



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102830381 A

(43) 申请公布日 2012. 12. 19

(21) 申请号 201210291150. 3

(22) 申请日 2012. 08. 15

(71) 申请人 中国科学院武汉物理与数学研究所

地址 430000 湖北省武汉市武昌区小洪山西  
30 号

(72) 发明人 周欣 刘国宾 孙献平 刘买利  
叶朝辉

(74) 专利代理机构 武汉宇晨专利事务所 42001

代理人 王敏锋

(51) Int. Cl.

G01R 33/44 (2006. 01)

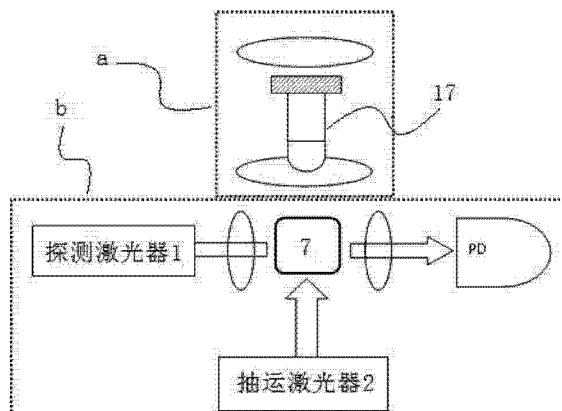
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置及测量方法

(57) 摘要

本发明公布了一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置，包括铯原子蒸气泡，包括套设在铯原子蒸气泡上的磁屏蔽套筒、设置在磁屏蔽套筒内的三组亥姆霍兹线圈、用于极化铯原子蒸气泡内铯原子的极化装置、用于向铯原子蒸气泡发射探测激光的激光发射装置、用于检测穿过铯原子蒸气泡的探测激光的 NMR 信号的检测装置和用于对被测样品进行预极化并可将预极化后的样品放置到铯原子蒸气泡上方的气动进样装置。还公布了一种基于激光原子磁力计的 NMR 的测量方法。本发明具有更高的探测灵敏度；不需要低温制冷，节约运行成本；具有更低的工作温度。



1. 一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,包括铯原子蒸气泡(7),其特征在于:包括套设在铯原子蒸气泡(7)上的磁屏蔽套筒(5)、设置在磁屏蔽套筒(5)内的三组亥姆霍兹线圈(6)、用于极化铯原子蒸气泡(7)内铯原子的激光极化装置、用于向铯原子蒸气泡(7)发射探测激光的激光发射装置、用于检测穿过铯原子蒸气泡(7)的探测激光的 NMR 信号检测装置和用于对被测样品进行预极化并可将预极化后的样品放置到铯原子蒸气泡(7)上方的气动进样装置。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的激光极化装置包括抽运激光器(2)和用于将抽运激光器(2)发出的激光转换为圆偏振光后传送到铯原子蒸气泡(7)的四分之一波片(4)。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的激光发射装置包括探测激光器(1)和用于将探测激光器(1)发出的激光转换成线偏振探测激光后传送到铯原子蒸气泡(7)的偏振棱镜(3)。

4. 根据权利要求 2 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的 NMR 信号检测装置包括用于对穿过铯原子蒸气泡(7)的线偏振探测激光进行分束的偏振分束棱镜(8)、用于检测分束后的线偏振探测激光并将检测信号发送到乘法器(10)的光电探测器(9)、用于调整抽运激光器(2)的输出频率并输出方波同步信号到乘法器(10)的信号发生器(11)、用于对检测信号及方波同步信号进行乘法运算的乘法器(10)和用于对乘法器(10)的输出进行滤波并传送到上位机(13)的低通滤波器(12)。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的气动进样装置包括气缸(18)、设置在气缸(18)内且一端设置有与气缸(18)内壁贴合的活塞的样品管(17)、套设在气缸(18)一端的环形预极化磁体(19)和用于控制样品管(17)在气缸(18)内往复运动的驱动装置,所述的磁屏蔽套筒(5)上开设有通孔,气缸(18)一端穿通过通孔设置在铯原子蒸气泡(7)上方。

6. 根据权利要求 5 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的气缸(18)一端套设有导引线圈(20),另一端套设有小角度脉冲线圈(21),所述的驱动装置包括提供气压源的空气压缩机(14)和用于切换空气压缩机(14)输入到气缸(18)的气流方向的电磁阀(15)。

7. 根据权利要求 1 所述的一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置,其特征在于:所述的三组亥姆霍兹线圈(6)包括三对环形的亥姆霍兹线圈,每对亥姆霍兹线圈的中心线重合,三对亥姆霍兹线圈的中心线相互垂直,其中一对亥姆霍兹线圈的中心线与探测激光的光束方向平行。

