



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116625946 A

(43) 申请公布日 2023. 08. 22

(21) 申请号 202310622753.5

(22) 申请日 2023.05.29

(71) 申请人 电子科技大学

地址 610000 四川省成都市高新区(西区)
西源大道2006号

(72) 发明人 王成 沈芳

(74) 专利代理机构 泰和泰律师事务所 51219

专利代理师 李正

(51) Int. Cl.

G01N 21/01 (2006.01)

G01N 21/25 (2006.01)

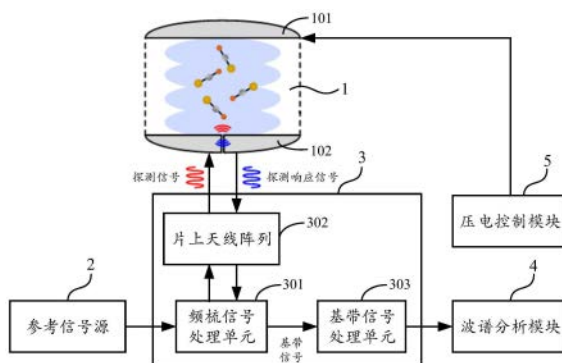
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器

(57) 摘要

本发明公开了一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,通过结合CMOS频率梳波谱芯片和FP腔体,能够进行并行化的FP腔体谐振模式激励和傅里叶变换波谱检测,可实现波谱检测速度一个数量级的提升;而且,具有多普勒受限检测模式和压强展宽检测模式两种工作模式,能够实现低气体压强($= < 10^2 \text{Pa}$)的精细谱线识别和高气体压强($10^2 \sim 10^5 \text{Pa}$)下的大带宽谱线搜寻,从而拓展了波谱检测动态范围。



1. 一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,包括:FP腔体、参考信号源、CMOS频率梳波谱芯片以及波谱分析模块;其中,

所述CMOS频率梳波谱芯片包括:频梳信号处理单元、片上天线阵列以及基带信号处理单元;

而且,所述频梳信号处理单元用于根据所述参考信号源提供的参考信号,生成频梳信号,并对生成的一路频梳信号加载调制信号而得到探测信号;所述片上天线阵列用于将所述探测信号辐射至所述FP腔体中,并接收所述探测信号与所述FP腔体中的极性气体分子作用后所得到的探测响应信号;所述频梳信号处理单元用于将生成的一路频梳信号与所述探测响应信号解调而得到基带信号;所述基带信号处理单元用于对所述基带信号进行信号放大和傅里叶变换,得到基带处理信号;所述波谱分析模块用于根据所述基带处理信号,得到波谱探测结果。

2. 如权利要求1所述的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,所述频梳信号处理单元用于对所述参考信号源提供的参考信号进行倍频及上混频或下混频,生成所述频梳信号;而且,所述频梳信号表达式为: $f_0 = N * f_{ref} \pm P * f_D$;其中,N为倍频数,P在零至频梳齿数之间变化, f_D 为频梳两齿频率间距, f_0 的最大值与最小值的频率范围决定可测量的频率范围。

3. 如权利要求2所述的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,所述FP腔体的上下表面均为由压电驱动器驱动的可调反射面;而且,压电驱动器受控于压电控制模块,以实现与所述FP腔体谐振峰的调谐;所述CMOS频率梳波谱芯片安装在所述FP腔体的下表面。

4. 如权利要求3所述的一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,所述FP腔体的上表面与下表面之间的间距为频梳信号提供的激励脉冲半波长的整数倍,以实现频梳信号提供的激励脉冲电场增强。

5. 如权利要求4所述的一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,所述FP腔体的品质因子典型值为 $10^2 \sim 10^5$ 。

6. 如权利要求2~5任一项所述的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,在气体工作压强为小于或等于 10^2 Pa且旋转谱线线宽低于FP腔谐振峰半高宽时,所述频梳信号处理单元通过片上频率源调整所述频梳信号的频率,所述FP腔体通过所述压电控制模块调整FP腔谐振频率,使得频梳信号和FP腔同时进行频率步进扫描,且频梳两齿频率间距等于FP腔谐振峰的频率间距的整数倍;

当频梳信号提供的激励脉冲和FP腔谐振峰与分子谱线重叠时,受激的分子产生相干自发辐射;所述基带信号处理单元被配置为用于提取所述基带信号对应的频率色散曲线,以得到所述基带处理信号;所述波谱分析模块用于根据所述基带信号对应的频率色散曲线,得到波谱探测结果。

