间的能量的波长)的激光作为减速用的激光。

[0012] 然而,已知用于将被捕获的冷却原子朝向后级的装置供应的技术。

[0013] 作为另一技术,已知使用移动黏团(moving molasses)的技术(参照专利文献4)。通过提高用于实现磁光阱的激光对中的沿着想要使冷却原子移动的方向的激光的频率,降低沿着其相反方向的激光的频率,能够在保持冷却的状态下使原子从捕获位置移动。

[0014] 作为另一技术,已知利用形成有孔的镜的技术(参照非专利文献1)。具体来说,将用于实现磁光阱的激光对中的沿着想要使冷却原子移动的方向的激光由来自与其成对的激光的反射光来生成。在用于生成该反射光的镜的中央形成有孔,并且该镜靠近与多组激光对交叉的区域相接的位置设置。根据该构成,会由该孔形成激光不被反射的柱状的区域。进入到该区域的冷却原子在从孔释放出的方向上被施加辐射压,其结果是,冷却原子概率性地被从镜的孔拉出。使用在中心轴形成有孔的圆锥镜、金字塔镜等的情况也是同样的。

[0015] 作为另一技术,已知在相互正交的3组激光对中的2组激光对的光路上设置遮挡激光的构件的技术。在该技术中,在3组激光对交叉的区域中,除了产生各向同性的辐射压以外,还沿着远离该区域的方向产生各向异性的辐射压。通过该各向异性的辐射压,概率性地拉出冷却原子。

[0016] 作为另一技术,已知将俘获(trapping)法从磁光阱法切换为光阱(optical trap)法,通过对约束冷却原子的光势进行扫描来使冷却原子移动的技术(专利文献3)。

[0017] 作为另一技术,已知将俘获法从磁光阱法切换为磁阱(magnetic trap)法,通过对约束冷却原子的磁势进行扫描来使冷却原子移动的技术(非专利文献2)。

[0018] 另外,已知将磁光阱中的原子光泵浦为非阱状态,通过重力拉出冷却原子的方法(非专利文献3)。

[0019] 作为生成磁光阱所需的四极磁场的方法,例如已知使用反亥姆霍兹线圈的方法、使用磁化相互反平行的永久磁铁对的方法等。专利文献5记载了将使3组激光对中的一对激光贯穿的环形磁铁与激发线圈一起使用。

[0020] 现有技术文献

[0021] 专利文献

[0022] 专利文献1:日本专利第6206973号公报

[0023] 专利文献2:日本专利第6635608号公报

[0024] 专利文献3:日本专利第7189588号公报

- [0025] 专利文献4:美国专利第5274232号说明书  
[0026] 专利文献5:美国专利第10371763号说明书  
[0027] 非专利文献  
[0028] 非专利文献1:Phys.Rev.Lett 77(1996)3331Z.T.Liu et al.  
[0029] 非专利文献2:Phys.Rev.A 63(2001)031401M.Greiner et.al.  
[0030] 非专利文献3:Phys.Rev.A 46(1992)R17 F.Shimizu et.al.

## 发明内容

### [0031] 发明要解决的问题

[0032] 然而,在原子钟、原子干涉仪等装置中,希望连续地供应被冷却的原子气体,连续地执行计测。

[0033] 本发明的目的在于捕获原子并将其连续地供应到后级的装置。

### [0034] 用于解决问题的方案

[0035] 本发明的1个方案是一种磁光阱装置,其特征在于,包含:第1形成单元,其通过第1光群和磁场形成捕获原子的原子捕获空间;第2形成单元,其在所述第1光群交叉的交叉区域内形成非原子捕获空间;以及光照射单元,其通过向所述交叉区域内照射第2光,使所述非原子捕获空间内的原子从所述交叉区域内出射。

[0036] 也可以是,所述第1形成单元和所述第2形成单元包含产生磁场的一对磁铁,在所述一对磁铁中的每个磁铁形成有使光经过的孔,所述光照射单元经过所述孔向所述交叉区域照射所述第2光。

[0037] 也可以是,所述一对磁铁设置在所述第1光群之中的一部分行进的光路上,部分地遮蔽所述第1光群之中的一部分,通过所述第1光群之中未被所述一对磁铁遮蔽的光群和由所述一对磁铁产生的磁场在所述一对磁铁之间形成所述原子捕获空间,在光被所述一对磁铁遮蔽的空间形成所述非原子捕获空间。

[0038] 也可以是,磁光阱装置还包含用于形成所述原子捕获空间的辅助磁铁。

[0039] 也可以是,所述第2形成单元是形成有使光经过的孔的一对遮蔽件,所述一对遮蔽件设置在所述第1光群之中的一部分行进的光路上,部分地遮蔽所述第1光群之中的一部分,所述光照射单元经过所述孔向所述交叉区域照射所述第2光。

[0040] 也可以是,所述一对遮蔽件是顺磁性物质。

[0041] 也可以是,所述第2光是推动激光。

[0042] 也可以是,所述第1光群是波长为461nm的激光或波长为689nm的激光。

[0043] 本发明的1个方案是一种物理封装,其特征在于,包含上述的磁光阱装置。

[0044] 本发明的1个方案是一种光晶格钟用物理封装,其特征在于,包含上述的物理封装。

[0045] 本发明的1个方案是一种原子钟用物理封装,其特征在于,包含上述的物理封装。

[0046] 本发明的1个方案是一种原子干涉仪用物理封装,其特征在于,包含上述的物理封装。

[0047] 本发明的1个方案是一种针对原子或离子化的原子的量子信息处理设备用物理封装,其特征在于,包含上述的物理封装。

[0048] 本发明的1个方案是一种物理封装系统,其特征在于,包含:上述的物理封装;以及控制装置,其控制所述物理封装的动作。

[0049] 发明效果

[0050] 根据本发明,能够捕获原子并将其连续地供应到后级的装置。

## 附图说明

[0051] 图1是示出实施方式的光晶格钟的整体构成的框图。

[0052] 图2是示出第1实施方式的磁光阱装置的概略构成的截面图。

[0053] 图3是示出第1实施方式的磁光阱装置的概略构成的截面图。

[0054] 图4是示出一对磁铁的立体图。

[0055] 图5是示出由第1实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0056] 图6是示出由第1实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0057] 图7是示出由第1实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0058] 图8是示出由第1实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0059] 图9是示出一对磁铁的变形例的立体图。

[0060] 图10是示出一对磁铁的变形例的立体图。

[0061] 图11是示出物理封装的概略的图。

[0062] 图12是示出第2实施方式的磁光阱装置的概略构成的截面图。

[0063] 图13是示出由第2实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0064] 图14是示出由第2实施方式的磁光阱装置形成的磁场分布的计算值的图。

[0065] 图15是示出5束激光的图。

[0066] 图16是示出第3实施方式的磁光阱装置的概略构成的截面图。

[0067] 图17是用于说明一对磁铁的安装方法的截面图。

[0068] 图18是用于说明一对磁铁的安装方法的截面图。

## 具体实施方式

[0069] <光晶格钟的构成>

[0070] 参照图1来说明使用实施方式的磁光阱装置的光晶格钟(optical lattice clock)10的概略构成。图1是示出光晶格钟10的整体构成的框图。在此,作为对实施方式的磁光阱装置进行使用的装置的一个例子,以光晶格钟10为例进行说明,但实施方式的磁光阱装置当然也可以用于光晶格钟10以外的装置。

[0071] 光晶格钟10例如包含:物理封装(physics package)12、光学系统装置14、控制装置16以及PC(Personal Computer;个人计算机)18。

[0072] 物理封装12是捕获原子集团并将其封闭在光晶格中引起时钟跃迁(clock transition)的装置。光学系统装置14是具备原子捕获用激光源、时钟跃迁激发激光源、激光频率控制装置等光学设备的装置。光学系统装置14除了将激光发送到物理封装12之外,还进行接收在物理封装12中由原子集团释放出的荧光信号并将其转换为电信号且向激光源进行反馈以匹配原子的共振频率等的处理。控制装置16是控制物理封装12和光学系统装置14的装置。控制装置16例如进行物理封装12的动作控制、光学系统装置14的动作控制、以

及通过计测而得到的时钟跃迁的频率解析等解析处理。通过物理封装12、光学系统装置14以及控制装置16相互协作,实现光晶格钟10的功能。

[0073] PC18是包含处理器和存储器的通用计算机。通过由包含处理器和存储器的硬件执行软件,实现PC18的功能。在PC18中安装有控制光晶格钟10的应用程序。PC18连接到控制装置16,可以不仅对控制装置16进行控制,还对包含物理封装12和光学系统装置14在内的整个光晶格钟10进行控制。另外,PC18提供光晶格钟10的UI (User Interface;用户接口)。用户能够经由PC18来进行光晶格钟10的启动、时间计测以及结果确认等。

[0074] 此外,有时将包含物理封装12以及物理封装12的控制所需的构成的系统称为“物理封装系统”。控制所需的构成可以包含在控制装置16或PC18中,也可以包含在物理封装12中。另外,控制装置16的功能的一部分或全部也可以包含在物理封装12中。