8. 一种基于激光原子磁力计的 NMR 的测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤 1、控制铯原子蒸气泡(7)温度升至 20–60℃,控制抽运激光器(2)的输出激光频率与碱金属铯原子 D1 线跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  共振,并控制探测激光器(1)的输出激光频率偏离该共振频率  $100\text{MHz} \sim 100\text{GHz}$ ,对抽运激光器(2)的电流进行调制,实现同步光抽运;

步骤 2、调整偏振棱镜(3)和四分之一波片(4)的角度,获得线偏振探测激光和圆偏振光;

步骤 3、调整偏振分束棱镜(8)的角度,直至光电探测器(9)输出的信号为零;

步骤 4、通过调整三组亥姆霍兹线圈(6)的电流,使得磁屏蔽套筒(5)内的残余磁场为

最小,得到三组亥姆霍兹线圈(6)的调整电流;

步骤 5、扫描三组亥姆霍兹线圈中的中心线与探测激光平行的一对亥姆霍兹线圈中的电流,从设定的负电流值到一个绝对值与设定的负电流值相等的正电流值,叠加在步骤 4 中所述的调整电流上,得到低通滤波器(12)输出的磁场鉴别信号;

步骤 6、重复步骤 2~ 步骤 5 直至单位磁场变化时,低通滤波器(12)输出电压响应的变化值最大,设定磁场线性范围中心的 B 值为偏置磁场;

步骤 7、取适量液体样品倒入样品管(17),放入气缸(18)中;

步骤 8、上位机(13)通过继电器(16)控制电磁阀(15),进而控制空气压缩机(14)吹入到气缸(18)中的方向,使得样品管(17)浮起到环形预极化磁体(19)的内部中心;

步骤 9、保持样品管(17)悬浮设定时间,使其充分预极化,上位机(13)通过继电器(16)控制电磁阀(15),进而改变空气压缩机(14)吹入到气缸(18)中的方向,使样品管(17)向下穿过导引线圈(20),到达铯原子蒸气泡(7)的上方;

步骤 10、控制小角度脉冲线圈(21)中的电流,产生直流或交流脉冲,改变样品磁矩方向;

步骤 11、样品磁矩与偏置磁场的方向存在 5~15 度的小夹角,样品磁矩在物理上受到一个力矩的作用而绕偏置磁场作进动,对磁场施加扰动,获得时间域的 NMR 信号;

步骤 12、通过时间域的 NMR 信号获得频率域的 NMR 谱信号。

## 一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR)波谱领域,更具体涉及一种基于激光原子磁力计的NMR装置,还涉及一种基于激光原子磁力计的NMR的测量方法,适用于在 $100\text{uT} \sim 1\text{nT}$  ( $1\text{uT}=10^{-6}\text{T}$ ,  $1\text{nT}=10^{-9}\text{T}$ ) 磁场下检测 NMR 信号。

### 背景技术

[0002] NMR 是一种用来获得有关原子和原子所组成的分子结构与动力学信息的技术。NMR 对原子核起作用,而且仅对具有不为零自旋的原子核起作用,这些不为零的核自旋就像一个个具有南北极的小磁铁一样,具有磁矩,从而能被用于 NMR 研究。

[0003] 当这些磁矩处于外部静磁场中时,由于磁矩与外静磁场存在夹角,因为发生进动,当用射频磁场照射原子核,原子核吸收射频能量,并发射出与进动速率对应的射频信号,该射频信号能够反应原子核的特征信息。原子核处于一定的环境中,这些环境与原子核发生不同程度的相互作用,反映在发射出来的射频信号上,会导致其在以射频振荡的同时有衰减现象,通过研究该衰减行为,可以获得原子核周围的空间结构和动态行为信息。

[0004] 在 NMR 波谱中,改变射频磁场的频率,测量原子核对不同频率射频磁场的吸收和发射强度,可以获得共振谱,这种 NMR 波谱能够揭示材料的元素成分与含量,与相关理论结合,甚至可获得各元素原子的结构和运动信息。

[0005] NMR 发明于 20 世纪 50 年代前后,在其几十年的发展历史中,为获得更高的 NMR 波谱分辨率,磁场强度及射频场频率一直在增加,从最初 10MHz 量级的拉莫尔(Larmor)频率,到目前的 900MHz,甚至有厂家在研制 GHz 射频场的 NMR 谱仪。