7. 如权利要求6所述的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,在气体工作压强为 10^2 Pa~ 10^5 Pa且压强展宽谱线高于FP腔谐振峰半高宽时,所述基带信号处理单元被配置为用于检测所述基带信号在不同频率下的接收功率或用于检测所述基带信号接收功率的时域衰减,以得到所述基带处理信号;

所述波谱分析模块用于根据所述基带信号在不同频率下的接收功率或接收功率的时

域衰减,确定谱线吸收带来的FP腔谐振峰品质因子的变化,以测量谱线吸收率,进而得到波谱探测结果。

8.如权利要求1所述的一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其特征在于,所述参考信号源为高频锁相环电路。

一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器

技术领域

[0001] 本发明涉及微电子技术领域,特别涉及一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器。

背景技术

[0002] 腔体傅里叶变换旋转波谱(Cavity Fourier-transform rotational spectroscopy,Cavity-FTRS)一方面依靠高Q值Fabry-Perot腔体的谐振模式极大增加了波谱探测的有效光学路径,因而实现了旋转波谱探测的小型化;另一方面,通过对气体分子样品进行脉冲激励和相干自发辐射傅里叶分析,降低了唐氏噪声的影响,实现了探测灵敏度的提升;因而,腔体傅里叶变换旋转波谱Cavity-FTRS仍然是目前具备最高分辨率和灵敏度的旋转波谱探测技术,也最符合机器嗅觉传感器的小型化要求。

[0003] 不过,腔体傅里叶变换旋转波谱Cavity-FTRS仍面临着两大难题:其一,虽然高Q值FP腔体提升了光学路径长度,但其机械扫描严重限制了检测速度;其二,为了避免压强展宽(由分子间碰撞导致),旋转谱线只能在 $<10^2$ Pa气体压强下进行测量,依赖真空系统,限制进一步小型化的可能性。

发明内容

[0004] 本发明实施例提供了一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,通过结合CMOS频率梳波谱芯片和FP腔体(Fabry-Perot腔体),能够在较大的压强范围内实现快速并行波谱检测,可对数百种气体分子组成的复杂组分气体进行精确无模糊分辨,达到ppb级灵敏度。

[0005] 本发明提供的一种CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,其包括:FP腔体、参考信号源、CMOS频率梳波谱芯片以及波谱分析模块;其中,

[0006] 所述CMOS频率梳波谱芯片包括:频梳信号处理单元、片上天线阵列以及基带信号处理单元;

[0007] 而且,所述频梳信号处理单元用于根据所述参考信号源提供的参考信号,生成频梳信号,并对生成的一路频梳信号加载调制信号而得到探测信号;所述片上天线阵列用于将所述探测信号辐射至所述FP腔体中,并接收所述探测信号与所述FP腔体中的极性气体分子作用后所得到的探测响应信号;所述频梳信号处理单元用于将生成的一路频梳信号与所述探测响应信号解调而得到基带信号;所述基带信号处理单元用于对所述基带信号进行信号放大和傅里叶变换,得到基带处理信号;所述波谱分析模块用于根据所述基带处理信号,得到波谱探测结果。

[0008] 在一种具体的实施方式中,所述频梳信号处理单元用于对所述参考信号源提供的参考信号进行倍频及上混频或下混频,得到所述频梳信号;而且,所述频梳信号表达式为: $f_0 = N * f_{ref} \pm P * f_D$;其中,N为倍频数,P在零至频梳齿数之间变化, f_D 为频梳两齿频率间距, f_0 的最大值与最小值的频率范围决定可测量的频率范围。

[0009] 在一种具体的实施方式中,所述FP腔体的上下表面均为由压电驱动器驱动的可调

反射面；而且，压电驱动器受控于压电控制模块，以实现与所述FP腔体谐振峰的调谐；所述CMOS频率梳波谱芯片安装在所述FP腔体的下表面。

[0010] 在一种具体的实施方式中，所述FP腔体的上表面与下表面之间的间距为频梳信号提供的激励脉冲半波长的整数倍，以实现频梳信号提供的激励脉冲电场增强。

[0011] 在一种具体的实施方式中，所述FP腔体的品质因子典型值为 $10^2 \sim 10^5$ 。

[0012] 在一种具体的实施方式中，在气体工作压强为小于或等于 10^2Pa 且旋转谱线线宽低于FP腔谐振峰半高宽时，所述频梳信号处理单元通过片上频率源调整所述频梳信号的频率，所述FP腔体通过所述压电控制模块调整FP腔谐振频率，使得频梳信号和FP腔同时进行频率步进扫描，且频梳两齿频率间距等于FP腔谐振峰的频率间距的整数倍；

