



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103033781 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 10

(21) 申请号 201210362961. 8

(22) 申请日 2012. 09. 26

(30) 优先权数据

2011-216293 2011. 09. 30 JP

(71) 申请人 佳能株式会社

地址 日本东京

(72) 发明人 水谷夏彦 小林哲生 石川洁

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 李向英

(51) Int. Cl.

G01R 33/48 (2006. 01)

G01N 24/08 (2006. 01)

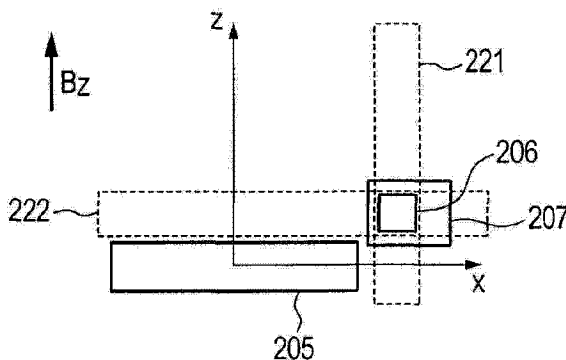
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 9 页

(54) 发明名称

核磁共振成像装置和核磁共振成像方法

(57) 摘要

公开了核磁共振成像装置和核磁共振成像方法。本发明的目的是提供核磁共振成像装置等,在共同磁场被用作光学磁强计的偏磁场和作为要向样品施加的静磁场时,避免光学磁强计的零灵敏度区域并允许利用强磁共振成像。当静磁场施加单元向样品施加静磁场的方向是 z 方向时,标量磁强计的碱金属单元被布置为在 z 方向上不与所述要成像的区域重叠,并且在与 z 方向正交的平面内方向上不与要成像的区域相交。



1. 一种执行核磁共振成像的核磁共振成像装置,包括:

静磁场施加单元,被配置为对放置在要成像的区域中的样品施加静磁场;

RF 脉冲施加单元,被配置为施加 RF 脉冲;

梯度磁场施加单元,被配置为施加梯度磁场;以及

核磁共振信号检测单元,被配置为检测核磁共振信号,

其中,作为核磁共振信号检测单元提供了标量磁强计,其中检测所述核磁共振信号的传感器由碱金属单元构成,

使用共同磁场作为操作所述标量磁强计的偏磁场和作为在所述静磁场施加单元中要向所述样品施加的静磁场,以及

当所述静磁场施加单元在 z 方向对所述样品施加所述静磁场时,所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在所述 z 方向上不与所述要成像的区域重叠,并且在与所述 z 方向正交的平面内方向上不与所述要成像的区域相交。

2. 根据权利要求 1 的核磁共振成像装置,其中,所述标量磁强计的碱金属单元被布置在下列位置,在所述位置中,所述要成像的区域的在与 z 方向正交的平面内方向上的、面向所述标量磁强计的碱金属单元的一端和另一端中的每一端,与所述标量磁强计的碱金属单元的中心相连的线所形成的角度超过 90 度。

3. 根据权利要求 1 的核磁共振成像装置,其中,所述标量磁强计的碱金属单元被布置在下列位置,在所述位置中,所述要成像的区域的在与 z 方向正交的平面内方向上的、面向所述标量磁强计的碱金属单元的一端和另一端中的每一端,与所述标量磁强计的碱金属单元的中心相连的线所形成的角度超过 60 度。

4. 根据权利要求 1 的核磁共振成像装置,其中,对于所述要成像的区域,所述 z 方向上区域的剖面形状是薄板状的形状,而与所述 z 方向正交的所述平面内方向上的剖面形状是边的尺寸大于所述薄板的厚度的方形形状。

5. 根据权利要求 1 的核磁共振成像装置,其中,对于所述要成像的区域,与所述 z 方向正交的所述平面内方向上的剖面形状是薄板状的形状,而所述 z 方向上区域的剖面形状是边的尺寸大于所述薄板的厚度的方形形状。

6. 根据权利要求 1 的核磁共振成像装置,其中,当所述要成像的区域包括所述要成像的区域中的椭圆柱形样品区域时,所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在 z 方向上不与所述要成像的区域中的所述椭圆柱形样品区域重叠,并且被布置为在与所述 z 方向正交的所述平面内方向上沿着所述椭圆柱形样品区域的侧表面,从而不与所述椭圆柱形样品区域相交。

7. 一种执行核磁共振成像的核磁共振成像方法,所述方法使用:

静磁场施加单元,被配置为对放置在要成像的区域中的样品施加静磁场;

RF 脉冲施加单元,被配置为施加 RF 脉冲;

梯度磁场施加单元,被配置为施加梯度磁场;以及

核磁共振信号检测单元,被配置为检测核磁共振信号,

其中,作为核磁共振信号检测单元提供了标量磁强计,其中检测所述核磁共振信号的传感器由碱金属单元构成,

在操作所述标量磁强计的偏磁场作为与被施加到在所述静磁场施加单元中要向所述

样品施加的静磁场的共同磁场的情况下,当所述静磁场施加单元在 z 方向对所述样品施加所述静磁场时,所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在所述 z 方向上不与所述要成像的区域重叠,并且在与所述 z 方向正交的平面内方向上不与所述要成像的区域相交。

8. 根据权利要求 7 的核磁共振成像方法,其中,所述标量磁强计的碱金属单元被布置在下列位置,在所述位置中,所述要成像的区域的在与 z 方向正交的平面内方向上的、面向所述标量磁强计的碱金属单元的一端和另一端中的每一端,与所述标量磁强计的碱金属单元的中心相连的线所形成的角度超过 90 度。

9. 根据权利要求 7 的核磁共振成像方法,其中,所述标量磁强计的碱金属单元被布置在下列位置,在所述位置中,所述要成像的区域的在与 z 方向正交的平面内方向上的、面向所述标量磁强计的碱金属单元的一端和另一端中的每一端,与所述标量磁强计的碱金属单元的中心相连的线所形成的角度超过 60 度。

10. 根据权利要求 7 的核磁共振成像方法,其中,对于所述要成像的区域,所述 z 方向上区域的剖面形状是薄板状的形状,而与所述 z 方向正交的所述平面内方向上的剖面形状是边的尺寸大于所述薄板的厚度的方形形状。

11. 根据权利要求 7 的核磁共振成像方法,其中,对于所述要成像的区域,与所述 z 方向正交的所述平面内方向上的剖面形状是薄板状的形状,而所述 z 方向上区域的剖面形状是边的尺寸大于所述薄板的厚度的方形形状。

12. 根据权利要求 7 的核磁共振成像方法,其中,当所述要成像的区域包括所述要成像的区域中的椭圆柱形样品区域时,所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在 z 方向上不与所述要成像的区域中的所述椭圆柱形样品区域重叠,并且被布置为在与所述 z 方向正交的所述平面内方向上沿着所述椭圆柱形样品区域的侧表面,从而不与所述椭圆柱形样品区域相交。