[0006] 虽然高场 NMR 具有高分辨率,但从实际应用来看,高场强和高 RF 频率,在一些应用上受到限制。随着磁场的提高,样品磁导率分布的不均匀性会加剧,从而使信号增宽,尤其是包含铁钴镍等铁磁性元素的样品,通常是无法使用 NMR 技术来分析的。另一个常见问题是磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)中的磁化率伪影。当不同种类样品或同类具有较高磁化率梯度的样品处于磁场中时,不同磁化率的样品成分会产生寄生梯度磁场。当这些寄生梯度场与用于编码的梯度场相当时, MRI 的图像严重扭曲。在医学成像中,金属补牙或珠宝饰物的存在可以破坏 MRI;身体内部固体 - 液体和固体 - 空气界面处磁化率的跳变,产生细微的变形。

[0007] 从科学研究来讲,通常化学样品和生物组织的真实环境是地磁场(40~50uT),为尽可能获取分子样品和人体组织在实际环境下的结构与动力学信息,需要用在低场(地磁场及以下)条件下进行 NMR 和 MRI 的原位研究;然而,传统 RF 线圈探测技术因其在低场下的低灵敏度,在进行此类研究时存在一定的局限性。

[0008] 虽然基于超导量子干涉器件(Superconducting quantum interference device, SQUID)的磁力计,也可在低场下实现很高的磁场探测灵敏度,并应用于低场 NMR 研究,但是它与 NMR 谱仪一样,要工作在超导所需的低温环境,在应用方面依然有所局限。

[0009] 综上所述,虽然 NMR 作为一种强大的核自旋分析技术在各领域获得了广泛应用,

但目前 NMR 技术所用 RF (Radio Frequency) 线圈在低场下的探测灵敏度较差, 仍不能满足一些应用的要求。

[0010] 因此, 我们需要一些低场下的高灵敏度 NMR 仪器和技术。近年来发展出了几种低场 NMR 仪器, 这些技术弥补了传统 NMR 在低场下的低灵敏度缺陷。I. M. Savukov 等人在“NMR Detection with an Atomic Magnetometer”(Phys. Rev. Lett. 94, 123001 (2005)) 中用激光原子磁力计进行 NMR 检测, 该激光原子磁力计使用处于 180°C 的钾(K) 原子作为工作介质, 在直流到几百 Hz 的频段上具有  $20\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$  的灵敏度, 以信噪比(Signal to noise ratio, SNR) 为 10 的单次采样测得水的 NMR 信号。V. V. Yashchuk 等人在“Hyperpolarized Xenon Nuclear Spins Detected by Optical Atomic Magnetometry”(Phys. Rev. Lett. 93, 160801 (2004)) 中用原子磁力计测量了超极化 Xe 原子的  $T_1$  常数。M. P. Ledbetter 等人在“Optical detection of NMR J-spectra at zero magnetic field”中用激光原子磁力计测量了乙醇的 C-H J 耦合谱(NMR 谱的一种, 可用于确定化学分子中的结构), 而且该测量在零磁场下进行。

[0011] 激光原子磁力计基于原子与激光相互作用发生的一种被称为非线性磁光旋转(Nonlinear magneto-optical rotation, NMOR) 的量子力学现象。由于该现象产生的 NMOR 信号具有极窄的线宽, 且对磁场敏感, 因此天然具有高灵敏度的磁场检测能力, 另外, 即使在如  $100\mu\text{T} \sim 1\text{nT}$  量级甚至更低的极弱磁场下, 该灵敏度也不会变差。

[0012] 上述利用激光原子磁力计检测 NMR 信号的方法, 还有一定的缺陷, 比如激光原子磁力计的探头是一个工作于  $170 \sim 210^\circ\text{C}$  左右的原子蒸气泡, 其温度过高, 对 NMR 样品有谱线加宽的影响, 本发明将针对此问题, 提出一种新的方法。

## 发明内容

[0013] 本发明的目的是在于针对现有技术存在的上述问题, 提供一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置, 还提供一种基于激光原子磁力计的 NMR 的测量方法, 从而解决低场下现存射频线圈方法灵敏度不足的困难, 并解决新出现的原子蒸气泡温度过高的问题。

[0014] 为了实现上述目的, 本发明采用以下技术方案:

一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置, 包括铯原子蒸气泡, 包括套设在铯原子蒸气泡上的磁屏蔽套筒、设置在磁屏蔽套筒内的三组亥姆霍兹线圈、用于极化铯原子蒸气泡内铯原子的激光极化装置、用于向铯原子蒸气泡发射探测激光的激光发射装置、用于检测穿过铯原子蒸气泡的探测激光的 NMR 信号检测装置和用于对被测样品进行预极化并可将预极化后的样品放置到铯原子蒸气泡上方的气动进样装置。