[0013] 当频梳信号提供的激励脉冲和FP腔谐振峰与分子谱线重叠时，受激的分子产生相干自发辐射；所述基带信号处理单元被配置为用于提取所述基带信号对应的频率色散曲线，以得到所述基带处理信号；所述波谱分析模块用于根据所述基带信号对应的频率色散曲线，得到波谱探测结果。

[0014] 在一种具体的实施方式中，在气体工作压强为 $10^2 \text{Pa} \sim 10^5 \text{Pa}$ 且压强展宽谱线高于FP腔谐振峰半高宽时，所述基带信号处理单元被配置为用于检测所述基带信号在不同频率下的接收功率或用于检测所述基带信号接收功率的时域衰减，以得到所述基带处理信号；

[0015] 所述波谱分析模块用于所述基带信号在不同频率下的接收功率或接收功率的时域衰减，确定谱线吸收带来的FP腔谐振峰品质因子的变化，以测量谱线吸收率，进而得到波谱探测结果。

[0016] 在一种具体的实施方式中，所述参考信号源为高频锁相环电路。

[0017] 如此，本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器，通过结合CMOS频率梳波谱芯片和FP腔体，能够实现并行化的谐振模式激励和傅里叶变换波谱检测，使波谱检测速度产生一个数量级的提升；同时，由于采用高品质因子的FP腔体增加了有效光学路径长度，可实现气体检测灵敏度至ppb量级。

[0018] 同时，本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器具有多普勒受限检测模式和压强展宽检测模式两种工作模式，能够实现低气体压强(= $<10^2 \text{Pa}$)的精细谱线识别和高气体压强($10^2 \sim 10^5 \text{Pa}$)下的大带宽谱线搜寻，从而拓展了波谱检测动态范围。

附图说明：

[0019] 图1为本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器的结构示意图；

[0020] 图2为本发明实施例中提供的FP腔体与CMOS频率梳芯片装配结构示意图；

[0021] 图3为本发明实施例中提供的CMOS频率梳芯片内部信号链路的示意图；

[0022] 图4为本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器工作在多普勒受限检测模式的测试结果图；

[0023] 图5为本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器工作在压强展宽检测模式的测试结果图。

具体实施方式

[0024] 下面结合附图及具体实施例对本发明作进一步的详细描述。但不应将此理解为本发明上述主题的范围仅限于以下的实施例,凡基于本发明内容所实现的技术均属于本发明的范围。

[0025] 在本发明的一个实施例中,提供如图1所示的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器(Frequency comb Fourier-transform rotational spectroscopy,FC-FTRS),其包括:FP腔体1、参考信号源2、CMOS频率梳波谱芯片3以及波谱分析模块4;

[0026] 其中,所述CMOS频率梳波谱芯片3包括:频梳信号处理单元301、片上天线阵列302以及基带信号处理单元303;

[0027] 而且,所述频梳信号处理单元301用于根据所述参考信号源2提供的参考信号,生成频梳信号,并对生成的一路频梳信号加载调制信号而得到探测信号;所述片上天线阵列302用于将所述频梳处理单元301生成的所述探测信号辐射至所述FP腔体1中,并接收探测信号与FP腔体1中的极性气体分子作用后所得到的探测响应信号;所述频梳信号处理单元301还用于将生成的一路频梳信号与片上天线阵302列接收的探测响应信号解调,而得到基带信号;所述基带信号处理单元303用于对所述频梳信号处理单元301得到的所述基带信号进行信号放大和傅里叶变换,得到基带处理信号;所述波谱分析模块4用于根据所述基带信号处理单元303得到的所述基带处理信号,得到探测结果。

[0028] 在本实施例中,FP腔体1具有上表面101和下表面102,且上表面101和下表面102均为可调反射面;可通过对上表面101和下表面102的调节,能够实现FP腔体1谐振峰的调谐。参考信号源2为高频锁相环电路,能够提供高稳时间基准。