[0075] 以下,详细说明实施方式的磁光阱装置。

[0076] <第1实施方式的磁光阱装置>

[0077] 参照图2至图4来说明第1实施方式的磁光阱装置100。图2和图3是示出第1实施方式的磁光阱装置100的概略构成的截面图。图4是示出一对磁铁的立体图。

[0078] 在此,定义由相互正交的X轴、Y轴以及Z轴构成的坐标系。X轴、Y轴以及Z轴相互交叉的点被确定为原子捕获空间102的中心O。中心O与磁光阱用的四极磁场B的对称点一致。

[0079] 磁光阱装置100包含:真空腔;第1照射装置104,其将激光照射到原子的原子捕获空间102;以及一对磁铁(一对磁铁由磁铁106和磁铁108构成),其是生成四极磁场B的磁场产生装置的一个例子。

[0080] 第1照射装置104包含:1个或多个光源,其出射激光;以及1个或多个光学元件(例如镜(mirror)、射束分离器 (beam splitter;分束器)等),其用于将从1个或多个光源出射的激光照射到原子捕获空间102。由第1照射装置104照射相互正交的3组激光对。该3组激光对由相对于对象的原子负失谐的合计6束共振激光构成。

[0081] 具体来说,该3组激光对由沿着X轴照射的激光对LX、沿着Y轴照射的激光对LY以及沿着Z轴照射的激光对LZ构成。

[0082] 激光对LX由在X轴上向正方向行进的激光LX1和在X轴上向负方向行进的激光LX2(也就是说,向与激光LX1的行进方向相反的方向行进的激光)构成。

[0083] 激光对LY虽然在图2和图3中未示出,但是由在Y轴上向正方向行进的激光LY1和在Y轴上向负方向行进的激光LY2(也就是说,向与激光LY1的行进方向相反的方向行进的激光)构成。

[0084] 激光对LZ由在Z轴上向正方向行进的激光LZ1和在Z轴上向负方向行进的激光LZ2(也就是说,向与激光LZ1的行进方向相反的方向行进的激光)构成。

[0085] 图2示意性地示出了被激光照射的区域110。另外,图3中用虚线示出了交叉区域112。交叉区域112是3组激光对交叉的区域。交叉区域112内存在的原子与3组激光对相互作用,辐射压从与原子的运动方向相反的方向施加到该原子。

[0086] 在交叉区域112内,由于四极磁场B而辐射压产生空间依赖性,具有该空间依赖性的辐射压对于原子成为朝向四极磁场B的中心点的复原力。

[0087] 四极磁场B由上述的一对磁铁(磁铁106、108)生成。磁铁106、108例如为环状的磁铁。在磁铁106的中央,形成有在磁化方向上贯通磁铁106的孔106a。同样地,在磁铁108的中

央,形成有在磁化方向上贯通磁铁108的孔108a。孔106a、108a的形状可以是圆形,也可以是矩形。

[0088] 例如,磁铁106、108是沿着Z轴被磁化的永久磁铁。也就是说,磁铁106、108以磁化方向与Z轴的方向平行的方式设置在Z轴上。具体来说,磁铁106、108以中间隔着交叉区域112的中心0且磁铁106的磁化方向106b与磁铁108的磁化方向108b相互成为相反方向的方式设置。磁铁106与中心0之间的距离等于磁铁108与中心0之间的距离。另外,磁铁106、108以不遮挡激光对LX、LY的方式设置于接近交叉区域112的位置。

[0089] 磁铁106、108的X轴方向的宽度和Y轴方向的宽度比激光LZ1、LZ2的直径小。由于磁铁106、108设置在Z轴上,因而激光LZ1、LZ2各自的一部分被磁铁106、108遮蔽。其结果是,在交叉区域112内,形成不被激光LZ1、LZ2照射的区域114。该区域114是光被磁铁106、108遮蔽的区域,相当于非原子捕获空间的一个例子。

[0090] 也就是说,磁铁106、108设置在作为3组激光对之中的一部分的激光对LZ行进的光路上,部分地遮蔽激光对LZ(也就是说激光LZ1、LZ2)的一部分。由此,通过未被磁铁106、108遮蔽的激光群(也就是说,包含激光对LX、激光对LY、以及激光对LZ中的未被遮蔽的激光的激光群)和由磁铁106、108形成的四极磁场B形成原子捕获空间102。另外,在光被磁铁106、108遮蔽的空间,形成作为非原子捕获空间的区域114。

[0091] 另外,磁光阱装置100包含第2照射装置116。第2照射装置116包含:光源,其出射激光;以及1个或多个光学元件(例如镜、射束分离器等),其用于将从光源出射的激光照射到交叉区域112。由第2照射装置116向交叉区域112照射激光118。激光118沿着Z轴上经过磁铁106的孔106a和磁铁108的孔108a照射到原子捕获空间102。

[0092] 磁铁106、108的大小(例如直径)、孔106a、108a的大小(例如直径)以及磁光阱用的激光(激光LZ1等)的直径的关系为以下所示的关系。

[0093] 孔106a、108a的大小<磁铁106、108的大小<磁光阱用的激光的直径

[0094] 激光118是用于对原子进行光俘获的激光。作为光俘获(optical trapping)的一个例子,可举出通过由光电场感应出的偶极子力来捕获原子的方法。在使用该方法的情况下,使用光偶极子阱用的激光作为激光118。作为另一个例子,可举出由光的驻波捕获原子的方法。在使用该方法的情况下,使用光晶格用的激光作为激光118。作为再一个例子,也可以使用由共振激光构成的推动(push)激光作为激光118。在该情况下,能够由辐射力向原子赋予运动力。

[0095] 此外,3组激光相当于第1光群的一个例子,第1照射装置104和磁铁106、108相当于第1形成单元的一个例子,磁铁106、108相当于第2形成单元的一个例子,第2照射装置116相当于光照射单元的一个例子,激光118相当于第2光的一个例子。

[0096] 以下,说明磁光阱装置100的动作。

[0097] 由第1照射装置104照射激光对LX、LY、LZ,形成交叉区域112。另外,由磁铁106、108形成四极磁场B。另外,由第2照射装置116向原子捕获空间102照射激光118。

[0098] 进入到交叉区域112内的原子受到成为复原力的辐射压,从而朝向四极磁场B的中心0一边减速一边移动。

[0099] 如上所述,在交叉区域112内,存在光被磁铁106、108遮蔽的区域114。区域114被照射激光对LX、LY,不被照射激光对LZ。在该区域114内,相对于X方向(+X方向、-X方向)的原子

的速度和相对于Y方向(+Y方向、-Y方向)的原子的速度被减速,但相对于Z方向(+Z方向、-Z方向)的原子的速度不被减速。因此,区域114内存在的原子向Z方向的运动不被限制,而朝向Z方向扩散。图2中的附图标记120指示出向Z方向的运动不被限制的原子运动。

[0100] 假设朝向Z方向扩散后的原子一边进一步扩散,一边向光被遮蔽的区域114的外侧或内侧进行了移动。

[0101] 移动到区域114的外侧的原子被照射激光对LZ,因此,移动到区域114的外侧的原子被激光对LX、LY、LZ和四极磁场B向四极磁场B的中心O的方向拉回。

[0102] 另一方面,移动到区域114的内侧的原子会与激光118相互作用。在此作为一个例子,激光118是朝向-Z方向照射的。在激光118是推动激光的情况下,原子受到辐射压而向-Z方向行进。在激光118是光阱用的激光的情况下,通过从外部控制光阱的势(potential),能够使原子向-Z方向移动。向-Z方向移动的原子经过磁铁108的孔108a被向交叉区域112的外侧推出。

[0103] 如上所述,能够以有限的概率向原子赋予相对于激光118的行进方向的运动量,使原子移动到交叉区域112的外侧。移动到交叉区域112的外侧的原子被向后级的装置供应。由此,能够将冷却的原子连续地向后级的装置供应。例如,为了使被捕获到原子捕获空间102内的原子移动,即使不关断激光对LX、LY、LZ,也能够将冷却的原子向后级的装置供应。

[0104] 作为第1实施方式的具体例子,激光对LX、LY、LZ的波长为689nm。另外,作为一个例子,磁铁106、108的X方向和Y方向的宽度(外径)为0.8mm左右,孔106a、108a的X方向和Y方向的宽度(内径)为0.27mm左右,磁铁106与磁铁108之间的距离为10mm~15mm左右。

[0105] 图5至图8示出了在磁铁106与磁铁108之间产生的磁场的分布的计算值。

[0106] 图5所示的计算值是YZ面(由Y轴和Z轴形成的面)内的磁场的Y分量的计算值(BY(G))。图6所示的计算值是YZ面内的磁场的Z分量的计算值(BZ(G))。计算值用浓淡来表现。