[0015] 如上所述的激光极化装置包括抽运激光器和用于将抽运激光器发出的激光转换为圆偏振光后传送到铯原子蒸气泡的四分之一波片。

[0016] 如上所述的激光发射装置包括探测激光器和用于将探测激光器发出的激光转换成线偏振探测激光后传送到铯原子蒸气泡的偏振棱镜。

[0017] 如上所述的 NMR 信号检测装置包括用于对穿过铯原子蒸气泡的线偏振探测激光进行分束的偏振分束棱镜、用于检测分束后的线偏振探测激光并将检测信号发送到乘法器的光电探测器、用于调整抽运激光器的输出频率并输出方波同步信号到乘法器的信号发生器、用于对检测信号及方波同步信号进行乘法运算的乘法器和用于对乘法器的输出进行滤

波并传送到上位机的低通滤波器。

[0018] 如上所述的气动进样装置包括气缸、设置在气缸内且一端设置有与气缸内壁贴合的活塞的样品管、套设在气缸一端的环形预极化磁体和用于控制样品管在气缸内往复运动的驱动装置，所述的磁屏蔽套筒上开设有通孔，气缸一端穿过通孔设置在铯原子蒸气泡上方。

[0019] 如上所述的气缸一端套设有导引线圈，另一端套设有小角度脉冲线圈，所述的驱动装置包括提供气压源的空气压缩机和用于切换空气压缩机输入到气缸的气流方向的电磁阀。

[0020] 如上所述的三组亥姆霍兹线圈包括三对环形的亥姆霍兹线圈，每对亥姆霍兹线圈的中心线重合，三对亥姆霍兹线圈的中心线相互垂直，其中一对亥姆霍兹线圈的中心线与探测激光的光束方向平行。

[0021] 一种基于激光原子磁力计的 NMR 的测量方法，包括以下步骤：

步骤 1、控制铯原子蒸气泡温度升至 20~60℃，控制抽运激光器的输出激光频率与碱金属铯原子 D1 线跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  共振，并控制探测激光器的输出激光频率偏离该共振频率 100MHz~100GHz，对抽运激光器的电流进行调制，实现同步光抽运；

步骤 2、调整偏振棱镜和四分之一波片的角度，获得线偏振探测激光和圆偏振光；

步骤 3、调整偏振分束棱镜的角度，直至光电探测器输出的信号为零；

步骤 4、通过调整三组亥姆霍兹线圈的电流，使得磁屏蔽套筒内的残余磁场为最小，得到三组亥姆霍兹线圈的调整电流；

步骤 5、扫描三组亥姆霍兹线圈中的中心线与探测激光平行的一对亥姆霍兹线圈中的电流，从设定的负电流值到一个绝对值与设定的负电流值相等的正电流值，叠加在步骤 4 中所述的调整电流上，得到低通滤波器输出的磁场鉴别信号；

步骤 6、重复步骤 2~ 步骤 5 直至单位磁场变化时，低通滤波器输出电压响应的变化值最大，设定磁场线性范围中心的 B 值为偏置磁场；

步骤 7、取适量液体样品倒入样品管，放入气缸中；

步骤 8、上位机通过继电器控制电磁阀，进而控制空气压缩机吹入到气缸中的方向，使得样品管浮起到环形预极化磁体的内部中心；

步骤 9、保持样品管悬浮设定时间，使其充分预极化，上位机通过继电器控制电磁阀，进而改变空气压缩机吹入到气缸中的方向，使样品管向下穿过导引线圈，到达铯原子蒸气泡的上方；

步骤 10、控制小角度脉冲线圈中的电流，产生直流或交流脉冲，改变样品磁矩方向；

步骤 11、样品磁矩与偏置磁场的方向存在 5~15 度的小夹角，样品磁矩在物理上受到一个力矩的作用而绕偏置磁场作进动，对磁场施加扰动，获得时间域的 NMR 信号；