核磁共振成像装置和核磁共振成像方法

技术领域

[0001] 本发明涉及核磁共振成像装置和核磁共振成像方法。

背景技术

[0002] 已经提出了使用碱金属气体的电子自旋、具有高灵敏度的光学磁强计。当该光学磁强计用于测量磁共振(进行磁成像)时,运行磁强计的偏磁场与施加到样品的静磁场之间的关系在某种程度上受到限制。这是因为碱金属或质子的拉莫尔频率 ω_0 为 $\omega_0 = \gamma_A |B|$, 与磁场的幅度 $|B|$ 成正比。比例常数 γ_A 被称为回旋磁比。质子核自旋的回旋磁比小于碱金属电子自旋的回旋磁比,例如,质子的回旋磁比为钾的回旋磁比的大约 1/167。

[0003] 在使用具有上述性质的碱金属的光学磁强计的核磁共振成像中,存在使碱金属的拉莫尔频率与质子的拉莫尔频率匹配的方法。例如, I. Savukov, S. Seltzer 和 M. Romalis 的 Detection of NMR signals with a radio-frequency atomic magnetometer, Journal of Magnetic Resonance, 185, 214 (2007) 公开了调整要向碱金属施加的偏磁场的亥姆霍兹线圈与围绕样品的螺线管线圈的结合。利用这种结合,要向样品施加的偏磁场和静磁场被独立地调整,质子的拉莫尔频率与钾的拉莫尔频率相匹配以获得磁共振信号。

[0004] 同样,也存在已知方法使光学磁强计的偏磁场与要向样品施加的静磁场具有相同的均匀磁场。作为这样的方法,在 G. Bevilacqua, V. Biancalana, Y. Dancheva, L. Moi, Journal of Magnetic Resonance, 201, 222 (2009) 公开的方法中,在与样品中磁偶极子的偏磁场正交方向上,在振动分量上聚焦,单元的有效体被布置在所述组件产生的磁场与偏磁场平行的位置上。在这种方法中,从静磁场中质子核磁共振产生的自由感应衰减(FID)的磁场与钾的偏磁场重叠,并且其拉莫尔频率受到频率调制。受到频率调制的信号被解码以提取自由感应衰减的信号。

[0005] 在使用光学磁强计的核磁共振成像中,如 G. Bevilacqua, V. Biancalana, Y. Dancheva, L. Moi, Journal of Magnetic Resonance, 201, 222 (2009) 中的使磁强计的偏磁场与要向样品施加的静磁场具有相同的均匀磁场的方法,能够避免如 I. Savukov, S. Seltzer, 和 M. Romalis 的 Detection of NMR signals with a radio-frequency atomic magnetometer, Journal of Magnetic Resonance, 185, 214 (2007) 中的复杂的磁场调整,并且使用共同磁场作为光学磁强计的偏磁场和作为要向样品施加的静磁场。

[0006] 不过,在共同磁场如此用作光学磁强计的偏磁场和用作要向样品施加的静磁场时,避免光学磁强计的零灵敏度区域以及允许由强磁共振成像所需的条件尚未搞清楚。

发明内容

[0007] 本发明针对在使用共同磁场作为光学磁强计的偏磁场和作为要向样品施加的静磁场时,避免光学磁强计的零灵敏度区域并允许由强磁共振成像的核磁共振成像装置和核磁共振成像方法。

[0008] 本发明提供了执行核磁共振成像的核磁共振成像装置,包括:静磁场施加单元,对

放置在要成像的区域中的样品施加静磁场；RF 脉冲施加单元，施加 RF 脉冲；梯度磁场施加单元，施加梯度磁场；以及核磁共振信号检测单元，检测核磁共振信号，其中，作为核磁共振信号检测单元提供了标量磁强计，其中检测所述核磁共振信号的传感器由碱金属单元构成，形成的共同磁场可用作操作所述标量磁强计的偏磁场和用作在所述静磁场施加单元中要向所述样品施加的静磁场，以及当所述静磁场施加单元在 z 方向对所述样品施加所述静磁场时，所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在所述 z 方向上不与所述要成像的区域重叠，并且在与所述 z 方向正交的平面内方向上不与所述要成像的区域相交。

[0009] 本发明也提供了执行核磁共振成像的核磁共振成像方法，该方法使用：静磁场施加单元，对放置在要成像的区域中的样品施加静磁场；RF 脉冲施加单元，施加 RF 脉冲；梯度磁场施加单元，施加梯度磁场；以及核磁共振信号检测单元，检测核磁共振信号，其中作为核磁共振信号检测单元提供了所述标量磁强计，其中检测所述核磁共振信号的传感器由碱金属单元构成，在操作所述标量磁强计的偏磁场作为与施加到在所述静磁场施加单元中要向所述样品施加的所述静磁场的共同磁场的情况下，当所述静磁场施加单元在 z 方向对所述样品施加所述静磁场时，所述标量磁强计的碱金属单元被布置为在所述 z 方向上不与所述要成像的区域重叠，并且在与所述 z 方向正交的平面内方向上不与所述要成像的区域相交。

[0010] 根据本发明，能够实现在使用共同磁场作为所述光学磁强计的所述偏磁场和作为要向样品施加的所述静磁场时，避免所述光学磁强计的零灵敏度区域并允许由强磁共振成像的核磁共振成像装置和核磁共振成像方法。

[0011] 参考附图从示范实施例的以下说明，本发明的进一步特征将变得显而易见。

附图说明

[0012] 图 1 展示了本发明的实施例中在 origin 放置的标量磁强计的灵敏度分布；

[0013] 图 2 展示了本发明的实施例中使用标量磁强计测量磁共振时的盲区；

[0014] 图 3A 是本发明实施例中执行核磁共振成像时的碱金属单元排列的平面图；

[0015] 图 3B 是图 3A 的侧视图；

[0016] 图 4 展示了本发明的示例 1 中的核磁共振成像装置的示范配置；

[0017] 图 5 展示了光学磁强计系统的框图，其中本发明的示例 1 中的模块被连接到外部光源、光电探测器和控制系统并且被配置为以标量型的光学磁强计操作；

[0018] 图 6 展示了本发明示例 1 中使用的标量磁强计模块的示例；

[0019] 图 7A、7B、7C、7D、7E、7F 和 7G 展示了为了执行本发明示例 1 中的成像，在测量来自样品的磁共振信号时使用的自旋回波的脉冲序列；

[0020] 图 8A 是本发明示例 2 中执行核磁共振成像时的碱金属单元排列的平面图；

[0021] 图 8B 是图 8A 的侧视图；

[0022] 图 9A 是本发明示例 3 中执行核磁共振成像时的碱金属单元排列的平面图；

[0023] 图 9B 是图 9A 的侧视图。

具体实施方式

[0024] 现在将按照附图，详细介绍本发明的优选实施例。

[0025] 本发明根据在核磁共振成像中的发现,利用这一发现,当操作标量磁强计的偏磁场作为与施加到在静磁场施加单元中要向样品施加的静磁场的共同磁场时,光学磁强计的零灵敏度区域得以避免,从而允许利用强磁共振成像。