[0107] 图7示出了Y轴上的磁场分量的计算值。图7中的横轴示出了Y轴上的位置,纵轴示出了磁场的计算值。附图标记122指示出磁场的X分量的计算值(BX)和磁场的Z分量的计算值(BZ)。附图标记124指示出磁场的Y分量的计算值(BY)。如附图标记126指示的那样,在-2mm至+2mm之间,形成有+3.5G/cm的直线的磁场梯度。

[0108] 图8示出了Z轴上的磁场分量的计算值。图8中的横轴示出了Z轴上的位置,纵轴示出了磁场的计算值。附图标记128指示出计算值(BX)和计算值(BZ)。附图标记130指示出计算值(BY)。在-2mm至+2mm之间,形成有-7.1G/cm的直线的磁场梯度。

[0109] 如图7和图8所示,在第1实施方式中,形成具有比较小的磁场梯度的四极磁场。通过由这样的四极磁场和波长为689nm的激光形成的磁光阱,原子被冷却至原子的温度成为 $\mu$ K左右。被冷却至 $\mu$ K左右的温度的原子被从磁光阱装置100向后级的装置供应。

[0110] 如上所述,环状的磁铁106、108作为对激光对的遮蔽件(mask)发挥功能,因此不用追加新的构成,就能够将冷却原子从磁光阱装置100取出并向后级的装置供应。另外,即使不进行各构成的精密的位置调整、参数的调整,也能够连续地出射冷却原子。

[0111] 有可能原子气体会附着到遮蔽构件而遮蔽构件受到污染。在遮蔽构件是形成有孔的镜等光学元件的情况下,由于该污染,光学元件的光学特性有可能劣化。对此,由于形成有孔的磁铁106、108作为遮蔽件发挥功能,因此不会产生光学元件的光学特性劣化这样的问题。

[0112] 图9和图10示出了形成四极磁场B的一对磁铁的变形例。图9和图10是示出变形例的磁铁的立体图。

[0113] 在图9所示的例子中,由磁铁140、142构成一对磁铁。磁铁140、142分别具有矩形状的形状。另外,在磁铁140形成有在磁化方向上贯通磁铁140的孔140a。同样地,在磁铁142形成有在磁化方向上贯通磁铁142的孔142a。磁铁140、142的磁化方向与磁铁106、108的磁化方向相同。激光118经过孔140a、142a照射到原子捕获空间102。与上述的第1实施方式同样地,磁铁140、142的大小(例如对角线的长度)、孔140a、142a的大小(例如直径)以及磁光阱用的激光(激光LZ1等)的直径的关系为以下所示的关系。

[0114] 孔140a、142a的大小<磁铁140、142的大小<磁光阱用的激光的直径

[0115] 在图10所示的例子中,由磁铁144、146构成一对磁铁。通过以在中心形成孔144a的方式轴对称地设置多个磁铁来构成磁铁144。同样地,通过以在中心形成孔146a的方式轴对称地设置多个磁铁来构成磁铁146。具体来说,磁铁144、146分别为被轴对称地四分割的磁铁。磁铁144、146的磁化方向与磁铁106、108的磁化方向相同。激光118经过孔144a、146a照射到原子捕获空间102。与上述的第1实施方式同样地,磁铁144、146的大小、孔144a、146a的大小以及磁光阱用的激光的直径的关系为以下所示的关系。

[0116] 孔144a、146a的大小<磁铁144、146的大小<磁光阱用的激光的直径

[0117] 以下,参照图11来说明包含磁光阱装置100的物理封装。图11是示出物理封装150的概略构成的图。

[0118] 物理封装150包含原子炉152、塞曼减速器154以及磁光阱装置100。

[0119] 原子炉152包含收纳试样的试样容器、加热器、温度计、电连接器、毛细管喷嘴以及热辐射屏蔽件等。试样容器等收纳在内部被维持为超高真空的真空容器内。通过由加热器对试样进行加热,从试样产生原子气体。原子气体从毛细管喷嘴朝向塞曼减速器154出射。通过使原子气体从毛细管喷嘴出射,而形成具有指向性的原子束。作为试样,例如使用铯、镱等,但是这些以外的原子也可以用作试样。

[0120] 塞曼减速器154包含膛孔(bore)和磁场产生器。磁场产生器包含螺线管线圈(solenoid coil),产生沿着膛孔的中心轴的磁场。从原子炉152出射的原子束照射到膛孔内。

[0121] 塞曼减速器154通过使用塞曼减速法,使从原子炉152出射的具有大的初速的原子束的速度减速至后级的磁光阱装置100能捕获的速度。

[0122] 激光从与原子束的行进方向相反的方向照射到膛孔内。该激光也可以是兼用作磁光阱用激光的激光。

[0123] 在塞曼减速器154中,通过磁场产生器所产生的磁场和激光,从原子炉152照射到膛孔内后的原子束的速度被减速。高温的原子束一边通过磁场产生器所产生的磁场和激光按照塞曼减速法被减速,一边在膛孔内朝向磁光阱装置100行进。

[0124] 此外,作为原子炉152和塞曼减速器154,能够使用公知的原子炉和塞曼减速器。

[0125] 如上所述,磁光阱装置100包含真空腔,真空腔内被维持为超高真空。真空腔的内部是与塞曼减速器154的膛孔和原子炉152的真空容器相连的,膛孔和原子炉152的真空容器内被维持为超高真空。在磁光阱装置100的真空腔内,形成原子捕获空间102、交叉区域112以及区域114(非原子捕获空间)。

[0126] 以下,说明物理封装150的动作。

[0127] 在物理封装150中,真空腔的内部被真空化。从原子炉152出射到塞曼减速器154的原子束按照塞曼减速法被充分减速,并抵达磁光阱装置100。

[0128] 在磁光阱装置100中,如上所述,通过激光对LX、LY、LZ和四极磁场B捕获原子,通过激光118使极低温的原子概率性地移动到交叉区域112的外侧。

[0129] 对移动到交叉区域112的外侧的极低温的原子,例如应用光晶格阱等。例如,光晶格光束入射到磁光阱装置100的真空腔内,被设置在真空腔内的光学谐振器反射,由此,形成在光晶格光束的行进方向上驻波绵延而成的光晶格势。原子集团被光晶格势捕获。

[0130] 通过使波长略微变化,能够使光晶格在光晶格光束的行进方向上移动。通过由该移动光晶格形成的移动单元,原子集团被移动至时钟跃迁空间。

[0131] 在时钟跃迁空间中,对原子照射光频受控的激光,进行时钟跃迁(即,成为时钟的基准的原子的共振跃迁)的高精度分光,计测原子固有且不变的频率。由此,实现准确的原子钟。

[0132] 为了提高原子钟的精度,需要排除围绕着原子的扰动、准确读出频率。特别重要的是,除去由原子的热运动导致的多普勒效应所引起的频移。在光晶格钟中,通过利用由激光的干涉产生的光晶格将原子封闭在与时钟激光的波长相比足够小的空间内,来使原子的运动冻结。另一方面,在光晶格内,原子的频率会由于形成光晶格的激光而发生偏移。因此,通过选择被称为“魔法波长”或“魔法频率”的特定的波长和频率作为光晶格光束,来除去光晶格对共振频率造成的影响。

[0133] 时钟跃迁的结果是,发出的光被光学系统装置14接收,并由控制装置16进行分光处理等,而求出频率。

[0134] <第2实施方式的磁光阱装置>

[0135] 参照图12来说明第2实施方式的磁光阱装置100A。图12是示出第2实施方式的磁光阱装置100A的概略构成的截面图。

[0136] 第2实施方式的磁光阱装置100A在第1实施方式的磁光阱装置100的构成的基础上还包含一对辅助磁铁。一对辅助磁铁由环状的辅助磁铁160、162构成。在辅助磁铁160的中央,形成有在磁化方向上贯通辅助磁铁160的孔160a。同样地,在辅助磁铁162的中央,形成有在磁化方向上贯通辅助磁铁162的孔162a。辅助磁铁160、162是沿着Z轴被磁化的磁铁。也就是说,辅助磁铁160、162以磁化方向与Z轴的方向平行的方式设置在Z轴上。具体来说,辅助磁铁160、162设置在中间隔着交叉区域112的中心O且比磁铁106、108远离中心O的位置。另外,辅助磁铁160、162以辅助磁铁160的磁化方向与辅助磁铁162的磁化方向相互成为相反方向的方式设置。辅助磁铁160与中心O之间的距离等于辅助磁铁162与中心O之间的距离。另外,辅助磁铁160的孔160a的直径和辅助磁铁162的孔162a的直径比激光对LZ的直径大。激光对LZ经过孔160a、162a行进,激光对LZ的一部分被磁铁106、108遮蔽。在图12所示的例子中,作为一个例子,由6束{LX1、LX2、LY1、LY2、LZ1、LZ2}激光形成交叉区域112,但这不过是一个例子。另外,图12示出了包含腔孔156和磁场产生器158的塞曼减速器154。

[0137] 在第2实施方式中,形成具有比较大的磁场梯度(例如50G/cm左右)的四极磁场。通过由这样的四极磁场和波长为461nm的激光构成的磁光阱,原子被冷却至原子的温度成为mK左右。为了产生这样的具有强的磁场梯度的四极磁场,例如使用钐钴制的强力的磁铁作