步骤 12、通过时间域的 NMR 信号获得频率域的 NMR 谱信号。

[0022] 本发明与现有技术相比，具有以下优点和效果：

1、在低磁场下，与现有的线圈探测技术相比，具有更高的探测灵敏度；

2、与现有低场利用 SQUID 探测 NMR 技术相比，不需要低温制冷，节约运行成本；

3、与现有的基于原子磁力计的 NMR 探测装置相比，具有更低的工作温度。

## 附图说明

- [0023] 图 1 是本发明的总体结构示意图；  
图 2 是本发明的高灵敏度激光原子磁力检测部分的原理示意图；  
图 3 是本发明的预极化与气动进样部分的原理示意图。
- [0024] 图中 :1- 探测激光器 ;2- 抽运激光器 ;3- 偏振棱镜 ;4- 四分之一波片 ;5- 磁屏蔽套筒 ;6- 三组亥姆霍兹线圈 ;7- 铷原子蒸气泡 ;8- 偏振分束棱镜 ;9- 光电探测器 ;10- 乘法器 ;11- 信号发生器 ;12- 低通滤波器 ;13- 上位机 ;14- 空气压缩机 ;15- 电磁阀 ;16- 继电器 ;17- 样品管 ;18- 气缸 ;19- 环形预极化磁体 ;20- 导引线圈 ;21- 小角度脉冲线圈 ;a- 样品预极化与气动进样装置 ;b- 激光原子磁力计装置。

## 具体实施方式

- [0025] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述：

实施例：

一种基于激光原子磁力计的 NMR 装置，包括铯原子蒸气泡 7，包括套设在铯原子蒸气泡 7 上的磁屏蔽套筒 5、设置在磁屏蔽套筒 5 内的三组亥姆霍兹线圈 6、用于极化铯原子蒸气泡 7 内铯原子的激光极化装置、用于向铯原子蒸气泡 7 发射探测激光的激光发射装置、用于检测穿过铯原子蒸气泡 7 的探测激光的 NMR 信号检测装置和用于对被测样品进行预极化并可将预极化后的样品放置到铯原子蒸气泡 7 上方的气动进样装置。

[0026] 激光极化装置包括抽运激光器 2 和用于将抽运激光器 2 发出的激光转换为圆偏振光后传送到铯原子蒸气泡 7 的四分之一波片 4。

[0027] 激光发射装置包括探测激光器 1 和用于将探测激光器 1 发出的激光转换成线偏振探测激光后传送到铯原子蒸气泡 7 的偏振棱镜 3。

[0028] NMR 信号检测装置包括用于对穿过铯原子蒸气泡 7 的线偏振探测激光进行分束的偏振分束棱镜 8、用于检测分束后的线偏振探测激光并将检测信号发送到乘法器 10 的光电探测器 9、用于调整抽运激光器 2 的输出频率并输出方波同步信号到乘法器 10 的信号发生器 11、用于对检测信号及方波同步信号进行乘法运算的乘法器 10 和用于对乘法器 10 的输出进行滤波并传送到上位机 13 的低通滤波器 12。

[0029] 气动进样装置包括气缸 18、设置在气缸 18 内且一端设置有与气缸 18 内壁贴合的活塞的样品管 17、套设在气缸 18 一端的环形预极化磁体 19 和用于控制样品管 17 在气缸 18 内往复运动的驱动装置，所述的磁屏蔽套筒 5 上开设有通孔，气缸 18 一端穿过通孔设置在铯原子蒸气泡 7 上方。

[0030] 气缸 18 一端套设有导引线圈 20，另一端套设有小角度脉冲线圈 21，所述的驱动装置包括提供气压源的空气压缩机 14 和用于切换空气压缩机 14 输入到气缸 18 的气流方向的电磁阀 15。

[0031] 三组亥姆霍兹线圈 6 包括三对环形的亥姆霍兹线圈，每对亥姆霍兹线圈的中心线重合，三对亥姆霍兹线圈的中心线相互垂直，其中一对亥姆霍兹线圈的中心线与探测激光的光束方向平行。

[0032] 一种基于激光原子磁力计的 NMR 的测量方法，包括以下步骤：

步骤 1、控制铯原子蒸气泡 7 温度升至 20-60℃，控制抽运激光器 2 的输出激光频率与

碱金属铯原子D1线跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  共振，并控制探测激光器1的输出激光频率偏离该共振频率  $100\text{MHz} \sim 100\text{GHz}$ ，对抽运激光器2的电流进行调制，实现同步光抽运；

步骤2、调整偏振棱镜3和四分之一波片4的角度，获得线偏振探测激光和圆偏振光；

步骤3、调整偏振分束棱镜8的角度，直至光电探测器9输出的信号为零；

步骤4、通过调整三组亥姆霍兹线圈6的电流，使得磁屏蔽套筒5内的残余磁场为最小，得到三组亥姆霍兹线圈6的调整电流；

步骤5、扫描三组亥姆霍兹线圈中的中心线与探测激光平行的一对亥姆霍兹线圈中的电流，从设定的负电流值到一个绝对值与设定的负电流值相等的正电流值，叠加在步骤4中所述的调整电流上，得到低通滤波器12输出的磁场鉴别信号；