[0026] 为了介绍光学磁强计的零灵敏度区域,在这个实施例中首先介绍使用标量磁强计作为光学磁强计的示范配置。标量磁强计被用作核磁共振信号检测单元,在执行核磁共振成像的核磁共振成像装置中检测核磁共振信号。确切地说,在这个实施例中的核磁共振成像装置包括静磁场施加单元,它对放置在要成像的区域中的样品施加静磁场;施加 RF 脉冲的 RF 脉冲施加单元;施加梯度磁场的梯度磁场施加单元;以及检测核磁共振信号的核磁共振信号检测单元。

[0027] 在这样的核磁共振成像装置中,标量磁强计构成了核磁共振信号检测单元。标量磁强计是取决于磁场的幅度 $|B|$ 产生输出的磁强计,它使用碱金属的拉莫尔频率 ω_0 作为测量原理, ω_0 为 $\omega_0 = \gamma_A |B|$ 。

[0028] 当静磁场的幅度是 B_{dc} ,来自样品的 FID 信号的幅度是 B_{ac} ,而在碱金属单元的测量点由静磁场与 FID 信号的磁场形成的角度是 θ 时,在静磁场 B_{dc} 充分大于 FID 信号的磁场 B_{ac} 的条件下,得到了以下的表达式:

[0029]

$$|B| = (B_{dc}^2 + B_{ac}^2 + 2 B_{dc} B_{ac} \cos \theta)^{1/2} \approx B_{dc} + B_{ac} \cos \theta$$

[0030] 从这个表达式,已经新发现了在 Bevilacqua 等人文章中未介绍的、将在以下进行说明的内容。确切地说,当在来自样品的 FID 信号 B_{ac} 的静磁场方向中有增加分量的位置上布置传感器时,获得强磁共振信号。静磁场 B_{dc} 中的 FID 信号由以角频率 $\omega_H = \gamma B_{dc}$ 振动的分量 B_{ac} 和以弛豫时间 T_2 经历横向弛豫的分量构成。这里注意到比弛豫时间更短的时间标度上的共振。

[0031] 可以认为在静磁场 B_{dc} 中的磁化矢量 m 包括平行于静磁场的分量 $m_{//}$ 和以角频率 $\omega_H = \gamma B_{dc}$ 振动的与静磁场正交的分量 m_{\perp} ,且彼此叠加。当角度 ϕ 被指为由作为矢量的磁化矢量 m 与静磁场形成的角度时, $m_{//} = |m| \cos \phi$,以及 m_{\perp} 的幅度是 $|m_{\perp}| = |m| \sin \phi$ 。在核磁共振成像的信号观测中,观测到由矢量 m_{\perp} 产生并且以矢量旋转的角频率 ω_H 振动的磁场。 $\sin \phi$ 项是比例系数,它在弛豫时间 T_2 被弛豫。因此,对于布置传感器的位置,考虑由与样品位置中磁场正交的磁化矢量 m_{\perp} 产生的 FID 信号的磁场分布。已经发现,通过考虑在静磁场方向上增加磁场分量的布局,能够由标量磁强计获得大信号。由放置在原点的磁化矢量 m_{\perp} 在位置 d 产生的磁场 $B(d)$ 由以下表达式表达,其中单位矢量 n 在矢量 d 的方向。

$$[0032] \quad B(d) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3n(n \cdot m_{\perp}) - m_{\perp}}{|d|^3} \right]$$

[0033] 为了绘制等强度线而计算在静磁场方向 $B(d)$ 的分量 $B_{//}(d)$,然后得到如图 1 的图。这幅图示展示了由磁化矢量 $m_{\perp} = (1, 0, 0)$ 产生的磁场的 z 分量的计算结果, z 被放置在作为静磁场方向的轴方向上的原点。

[0034] 基于以上计算,在执行核磁共振成像时,能够考虑传感器的灵敏度分布。为此,从图 1 中的磁场强度分布可以读取和得到传感器灵敏度的分布。图 1 展示了由放置在原点的磁化矢量 m_{\perp} 在位置矢量 d 处产生的磁场(的 z 分量)。当我们考虑在坐标原点放置的传感

器时,图 1 的解释可以是当磁化矢量 $m \perp$ 被放置在离开传感器位置矢量 $-d$ 时从几何学确定的灵敏度。因此,图 1 可以被解读为展示了标量磁强计被放置在原点时,在空间中各种点上安排的磁化矢量 $m \perp$ 产生的信号的灵敏度分布。由于该分布关于原点对称的,所以没有必要进行矢量 d 到矢量 $-d$ 的转换。

[0035] 图 1 显示了存在着关于传感器灵敏度的符号变化的区域。该区域包括从传感器在静磁场方向上延伸的轴,以及包括传感器并与该静磁场正交的平面。来自核磁共振成像中的每个像素的信号可以被视为来自体素的磁共振信号的空间平均值。当核磁共振成像中的体素横跨传感器响应有符号变化的区域时,体素中的空间平均是具有不同符号的信号的相加。在这时,从这个体素获得的信号非常小,且实质上接近零。

[0036] 在以上说明中,传感器已经被视为理想的点。实际上,为了读取磁场,传感器使用具有有限尺寸的碱金属单元。对于传感器灵敏度降低的空间,需要考虑(碱金属单元的尺寸 + 体素尺寸)的范围。

[0037] 最终,为了使用光学磁强计检测磁场,在其中封装碱金属的玻璃单元 206 的周围,包括图 2 所示柱形部分的宽度和深度以及盘形部分的厚度的区域,是核磁共振成像中具有零或几乎为零灵敏度的区域。注意,体素尺寸是成像中确定的参数。

[0038] 图 2 中区域的尺寸不是先前准确确定的。典型情况下,关于毫米级的体素尺寸,当碱金属单元的尺寸为厘米级时,盲区的范围主要受碱金属单元尺寸的影响。确切地说,图 2 中盲区的尺寸(柱形部分的宽度和深度以及盘形部分的厚度)可以基本上由碱金属单元的尺寸确定。因此,有必要在样品中确定了核磁共振成像(MRI)中要成像的区域之后,确定光学磁强计的传感器模块的位置,使得碱金属单元的位置不与盲区重叠。

[0039] 参考图 3A 和显示其侧视图的图 3B,将介绍核磁共振成像装置中的传感器的示范布局。正如图 3A 所示,光学磁强计模块 207 通过光缆被连接到外部控制器。在该模块中,设置其中封装有碱金属的玻璃单元 206。对要被 MRI 成像的区域 205 中的样品以附图中的 z 方向施加静磁场。

[0040] 在这时,盲区 221 在单元 206 的静磁场方向上延伸。同样,盲区 222 在包括单元 206 并与静磁场正交的方向上延伸。

[0041] 确切地说,当确定要成像的区域 205 时,标量磁强计的碱金属单元 206 被布置为使得沿着静磁场的坐标(图 3A 和 3B 中的 z)不重叠。单元 206 被放置为在与静磁场正交的平面(图 3B 中的 x - y 平面)内不与要成像的区域 205 相交。