为磁铁106、108。以使得塞曼减速器154的磁场产生器158所形成的磁场分布和磁铁106、108所形成的磁场分布在空间上无浪费地相连的方式使用辅助磁铁160、162。

[0138] 图13示出了由第2实施方式的磁光阱装置100A形成的磁场分布的计算结果。横轴示出了Z轴上的位置,纵轴示出了磁场的计算值。附图标记166(实线)指示出理想的磁场的计算结果。附图标记168(圆点)指示出由磁光阱装置100A得到的磁场的计算结果。在图13中,附图标记166示出的值和附图标记168示出的值是几乎一致的。

[0139] 图14示出了理想的磁场的计算结果与由磁光阱装置100A得到的磁场的计算结果之差。横轴示出了Z轴上的位置,纵轴示出了差。

[0140] 根据第2实施方式,通过使用磁铁106、108和辅助磁铁160、162,能够形成理想的磁场分布。

[0141] 另外,在中心0形成的磁场梯度的大小的计算值为35G/cm,能形成具有比较大的磁场梯度的四极磁场。由此,能输出被冷却至mK左右的温度的原子。

[0142] 辅助磁铁160、162的磁化方向可以是与磁铁106、108的磁化方向相同的方向,辅助磁铁160、162的磁化方向也可以是矢径方向。

[0143] 也可以使用通过将具有圆筒状的形状的磁铁分割为 $2n$  ( $n \geq 2$ ) 个而得到的一对磁铁作为辅助磁铁160、162。通过分割,辅助磁铁160、162与激光对LX、LY变得不易干扰。作为另一个例子,也可以是以使得形成四极磁场的方式将棒磁铁、圆柱磁铁等设置在对称的位置。

[0144] 在第2实施方式中,磁铁106、108也可以是软磁铁。例如,以使得从辅助磁铁160、162发出的磁力线被作为软磁铁的磁铁106、108束缚而在中心0附近形成四极磁场的方式设计软磁铁的形状。另外,也可以代替辅助磁铁160、162,而使用反亥姆霍兹线圈来调整磁场分布。

[0145] 在上述的第1和第2实施方式中,作为相当于第1光群的例子,举出相互正交的3组激光对LX、LY、LZ为例子进行了说明。图15示出了相当于第1光群的另一个例子。如图15所示,共计5束激光的组合{LXY1、LXY2、LXY3、LZ1、LZ2}也可以用作第1光群。激光LZ由在Z轴上向正方向行进的激光LZ1和在Z轴上向负方向行进的激光LZ2构成。激光LXY1是在X轴上向正方向行进的激光。激光LXY2是使激光LXY1在XY面上围绕中心0旋转+120度后的激光。激光LXY3是使激光LXY1在XY面上围绕中心0旋转-120度后的激光。在日本特愿2022-014486中提出了利用5束激光的组别的磁光阱。

[0146] 在上述的第1和第2实施方式中,也可以通过镜从1束激光生成激光对LZ。在该情况下,为了将冷却原子供应到后级的装置,也可以在该镜的中央形成有用于使冷却原子经过的孔。作为另一个例子,为了将冷却原子供应到后级的装置,也可以使用由共振激光构成的偏转器(deflector)。偏转器具有使冷却原子向任意的方向弯曲的功能。

[0147] <第3实施方式的磁光阱装置>

[0148] 以下,参照图16来说明第3实施方式的磁光阱装置100B。图16是示出第3实施方式的磁光阱装置100B的概略构成的截面图。

[0149] 第3实施方式的磁光阱装置100B包含:形成四极磁场B的一对磁铁;以及一对遮蔽构件。一对磁铁由环状的磁铁170、172构成。一对遮蔽构件由环状的遮蔽构件174、176构成。此外,遮蔽构件174、176相当于第2形成单元的一个例子。

[0150] 在磁铁170的中央,形成有在磁化方向上贯通磁铁170的孔170a。在磁铁172的中央,形成有在磁化方向上贯通磁铁172的孔172a。在第3实施方式中,磁铁170、172是沿着X轴被磁化的磁铁。也就是说,磁铁170、172以磁化方向与X轴的方向平行的方式设置在X轴上。具体来说,磁铁170、172以中间隔着交叉区域112的中心0且磁铁170的磁化方向与磁铁172的磁化方向相互成为相反方向的方式设置。磁铁170与中心0之间的距离等于磁铁172与中心0之间的距离。另外,孔170a、172a的直径比激光对LX的直径大。磁铁170、172以不妨碍激光对LY、LZ的行进的方式设置。也就是说,磁铁170与磁铁172之间的长度比激光对LY、LZ的直径长。

[0151] 在遮蔽构件174的中央,形成有在遮蔽构件174的厚度方向上贯通的孔174a。在遮蔽构件176的中央,形成有在遮蔽构件176的厚度方向上贯通的孔176a。遮蔽构件174、176中间隔着交叉区域112的中心0设置在Z轴上。遮蔽构件174与中心0之间的距离等于遮蔽构件176与中心0之间的距离。遮蔽构件174、176的外径比激光对LZ的直径小。激光对LZ的一部分被遮蔽构件174、176遮蔽。

[0152] 用于对原子进行光俘获的激光118经过遮蔽构件174的孔174a和遮蔽构件176的176a照射到原子捕获空间。

[0153] 遮蔽构件174、176由顺磁性物质构成。顺磁性物质不进行光学作用,能够遮蔽激光对LZ的一部分。遮蔽构件174、176仅用于遮蔽,因此,即使遮蔽构件174、176的交叉区域112侧的面被原子气体污染,也不会产生问题。

[0154] 磁光阱装置100B还包含镜178、180。在镜178的中央,形成有在镜178的厚度方向上贯通的孔178a。镜178在Z轴上设置在比遮蔽构件176远离中心0的位置。激光118经过孔178a行进。激光对LZ所包含的一方激光(例如激光LZ2)被镜178反射,从而生成另一方激光(例如激光LZ1)。

[0155] 镜180在X轴上设置在比磁铁172远离中心0的位置。激光对LX所包含的一方激光被镜180反射,从而生成另一方激光。

[0156] 此外,镜178、180不过是生成激光对的光学元件的一个例子,也可以通过使用其它光学元件(例如射束分离器等)来生成激光对。在第1和第2实施方式中也是同样的。

[0157] 在第3实施方式中,也与上述的第1和第2实施方式同样地,能够以有限的概率向原子赋予相对于激光118的行进方向的运动量,使原子移动到交叉区域112的外侧。

[0158] 以下,参照图17和图18来说明环状的磁铁(例如磁铁106、108等)的安装方法。图17和图18是示出环状的磁铁的截面图。例如,可以考虑在使光透射过的玻璃、蓝宝石等圆盘板贴附环状的磁铁并由磁光阱装置支撑该圆盘板的方法。

[0159] 在图17所示的例子中,在中央形成有孔204a的圆盘板204的一个面设置有磁铁200,在圆盘板204的相反侧的面设置有磁铁202。磁铁200、202中间隔着圆盘板204并通过自身的磁力固定于圆盘板204。

[0160] 在图18所示的例子中,通过脱气(outgas)少的粘接剂或钎超声波焊料,磁铁200被固定于圆盘板204。

[0161] 作为再一个例子,也可以在玻璃上镀敷金属图案,通过钎焊料将磁铁200装配到该图案。

[0162] 在以上的说明中,将光晶格钟举作了例子。但是,若是本领域技术人员,则也能将

上述的各实施方式的技术应用于光晶格钟以外。具体来说,也能应用于光晶格钟以外的原子钟或者是作为使用了原子的干涉仪的原子干涉仪。例如,也可以构成包含磁光阱装置100、磁光阱装置100A或磁光阱装置100B的原子钟用的物理封装、或原子干涉仪用的物理封装。另外,第1至第3实施方式也能应用于针对原子或离子化的原子的各种量子信息处理设备。量子信息处理设备是指使用原子或光的量子状态来进行计测、传感以及信息处理的装置,除了原子钟、原子干涉仪之外,还能够例示出磁场仪、电场仪、量子计算机、量子模拟器、量子中继器等。在量子信息处理设备的物理封装中,通过使用第1至第3实施方式的技术,与光晶格钟的物理封装同样地能够达成小型化或便携化。此外,需要注意的是,在这种设备中,时钟跃迁空间有时不是以时间计测为目的的空间,而是仅仅被当作引起时钟跃迁分光的空间。