步骤6、重复步骤2~步骤5直至单位磁场变化时，低通滤波器12输出电压响应的变化值最大，设定磁场线性范围中心的B值为偏置磁场；

步骤7、取适量液体样品倒入样品管17，放入气缸18中；

步骤8、上位机13通过继电器16控制电磁阀15，进而控制空气压缩机14吹入到气缸18中的方向，使得样品管17浮起到环形预极化磁体19的内部中心；

步骤9、保持样品管17悬浮设定时间，使其充分预极化，上位机13通过继电器16控制电磁阀15，进而改变空气压缩机14吹入到气缸18中的方向，使样品管17向下穿过导引线圈20，到达铯原子蒸气泡7的上方；

步骤10、控制小角度脉冲线圈21中的电流，产生直流或交流脉冲，改变样品磁矩方向；

步骤11、样品磁矩与偏置磁场的方向存在  $5 \sim 15$  度的小夹角，样品磁矩在物理上受到一个力矩的作用而绕偏置磁场作进动，对磁场施加扰动，获得时间域的NMR信号；

步骤12、通过时间域的NMR信号获得频率域的NMR谱信号。

[0033] 本发明是一种通过在特斯拉磁场中预极化，使用激光原子磁力计检测，在纳特斯拉磁场中获得液体NMR谱，从而检测NMR信号的方法和装置。由于激光原子磁力计的灵敏度和频率无关，通过在极低的磁场中检测NMR，能同时增加SNR和谱的分辨率，即使对于非常不均匀的磁场，NMR谱线也足够窄。

[0034] 本发明工作于超低磁场中进行检测，通常约为  $100\mu\text{T} \sim 1\text{nT}$ ，并且使用  $0.1\text{T}$  到  $2\text{T}$  的磁场进行预极化，样品体积很小，从  $1\text{cm}^3$  量级到  $1\text{mm}^3$  量级。检测装置可设计成一种微型激光原子磁力计，是检测探头可以非常靠近室温下的样品。

[0035] 激光原子磁力计使用铯原子作为探头气泡工作介质，它工作于室温附近( $20 \sim 60^\circ\text{C}$ )，由于探头和被检测样品在空间上有距离，因此对化学或生物样品的影响非常小，可忽略不计。因此，样品可与激光原子磁力计探头靠得非常近，一般激光原子磁力计的探头可做到  $1\text{cm}$  大小，样品与探头距离可到  $1\text{cm}$ ，若利用微加工技术将作为探头的原子蒸气泡做到  $1\text{mm}$  大小，则该距离也可缩小到  $1\text{mm}$ ，将提高样品磁场与激光原子磁力计探头的耦合效果，提高NMR信号的检测灵敏度。同时，激光原子磁力计的灵敏度与待检测信号的频率无关，可以在拉莫尔频率为几Hz到几百Hz时将其检测出来。与该量级拉莫尔频率对应的磁场只在  $1\text{mT}$  水平，即使该磁场的相对均匀性(如  $1\% \sim 1\%$ )远低于传统NMR超导磁体的均匀性( $10^{-8} \sim 10^{-6}$ )，所获取的NMR信号线宽也非常之窄，接近原子核自旋共振的本征线宽。在低场中原子核的化学位移信息将不能展现出来，只有与磁场无关的标量耦合(如J耦合等)信息留下来，这些信息可以提供共价键的特征参数。总之，本发明可实现一种简单的利用激光

原子磁力计的“键检测器”，在  $100\mu\text{T}$  至  $1\text{nT}$  的磁场中产生有关异核标量耦合的精确信息。

[0036] 与背景内容部分提出的已有相关方案不同，本发明使用一种新的工作介质，利用其物理特性，将激光原子磁力计的探头工作温度大大降低，到室温附近，从而消除对待检测 NMR 样品的谱线加宽效应，另外该工作温度与人体温度接近，可望用于活体生物应用，如人体表面或器官成像等。

[0037] 本发明包括了两大部分：一个是基于激光与碱金属铯(Cs)原子相互作用发生的非线性磁光旋转(Nonlinear magnetic-optical rotation, NMOR)现象制作而成的高灵敏度的激光原子磁力计装置部分，一个是样品的预极化与气动进样装置；下面分别对这两个装置进行操作步骤的说明。