[0029] 具体的,如图2所示,CMOS频率梳波谱芯片3安装在所述FP腔体1的下表面102;而对上表面101和下表面102的调节是通过分别安装在上表面101和下表面102上压电驱动器103来实现的(图2中未示出安装在下表面102上的压电驱动器)。而为了实现对压电驱动器的控制,本发明的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器还包括压电控制模块5,分别安装在上表面101和下表面102上压电驱动器受控于压电控制模块5,以实现FP腔体谐振峰的调谐。

[0030] 进一步地,FP腔体1的上表面101与下表面102之间的间距为频梳信号提供的激励脉冲半波长的整数倍,以实现频梳信号提供的激励脉冲电场增强。同时,FP腔体的品质因子典型值为 $10^2 \sim 10^5$,而通过选择具有较高的品质因子的FP腔体,可增加了有效光学路径长度,实现气体检测灵敏度至ppb量级。

[0031] 在本实施例中,频梳信号处理单元301用于对参考信号源2提供的参考信号进行倍频及上混频或下混频,得到频梳信号;而且,所述频梳信号表达式为: $f_0 = N * f_{ref} \pm P * f_D$;其中,N为倍频数,P在零至频梳齿数之间变化, f_D 为频梳两齿频率间距, f_0 的最大值与最小值的频率范围决定可测量的频率范围, f_{ref} 为参考信号。

[0032] 如图3所示,在CMOS频率梳波谱芯片中,对参考信号源2提供的参考信号 f_{ref} 进行3倍频后,分别进入上变频链和下变频链,进而得到频梳齿数为10的频梳信号 $[f_0 - 5f_D, f_0 - 4f_D, f_0 - 3f_D, f_0 - 2f_D, f_0 - f_D, f_0, f_0 + f_D, f_0 + 2f_D, f_0 + 3f_D, f_0 + 4f_D]$;其中,CMOS频率梳波谱芯片提供的频率梳信号的梳齿数量可根据实际设计需求而定,一般频率梳信号的梳齿数量为10~20,因此能够通过并行化实现波谱扫描加速。

[0033] 在获取频梳信号后,将一路频梳信号加载调制信号 f_m (图3中未示出对频梳信号的

调制过程),然后通过对应的片上天线将探测信号辐射至FP腔体中。由于上变频链和下变频链采用级联频率变换链路,能够实现片上天线阵列中各个片上天线的频率同步,通过调谐参考信号 f_{ref} 和频率间隔 f_D 实现频梳中心频率和频率间隔的调谐;而片上天线接收到探测信号与FP腔体1中的极性气体分子作用后产生的探测响应信号,将一路所述频梳信号与片上天线接收的探测响应信号解调,得到基带信号 $[BB_{-5}, BB_{-4}, BB_{-3}, BB_{-2}, BB_0, BB_1, BB_2, BB_3, BB_4]$;获取到基带信号后,对基带信号进行信号放大和傅里叶变换,得到基带处理信号(图3中未示出对基带信号的处理过程),最后,将基带处理信号输出给波谱分析模块。

[0034] 在实施时,为了减小探测信号和探测响应信号的相互影响,片上天线阵列连接有环行器,以使其向所述FP腔体辐射的探测信号与其接收的探测响应信号相隔离。

[0035] 为提升压强适应范围,降低对真空系统的依赖,本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器具有两种工作模式:多普勒受限检测模式和压强展宽检测模式。

[0036] 多普勒受限检测模式:气体工作压强为小于或等于 10^2 Pa,主要针对复杂组分气体进行精确波谱分辨,其原理如图4所示,本实施例中,FP腔体的上表面与下表面之间的间距为150mm,因此谐振模式的频率间隔约为1GHz;FP腔体的品质因子为 $10^3 \sim 10^4$,其谐振峰的半高宽预计为40MHz~60MHz。

[0037] 在该模式下,旋转谱线线宽(约1MHz,如图4a所示)远低于FP腔谐振峰半高宽(40~60MHz,如图4b所示),且CMOS频率梳的频率间隔等于FP腔谐振峰的频率间隔的整数倍(如图4c所示),同时CMOS频率梳波谱芯片以脉冲模式工作,脉冲持续时间为TP,如图4d所示。因此,需要FP腔体和CMOS频率梳波谱芯片的精确异步调谐以实现全波段频率扫描;具体的,通过调谐参考信号 f_{ref} 和频率间隔 f_D 实现频梳中心频率和频率间隔的调谐,即频梳信号处理单元301通过片上频率源调整频梳信号的频率,FP腔体1通过所述压电控制模块5调整FP腔谐振频率,使得频梳信号和FP腔同时进行频率步进扫描,且频梳两齿频率间距等于FP腔谐振峰的频率间距的整数倍。