[0163] 在以上的说明中,为了容易理解,示出了具体的方案。但是,这些只是例示出实施方式,除此之外也能采取各种实施方式。

[0164] 附图标记说明

[0165] 100、100A、100B磁光阱装置;102原子捕获空间;104第1照射装置;106、108磁铁;112交叉区域;116第2照射装置;118激光。

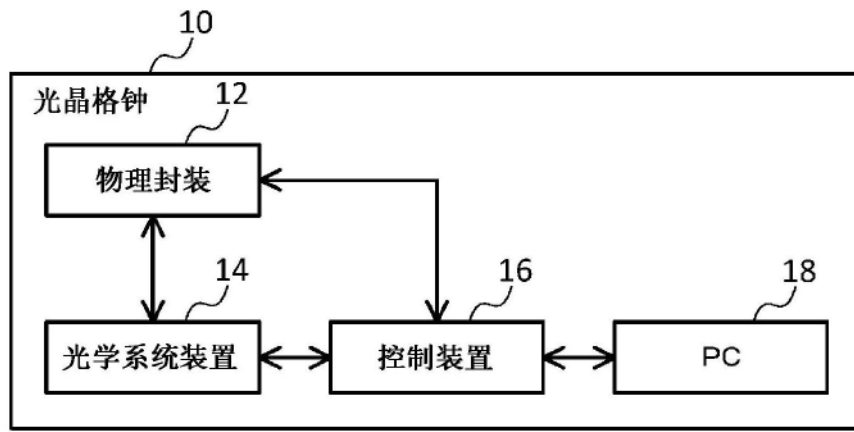


图1

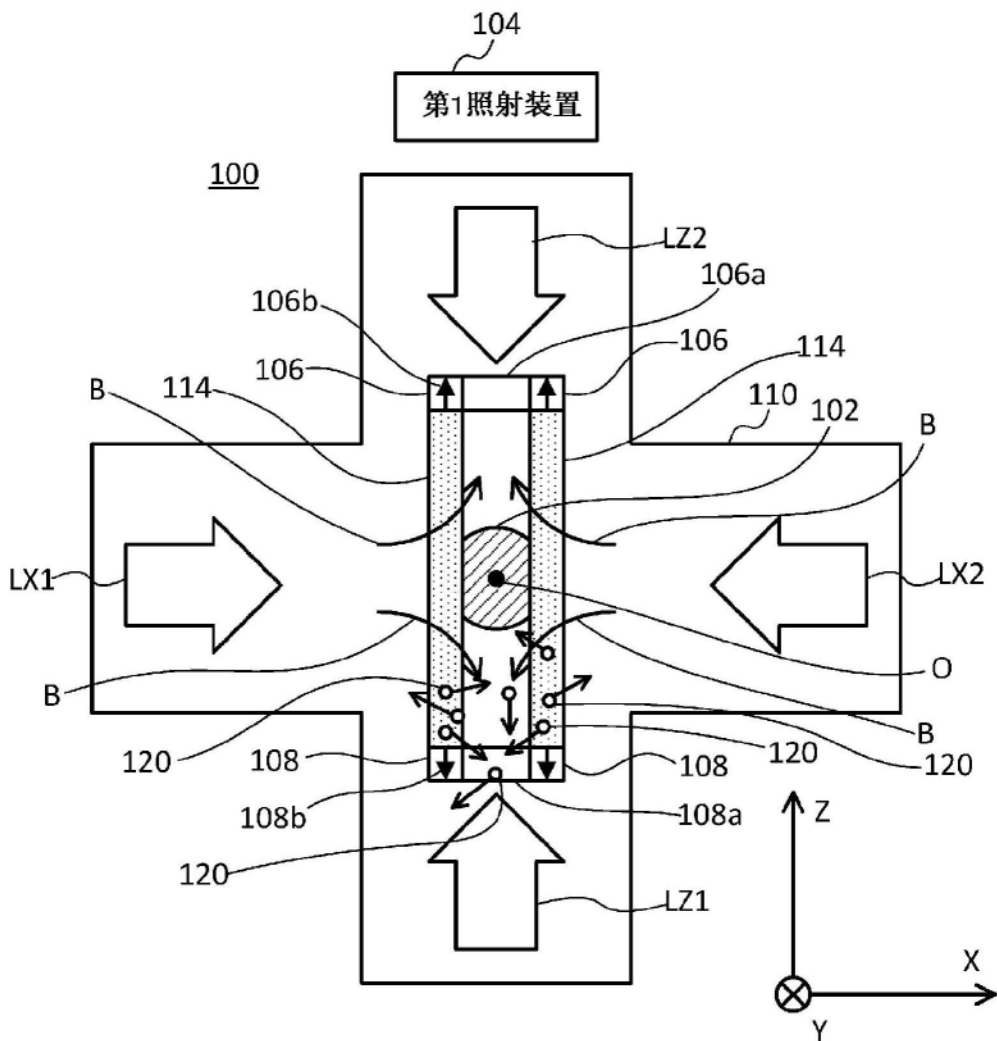


图2

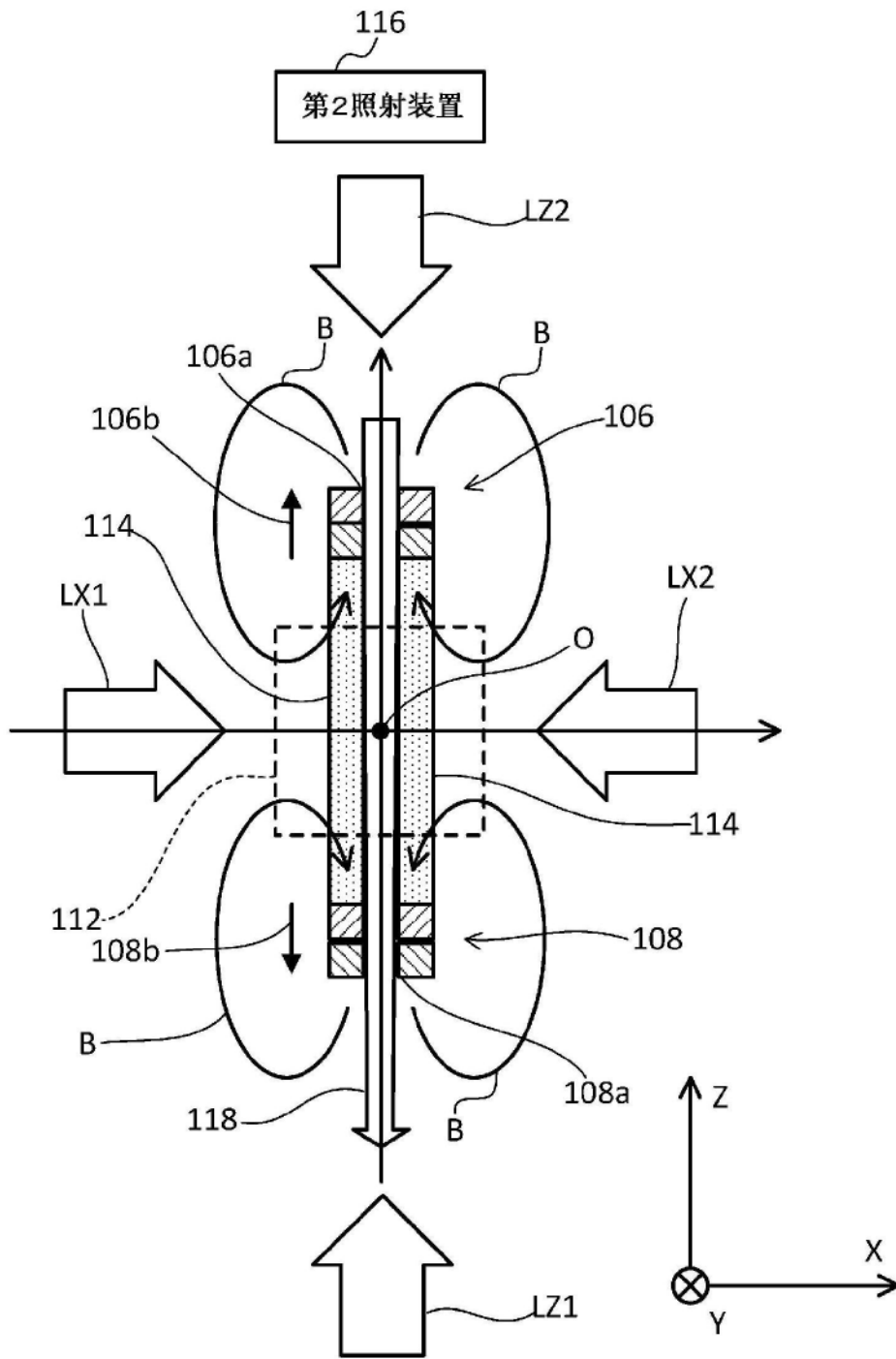


图3

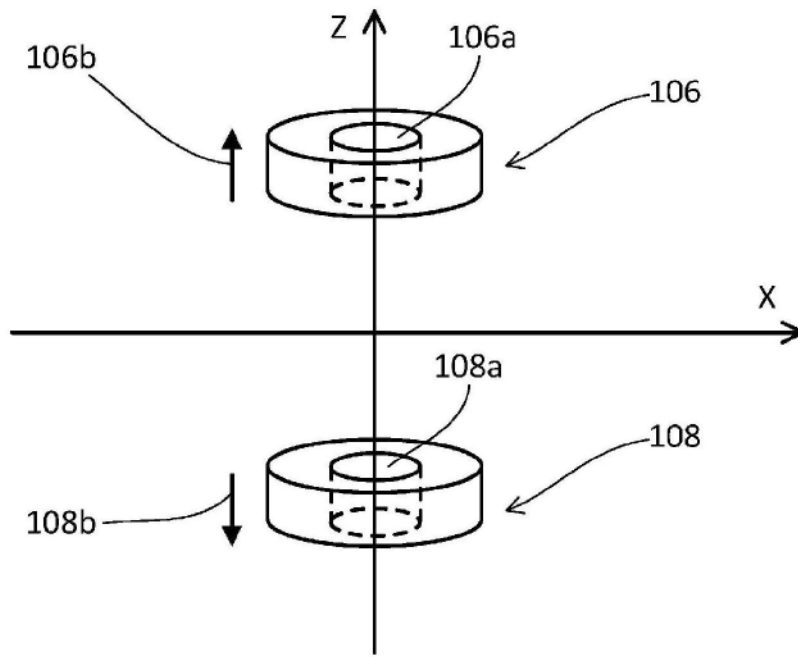