[0038] 本发明装置由探测激光器 1 和抽运激光器 2、偏振棱镜 3 和四分之一波片 4、磁屏蔽套筒 5 和三组亥姆霍兹线圈 6、铯原子蒸气泡 7、偏振分束棱镜 8 和光电探测器 9、乘法器 10 和信号发生器 11、低通滤波器 12 和上位机 13、空气压缩机 14、电磁阀 15 和继电器 16、样品管 17 和气缸 18、环形预极化磁体(钕铁硼永磁体) 19、导引线圈 20 和小角度脉冲线圈 21 组成。抽运激光器 2 通过四分之一波片 4 之后，与铯原子蒸气泡 7 中的原子作用将其极化，信号发生器 11 输出正弦波信号到抽运激光器 2，调制其输出频率；磁屏蔽套筒 5 以铯原子蒸气泡 7 为中心将其包裹，提供  $1\text{nT}$  水平的剩余磁场，三组亥姆霍兹线圈 6 与由干电池加电阻组成的电流源相连，产生磁场补偿磁屏蔽的剩余磁场；探测激光器 1 产生激光通过偏振棱镜 3 之后进入铯原子蒸气泡 7 与之作用，穿过蒸气泡的透射光到达偏振分束棱镜 8，被分束后照射到光电探测器 9 上面，经光电效应产生输出电流流入到乘法器 10，与来自信号发生器 11 的同步信号进行乘法运算，输出到低通滤波器 12，产生所要的信号被上位机 13 记录。样品预极化与气动进样装置与激光原子磁力计装置保持电气隔离，但样品管可经由气动进样装置到达铯原子蒸气泡 7 的上方，样品预极化产生的磁矩拉莫尔进动信号被激光原子磁力计感应被探测到。气动进样装置连接方式如下所述：空气压缩机 14 输出气流到电磁阀 15，上位机 13 控制继电器 16 与电磁阀 15 连接并使其切换不同的工作状态，从而使气流在五位二通电磁阀内的流向切换；从电磁阀出来的气流经气管到达气缸 18，气流推动样品管 17 在气缸内上下运动，气缸上方有一个环形预极化磁体(钕铁硼永磁体) 19，样品被其预极化后在气流推动下向下运动达到铯原子蒸气泡 7 的上方约  $1\text{cm}$ ，其磁矩进动信号被探测。

[0039] 图 1 中 a 为样品预极化与气动进样装置，b 为激光原子磁力计装置；a 中的气缸(图 3 中的 18)由两个长约  $1\text{m}$  的有机玻璃管组成，其中外管直径约  $20\text{mm}$ ，内管直径约  $15\text{mm}$ ，厚度很薄，忽略不计。在激光原子磁力计装置 b 的磁屏蔽套筒(图 2 中的 5)壁上打外径  $20\text{mm}$  的孔，使气动进样装置的气缸可以穿过该孔，底端可以与激光原子磁力计的探头 7 相邻，约  $10\text{mm}$ ，这样可以使激光原子磁力计探头与样品磁场充分相互作用，使得填充因子最大，也即使激光原子磁力计探测 NMR 信号的整体灵敏度最高。