[0042] 确切地说,当静磁场施加单元在 z 方向上对样品施加静磁场时,标量磁强计的碱金属单元(单元 206)被布置为在 z 方向上不与要成像的区域重叠,并且在与 z 方向正交的平面内方向上不与要成像的区域相交。因此,当使用共同磁场作为操作标量磁强计的偏磁场和作为在静磁场施加单元中要向样品施加的静磁场时,光学磁强计的零灵敏度区域得以避免从而允许由强磁共振成像。

[0043] 另外,更大的磁信号在更接近样品的位置获得。因此,单元被布置在接近要成像的区域的位置,正如以下说明。

[0044] 确切地说,所期望的是,在要成像的区域 205 的在与作为静磁场的施加方向的 z 方向正交的平面内方向上的、面向碱金属单元的一端和另一端中的每一端,与碱金属单元的中心相连的线所形成的角度 θ (从单元 206 的中心看到的要成像的区域 205 的角度 θ) 超

过 90 度的位置设置单元。如果根据以上介绍的两种初始限制,从单元 206 的中心看到的要成像的区域 205 的角度 θ 不能超过 90 度,所期望的是在至少为 60 度的角度 θ 的位置设置单元。

[0045] 示例

[0046] 现在将介绍本发明的示例。

[0047] (示例 1)

[0048] 作为示例 1,将参考图 4 介绍应用本发明的核磁共振成像装置的示范配置。正如图 4 展示,在这个示例中的核磁共振成像装置由在三个轴线方向引导的三对线圈 201 包围以便抵消地磁场。另外,该核磁共振成像装置包括一对亥姆霍兹线圈 202,用于对样品施加静磁场。线圈对 202 施加强度为例如约 50 μ T 到 200 μ T 的静磁场 B_0 。偏振线圈 203 在与静磁场 B_0 正交的方向产生磁场,引起样品的自旋偏振。偏振线圈 203 施加例如 40mT 到 100mT 的磁场。RF 线圈 204 对样品施加 180° 脉冲或 90° 脉冲,以便控制样品的自旋方向。整个核磁共振装置被容纳在铝制的电磁屏蔽盒(未显示)中,以防止测量环境的磁场噪声。图 4 示意地展示了在装置中要成像的区域 205。要放置在装置中的样品或活体有时比区域 205 大得多。

[0049] 闭环标量磁强计模块 207 使用碱金属单元作为磁传感器,用于检测核磁共振。磁强计 207 包括碱金属单元 206,并且光学地读取碱金属蒸汽的自旋行为以检测磁场。标量磁强计的细节将在下文介绍。附图没有展示需要连接到该模块并作为标量磁强计运行的光源。这将在以下详细地介绍。

[0050] 提供了 Gz 线圈 208、Gx 线圈 209 和 Gy 线圈 210 作为对成像施加梯度磁场的线圈。Gz 指 z 方向的磁场 B_z ,具有取决于 z 坐标的值的磁场强度(梯度磁场)。同样,Gy 和 Gx 也指 z 方向的磁场 B_z ,具有取决于 y 坐标的值和 x 坐标的值的磁场强度(梯度磁场)。

[0051] 图 6 展示了本文使用的标量磁强计模块的示例。

[0052] 单元 421 由某材料比如玻璃制作,它对于探测光或泵浦光是透明的。

[0053] 作为一组碱金属原子的钾(K)被封装在要被气密的单元 421 之中。作为缓冲气和骤冷气,封装氦气(He)和氮气(N_2)。缓冲气防止偏振碱金属原子的扩散,以便降低由于与单元壁的碰撞造成的自旋弛豫,从而有效地提高了碱金属的极化率。 N_2 气是骤冷气,从激励状态的 K 中取走能量以防止光发射,从而有效地提高了光泵浦的效率。

[0054] 在单元 421 的周围提供了炉 431。为了提高单元 421 中的碱金属气体的密度以操作磁强计,单元 421 被加热至最高约 200 摄氏度。为此,在炉 431 中放置加热器。炉 431 也用来防止内部的热被释放到外部,从而其表面覆盖着绝热材料。光学窗口被放置在光路上,后面介绍的泵浦光和探测光经由它通过,以保证光路。在图 6 中,炉 431 的上面是打开的以展示内部的单元 421,但是单元 421 实际上整体被炉封闭。

[0055] 在泵浦光的光学系统中,从连接到光缆连接器 401 的光缆(未显示)端面发射的激光,在光缆的数值孔径(NA)所确定的辐射角范围内延伸。光被凸透镜 402 转换为准直光束,并且由偏振光束分离器 403 和 1/4 波片 404 转换为圆形偏振泵浦光,然后施加到单元 421。

[0056] 在探测光的光学系统中,从连接到光缆连接器 411 的光缆(未显示)端面发射的激光,在光缆的数值孔径(NA)所确定的辐射角范围内延伸。光被凸透镜 412 转换为准直光束。在这个示例中,光路被镜子 413 折回以减小该模块的尺寸。已经穿过偏振器 414 的线性偏

振平面由半波片 415 旋转和调整,以便获得线性偏振的探测光,它被施加到单元 421。

[0057] 在用于偏振测量的平衡型光接收系统中,来自偏振光束分离器 416 的透射光和反射光由聚光透镜 417 和 419 聚焦。在连接到光纤连接器 418 和 420 的光纤端面上聚焦的光被耦接到光纤的波导模式,并且从该模块提取。在该模块中,碱金属单元被布置在该模块的末端而不是中心,以便尽可能接近该样品。不过,碱金属单元具有有限的尺寸,并且它被放置在包括加热器和绝热层的炉中,从而从该模块外部到碱金属单元中心的距离是有限的值 d 。该值 d 是例如约 3 厘米。

[0058] 正如图 5 所示,该模块被连接到外部光源、光电探测器和控制系统,并且作为标量光磁强计工作。

[0059] 在图 5 的框图中,从泵浦光的激光光源 502 发射的泵浦光的波长与允许该单元中一组原子极化的波长进行匹配,例如,作为碱金属的钾的 D1 共振线。该波长约为 770 纳米。作为用于激光强度调制的光学调制器 503,本文使用了 EO 调制器。从 EO 调制器输出的光被耦接到保持偏振的单模式光纤。该光纤的发射端被连接到图 6 中模块 207 的光纤连接器 401。

[0060] 从探测光的光源 501 发射的激光输出被连接到保持偏振的单模式光纤。该光纤的发射端被连接到该模块的光纤连接器 411。该探测光被理想地解谐至原子共振线跃迁的一定范围,以避免不必要的泵浦并增加偏振平面的旋转角。例如,使用了 769.9 纳米的光。

[0061] 多模式光纤被连接到该模块的平衡型光接收器的光纤连接器 418 和 420,并且一组平衡型光电探测器 505 接收来自该光纤的光。作为连接到光电探测器的运算放大器电路 506 的输出,能够测量偏振平面的旋转角。