图4

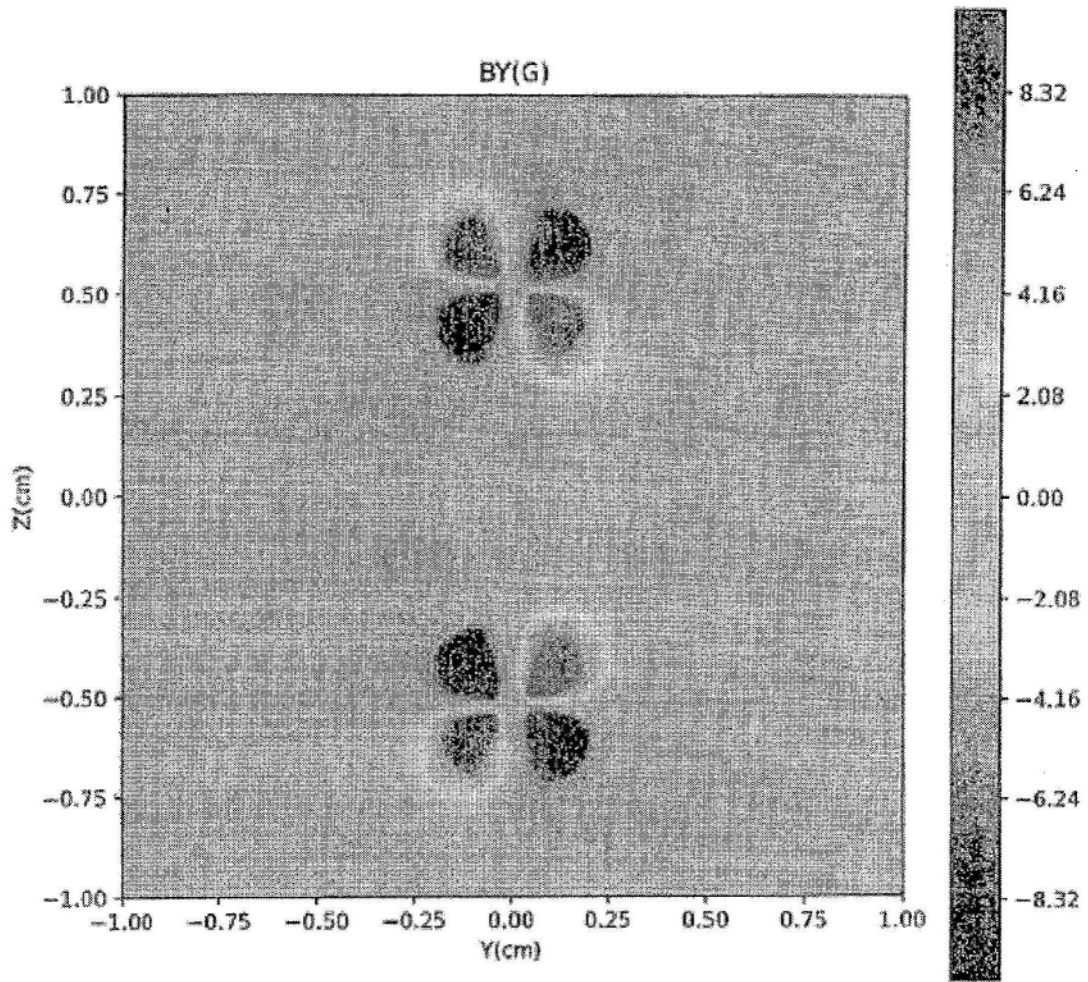


图5

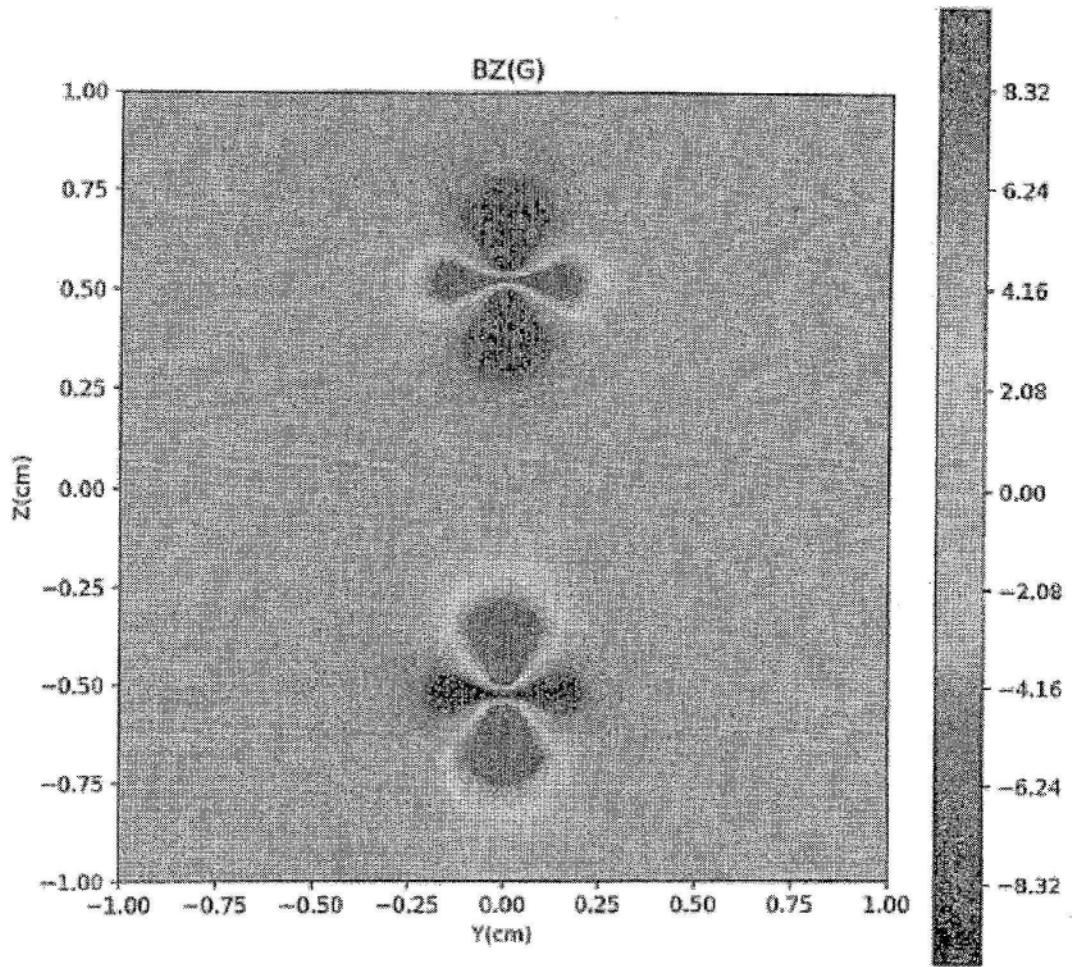


图6

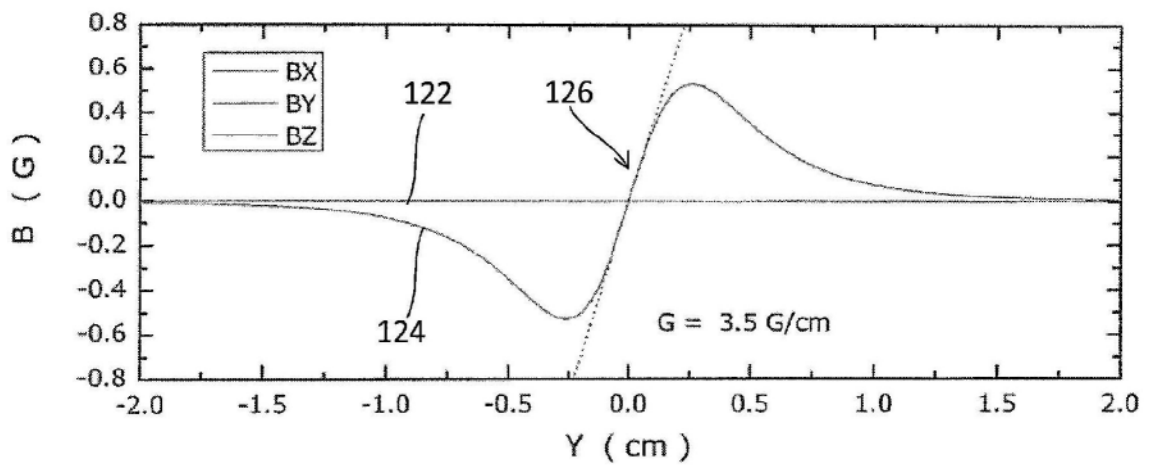


图7

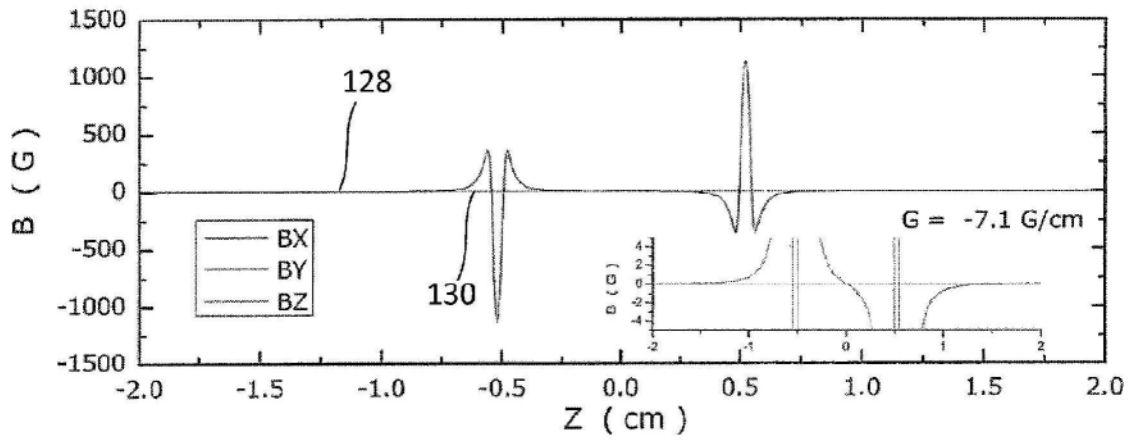


图8

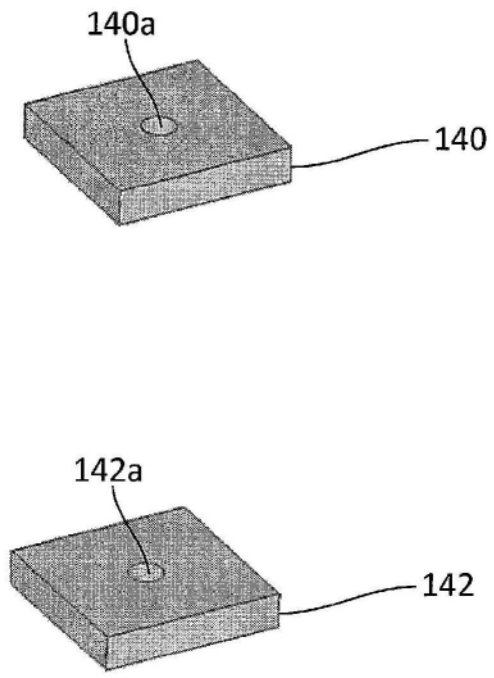


图9

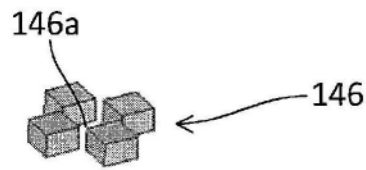
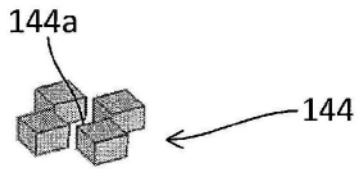