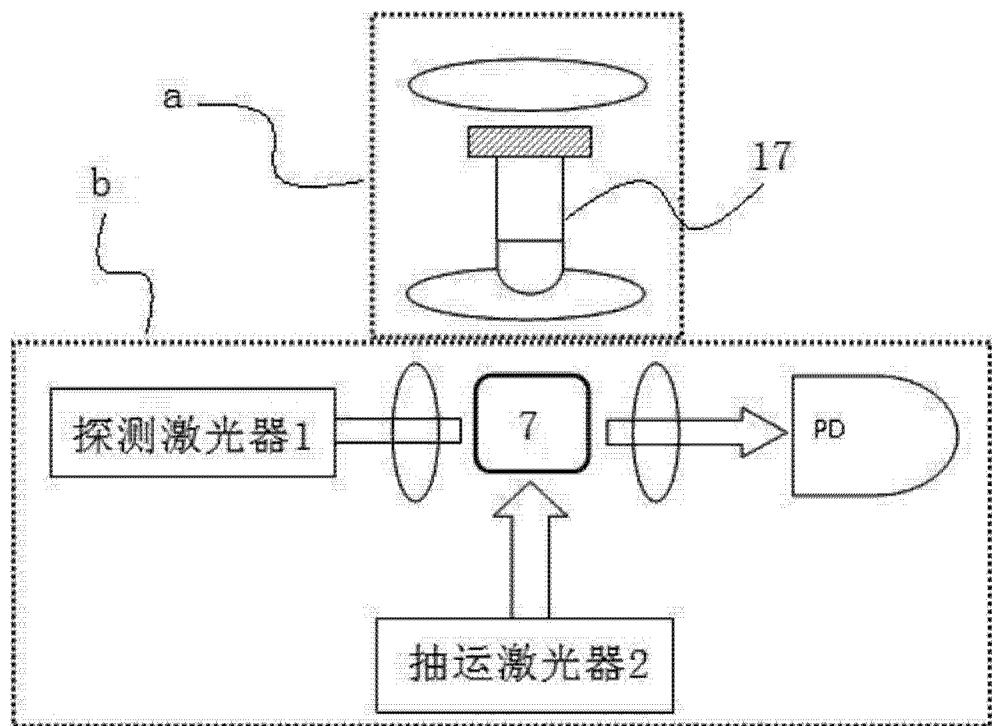


图 1

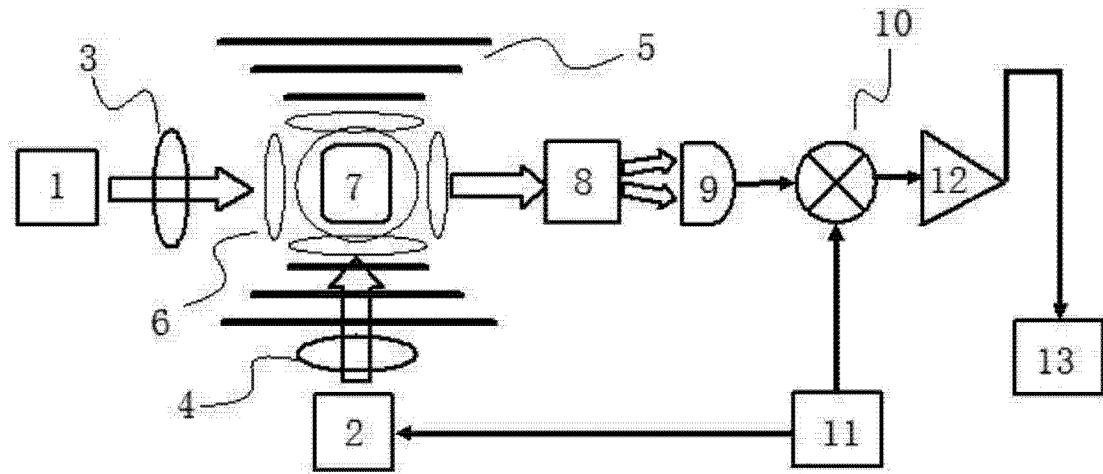


图 2

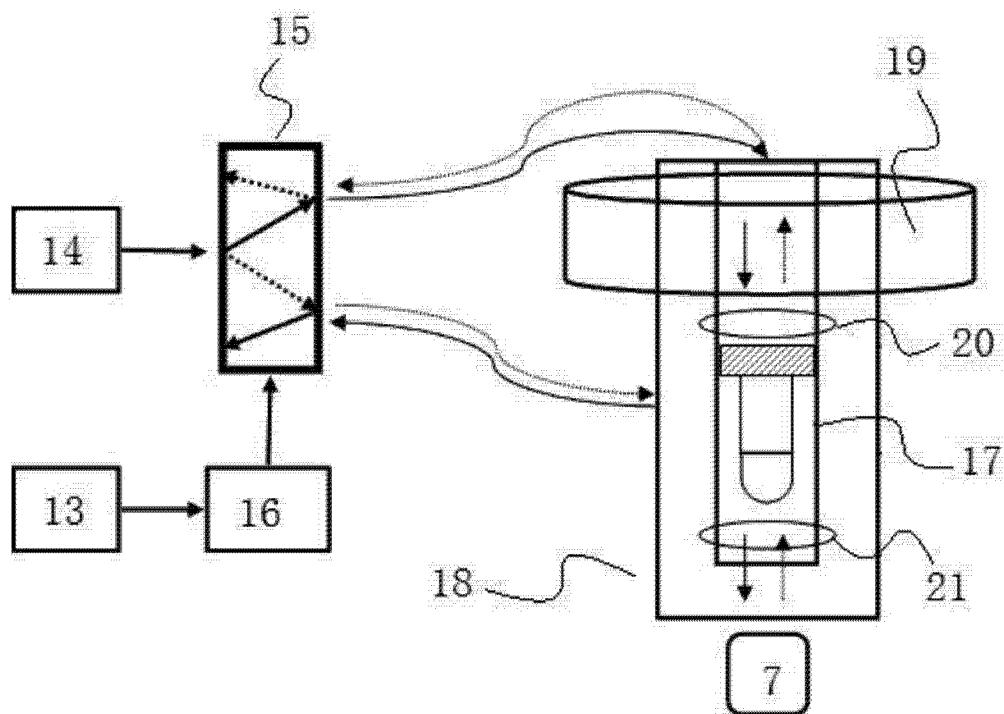


图 3