[0062] 磁强计在 z 方向的偏磁场下运行。在这个周期中由 EO 调制器以单元中自旋极化在 x 轴方向调制泵浦光。碱金属的自旋极化在作为偏磁场方向的 z 方向上以拉莫尔频率围绕旋转轴执行进动。这就以拉莫尔频率调制在 y 方向通过的探测光的偏振平面的旋转。

[0063] 锁相放大器 507 使用合成函数发生器 509 的输出作为参考信号,执行锁相检测。可以从锁相放大器提取取决于该模块中碱金属单元磁场的拉莫尔频率变化作为响应于参考信号相移。PID 控制器 508 运行时以相移量作为误差信号,并且使误差信号为 0 的反馈信号被返回到合成函数发生器 509。因此,能够控制合成函数发生器 509 的振荡频率,以便配置标量磁强计执行自激振荡,同时根据该模块单元部分中的磁场强度改变振荡频率。

[0064] 配置标量磁强计的方法不限于于此,例如,可以使用以下介绍的施加 RF 磁场的磁强计类型,强制碱金属单元中的自旋极化执行围绕静磁场的进动。

[0065] 确切地说,可以使用 M-z 磁强计(N. Beverini, E. Alzetta, E. Maccioni, O. Faggioni, C. Carmisciano: A potassium vapor magnetometer optically pumped by a diode laser, on Proceeding of the 12th European Forum on Time and Frequency (EFTF 98))。

[0066] 同样,可以使用 M-x 磁强计(S. Groeger, G. Bison, J. -L. Schenker, R. Wynands 和 A. Weis, A high-sensitivity laser-pumped Mx magnetometer, The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, Volume 38, 239-247)。

[0067] 利用这种装置,使用了图 7A、7B、7C、7D、7E、7F 和 7G 所示的自旋回波的脉冲序列测量来自样品的磁共振信号以执行成像。从测量开始到结束,不变的电流穿过亥姆霍兹线圈

对 202, 产生 z 方向的静磁场 B_0 (在附图中这由带有抑扬符号的字符 z 显示) 并将其施加到样品和标量磁强计 207 (图 7C)。

[0068] 首先, 电流通过偏振线圈 203, 在 y 方向上产生幅度为 80mT 的磁场(在附图中, 这由带有抑扬符号的字符 y 显示)以偏振样品(图 7A)。磁场的施加时间 t_p 理想情况下长于该样品质子自旋的纵向弛豫时间。穿过偏振线圈 203 的电流被迅速减小, 以使得该样品的自旋在 z 方向上对齐。当延迟时间 t_d 已经过去, 从 RF 线圈 204 施加 90° 脉冲, 同时正在施加由 G_z 线圈 208 产生的切片选择梯度磁场, 从而产生 FID 信号(图 7B 和图 7F)。施加再收敛的梯度磁场脉冲使自旋相位对齐。梯度磁场由 G_y 线圈 209 对相位编码方向上的 y 轴产生, 并且被添加到该样品(图 7E)。同时, 梯度磁场被施加到用于频率编码的 x 轴的 G_x 线圈 210 (图 7D)。在时间 τ 已经过去之后, 施加 180° 脉冲以将该样品的自旋旋转相位反转 180° (图 7B), 并且对用于频率编码的 x 轴的 G_x 线圈再次施加梯度磁场(图 7D)。从第一个 90° 脉冲开始在时间 2τ 已经过去之后, 观测到自旋回波的峰值(图 7G)。相位编码步骤被重复了等于在 y 轴方向被划分部分数量的次数, 以产生不同的 G_y 、获得全部数据以及产生实际空间的图像。

[0069] 从磁共振信号成像的脉冲序列不限于于此。例如, 可以施加已知的梯度回波。不是切片选择, 可以应用 z 轴方向是相位编码方向的 3D 区域成像。

[0070] (示例 2)

[0071] 作为示例 2, 将参考图 8A 和显示其侧视图的图 8B, 介绍要成像的区域形状不同于示例 1 中形状的示范配置。

[0072] 在示例 1 中, 对于要成像的区域, 在 z 方向区域的剖面形状是薄板状的形状, 并且在与 z 方向正交的平面内方向上的剖面形状是方形形状, 边的尺寸大于薄板的厚度。

[0073] 另一方面, 在这个示例中, 对于要成像的区域, 在与 z 方向正交的平面内方向上的剖面形状是薄板状的形状, 而在 z 方向区域的剖面形状是方形形状, 边的尺寸大于薄板的厚度。确切地说, 正如图 8A 所示, 该区域是 y 方向上薄板状的区域。

[0074] 同样在这种情况下, 存在着与实施例介绍的相同限制。确切地说, 当确定要成像的区域 205 时, 标量磁强计的碱金属单元 206 被布置为使沿着静磁场的坐标(图 8B 中的 z) 不与要成像的区域 205 重叠。单元 206 将被布置为在与静磁场正交的平面(图 8B 中的 x - y 平面)内不与要成像的区域 205 相交。

[0075] 另外, 在更靠近样品的位置得到更大的磁信号。因此, 期望将单元 206 设置在靠近样品的位置, 如以下介绍。确切地说, 所期望的是, 在要成像的区域的在与作为静磁场的施加方向的 z 方向正交的平面内方向上的、面向碱金属单元的一端和另一端中的每一端, 与标量磁强计的碱金属单元的中心相连的线所形成的角度 θ (从单元 206 的中心看到的要成像的区域 205 的角度 θ) 理想情况下至少 60 度的位置设置单元, 如果根据以上介绍的两种初始限制, 所述角度不能超过 90 度的话。注意, 由于从单元 206 的中心看到的要成像的区域 205 的角度 θ 由要成像的区域 205 的厚度界定, 所以在某些情况下该角度的大小变得比以上更小。

[0076] (示例 3)

[0077] 在示例 3 中, 将参考图 9A 和显示其侧视图的图 9B, 介绍当发现要成像空间中的样品不完全充满要成像的空间并且在图像中存在仅有空气的区域时, 传感器的示范可能布

局。

[0078] 例如,要成像的区域包括在要成像的区域中的椭圆柱形样品区域时,确切地说,要成像的空间 205 包括椭圆柱形样品时,传感器被布置为如图 9A 中所示。确切地说,沿着椭圆柱的侧表面设置传感器模块 207,从而如果该单元进入了要成像的空间,该单元实际上未变成障碍。正如图 9A 所示,单元 206 被布置为在与静磁场正交的平面(图 9B 中的 x-y 平面)内不与样品相交,从而允许配置图像。碱金属单元 206 被布置为坐标沿着静磁场不重叠。这些方面与示例 1 和示例 2 相同。

[0079] 虽然已经参考示范实施例介绍了本发明,但是应当理解,本发明不限于所公开的示范实施例。以下权利要求书的范围应当按照最广泛的解释以包含一切这样的修改以及等效结构和功能。