图10

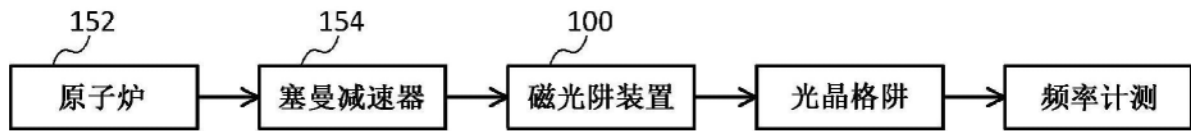


图11

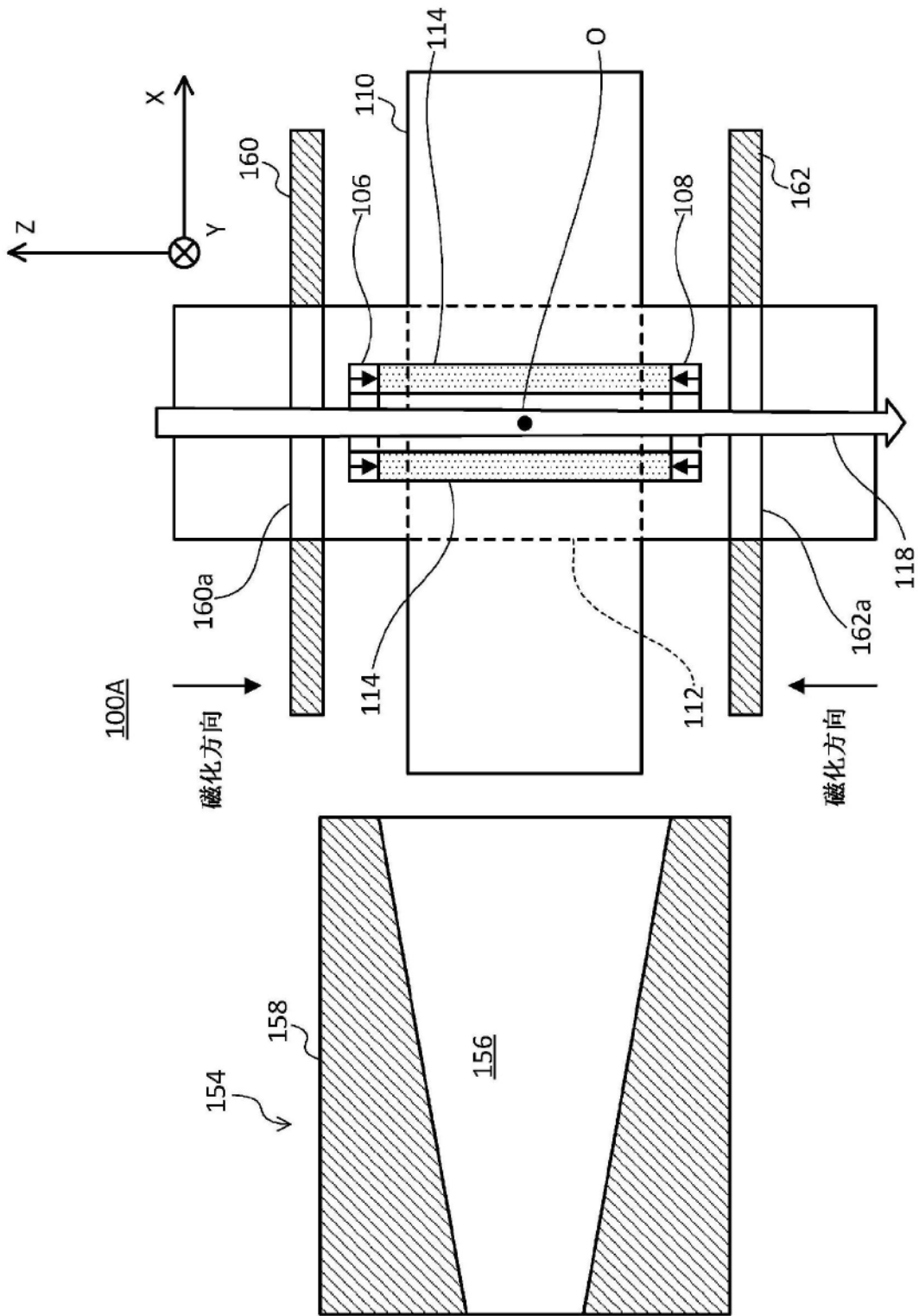


图12

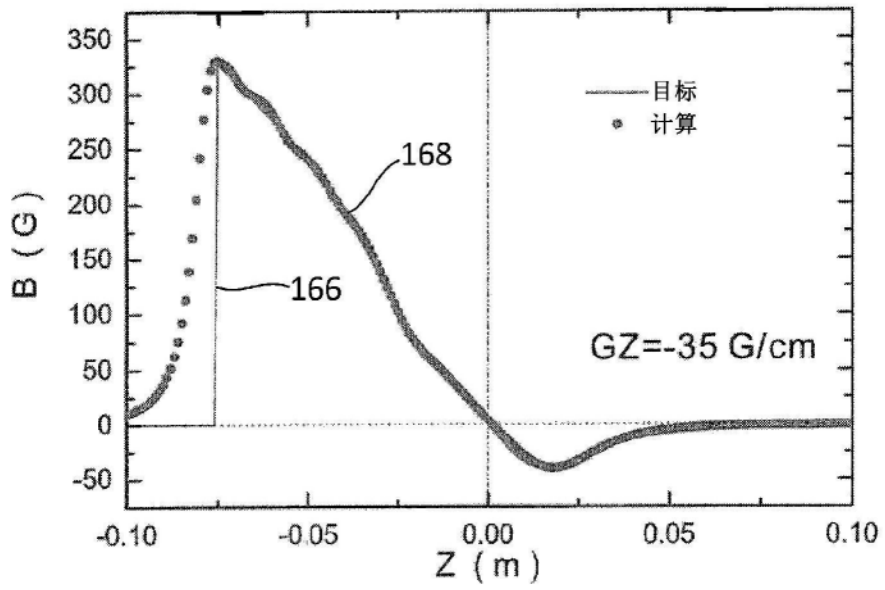


图13