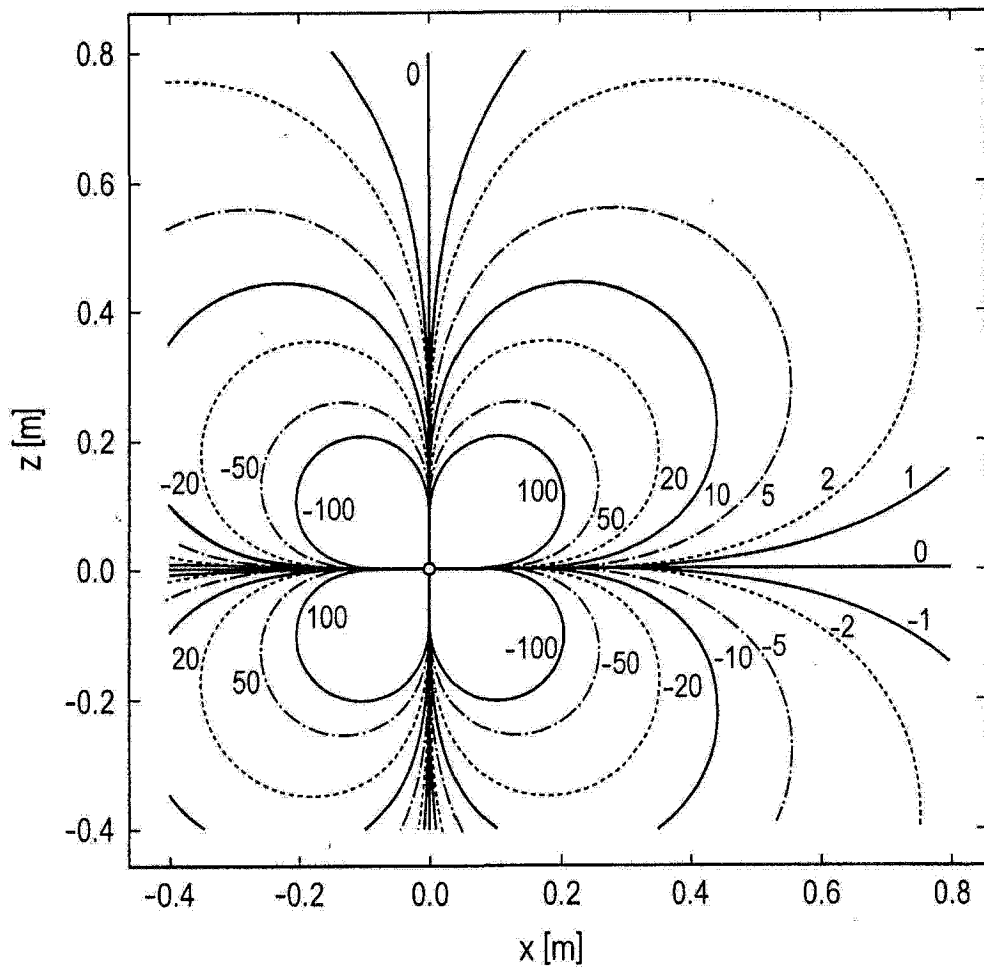


图 1

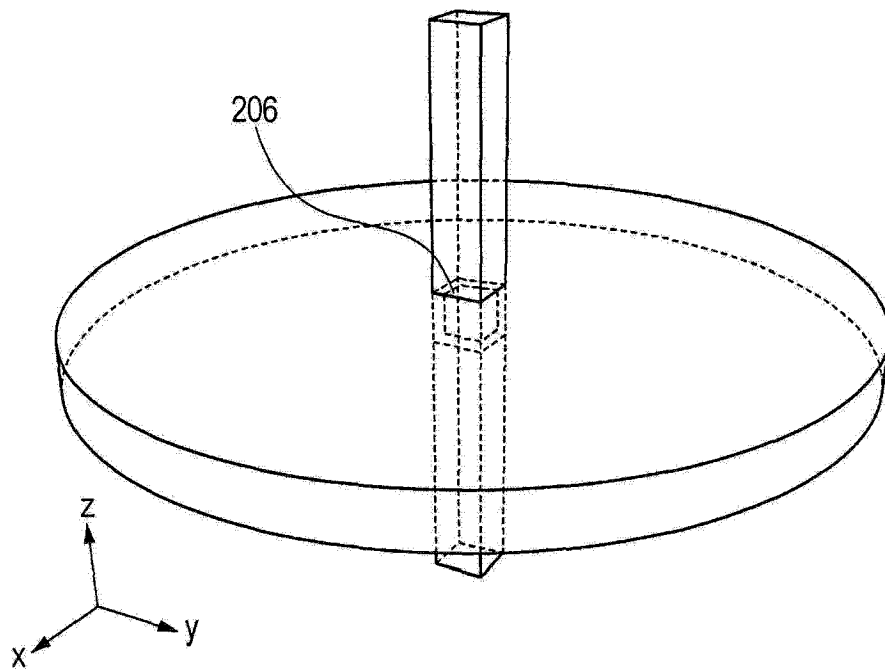


图 2

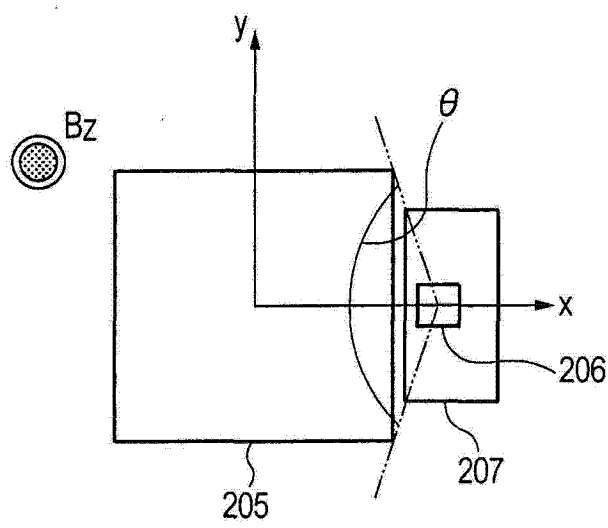


图 3A

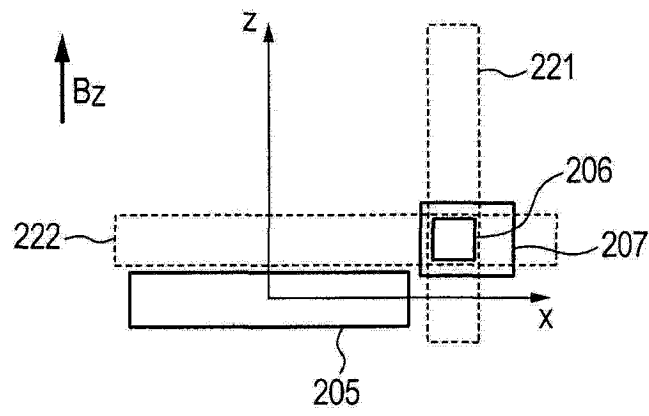


图 3B

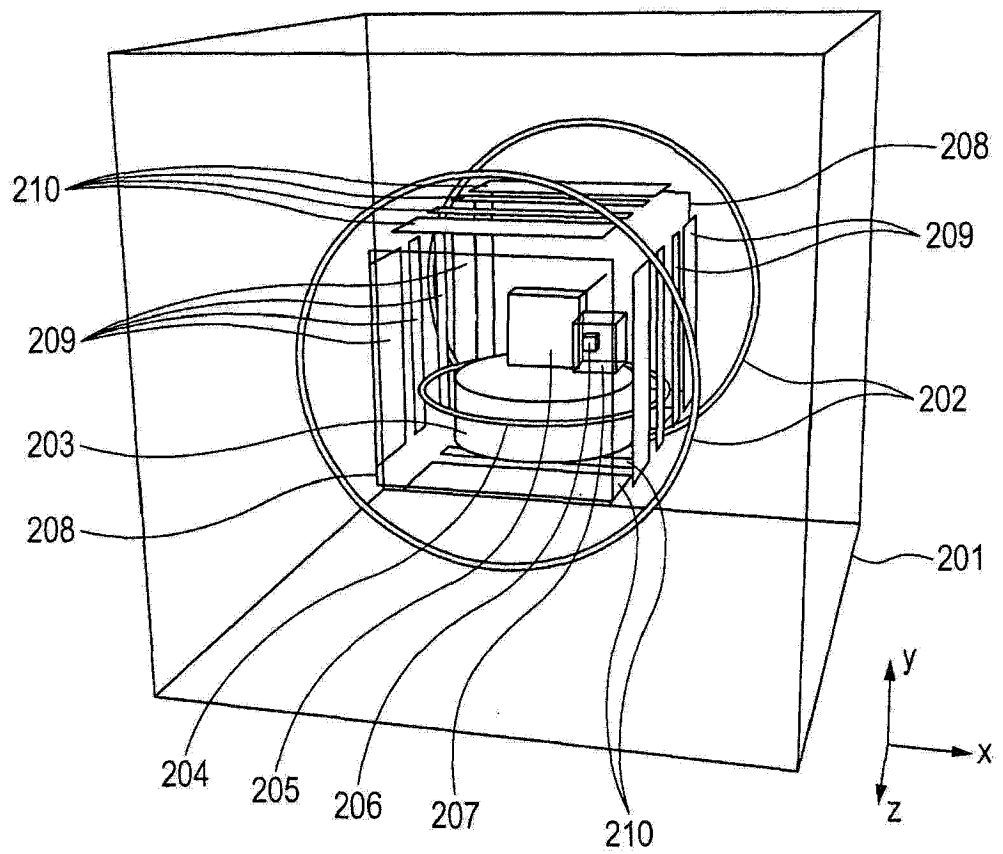


图 4

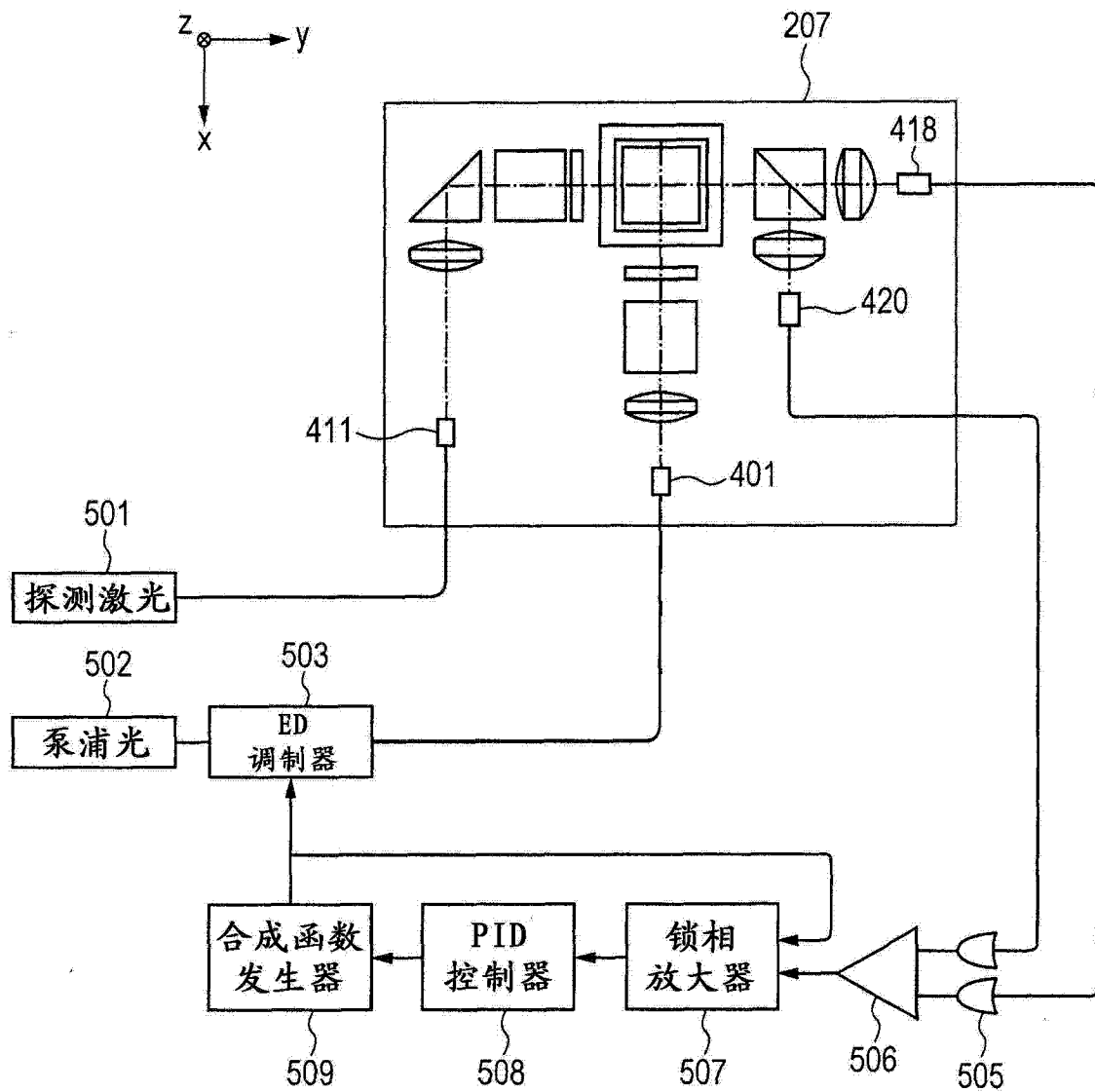


图 5

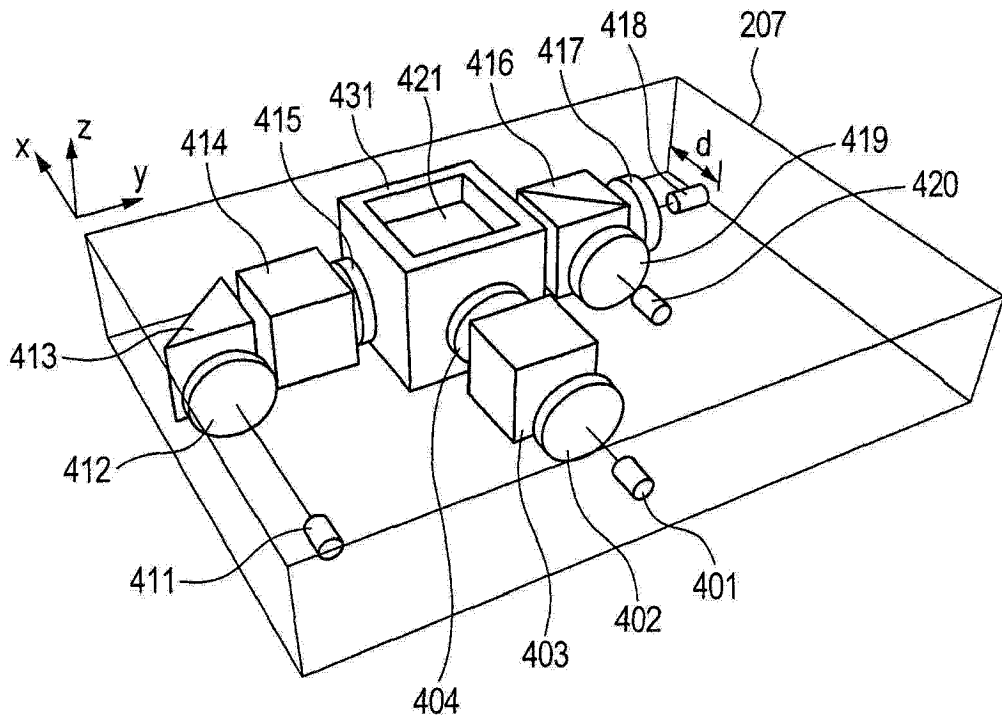


图 6



图 7A

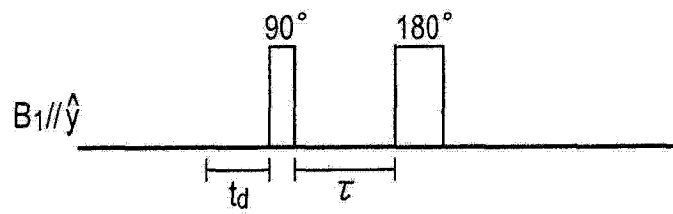


图 7B



图 7C



图 7D



图 7E



图 7F