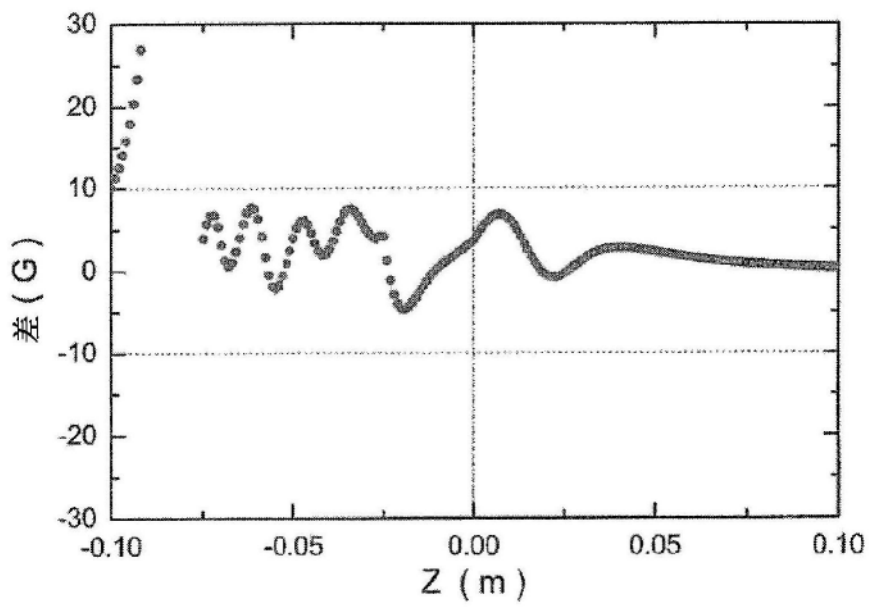


图14

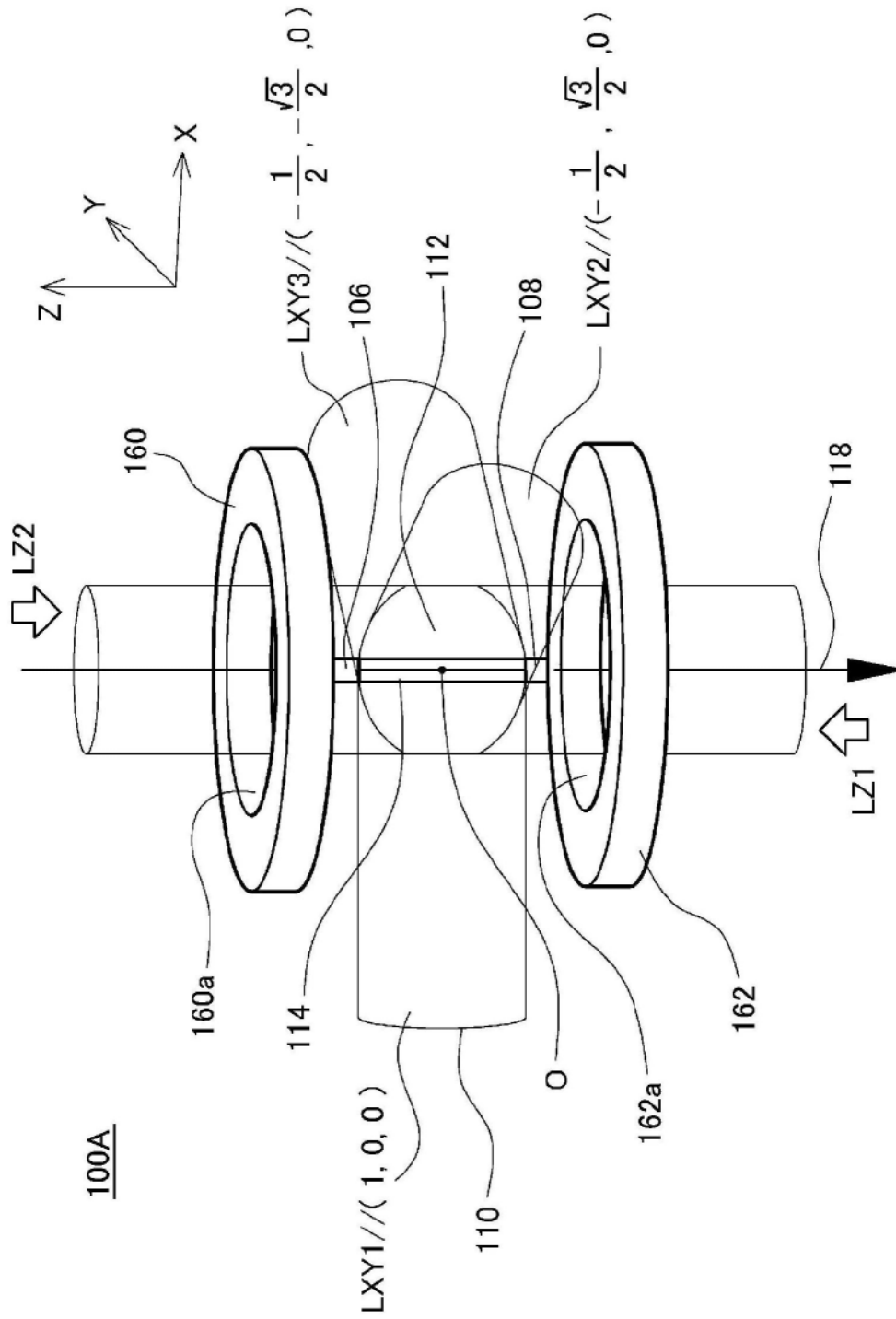


图15



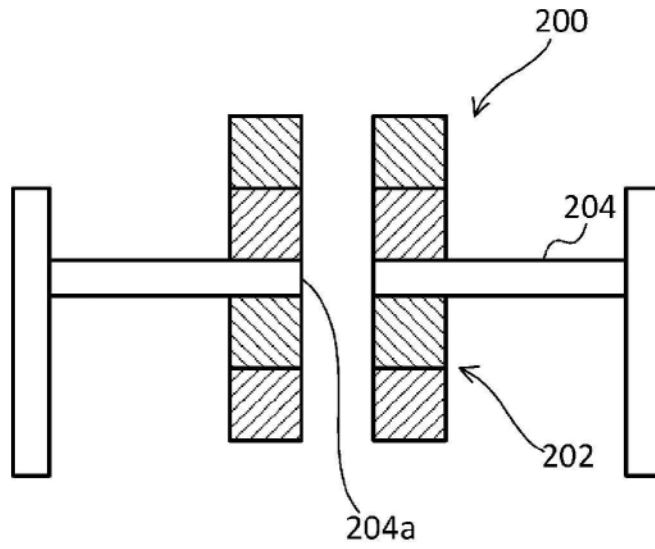


图17

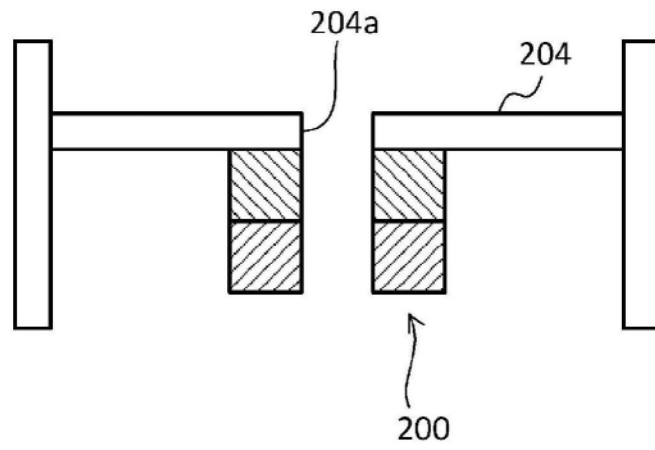


图18