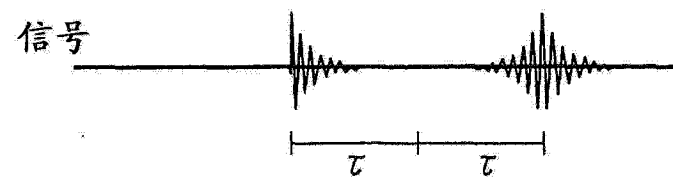


图 7G

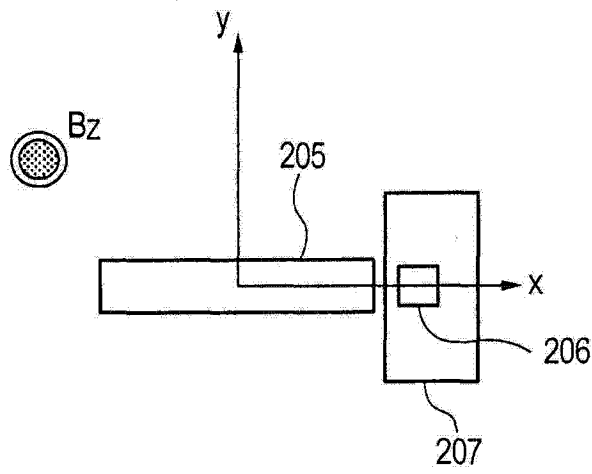


图 8A

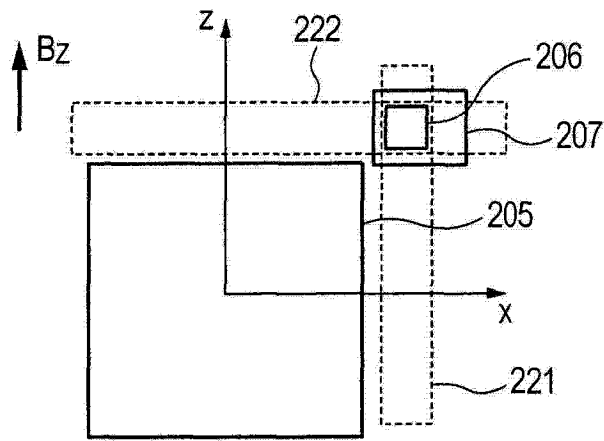


图 8B

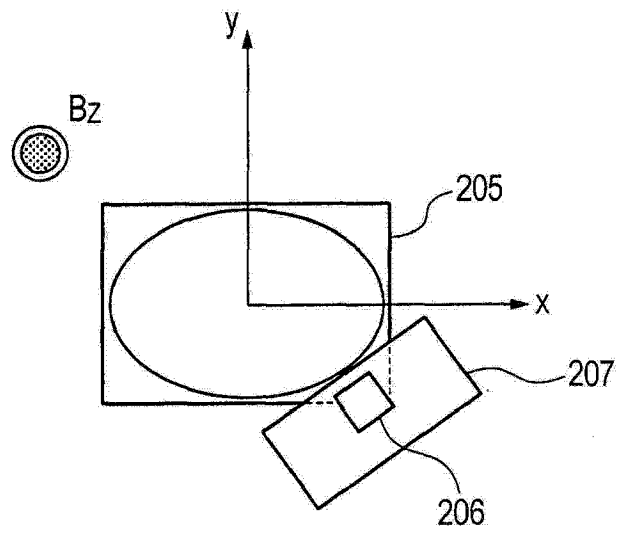


图 9A

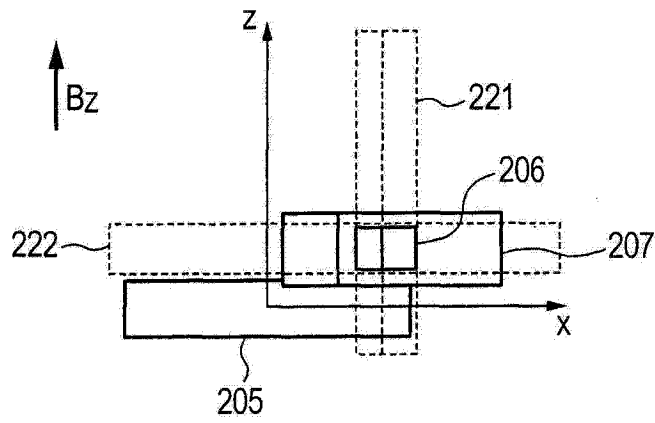


图 9B