[0038] 而当频梳信号提供的激励脉冲和FP腔谐振峰与分子谱线重叠时,受激的分子产生相干自发辐射;此时,将基带信号处理单元303配置为用于提取基带信号对应的频率色散曲线,以得到对应的基带处理信号;波谱分析模块根据对应的基带处理信号,即基带信号对应的频率色散曲线,得到波谱探测结果。

[0039] 因此,当FP腔谐振峰,激励脉冲与分子谱线重叠,可以产生相干自发辐射,本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器通过对持续时间TR内的相干自发辐射进行傅里叶变换检测,实现高精度波谱分辨。图4e展示了实测中典型的FP腔体的90-102GHz谐振模式和品质因子Q值,图4f展示了75~110GHz范围内较宽的FP腔体谐振模式和多普勒受限的窄旋转谱线叠加得到的频谱(值得指出的是,该FP谐振腔Q值较低,主要是测量系统加载导致的)。

[0040] 压强展宽检测模式:气体工作压强为 $10^2 \sim 10^5$ Pa,主要针对接近大气压下痕量气体的检测,具有高灵敏度的特点,但是损失了分辨力,其原理如图5所示。压强展宽谱线检测模式可以和多普勒受限检测模式联合使用,分别服务于快速宽带搜索和窄带细部精确谱线识别。图5a中,由于气体压强逼近大气压,更频繁的分子间碰撞导致谱线展宽,独立的精细旋转谱线融合成高吸收强度,但线宽较宽的压强展宽谱线(线宽100MHz~10GHz)高于FP腔谐

振峰半高宽,因此难以实现多普勒受限波谱中的相干自发辐射,此时较强的谱线吸收将影响FP腔谐振峰的Q值,如以下公式所示:

$$[0041] \quad \alpha \propto \frac{2\pi}{c}(f_{FWHM1} - f_{FWHM0})$$

[0042] 其中 α 为谱线吸收系数, c 为光速, f_{FWHM0} 和 f_{FWHM1} 分别为不存在和存在谱线吸收时的FP腔体谐振峰半高宽。因此,压强展宽谱线的检测主要是通过检测谱线吸收带来的FP腔谐振峰品质因子的变化来实现。

[0043] FP腔谐振峰品质因子的变化可以通过:检测基带信号在不同频率下的接收功率或用于检测基带信号接收功率的时域衰减,两者皆可通过频率梳模式获得并行加速。

[0044] 因此,在气体工作压强为 $10^2\text{Pa} \sim 10^5\text{Pa}$ 且压强展宽谱线高于FP腔谐振峰半高宽时,将基带信号处理单元303配置为用于检测基带信号在不同频率下的接收功率或用于检测基带信号接收功率的时域衰减,以得到对应的基带处理信号;而波谱分析模块根据对应的基带处理信号,即基带信号在不同频率下的接收功率或接收功率的时域衰减,确定谱线吸收带来的FP腔谐振峰品质因子的变化,以测量谱线吸收率,进而得到波谱探测结果。此外,FP腔谐振模式可以增加CMOS频率梳信号的亮度,提高检测灵敏度。

[0045] 图5b展示了用该原理测量得到的乙腈分子(CH_3CN)旋转谱线,当气体压强为 $9.8 \times 10^4\text{Pa}$ (标准大气压为 $1.01 \times 10^5\text{Pa}$),检测灵敏度达72ppb。

[0046] 如此,本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器,通过结合CMOS频率梳波谱芯片,能够实现并行化的FP腔体(Fabry-Perot腔体)谐振模式激励和傅里叶变换波谱检测,使波谱检测速度产生一个数量级的提升;由于采用高品质因子的FP腔体增加了有效光学路径长度,可实现气体检测灵敏度至ppb量级。而且,本发明实施例中提供的CMOS频梳傅里叶变换旋转波谱探测器具有多普勒受限检测模式和压强展宽检测模式两种工作模式,能够实现低气体压强($= < 10^2\text{Pa}$)的精细谱线识别和高气体压强($10^2 \sim 10^5\text{Pa}$)下的大带宽谱线搜寻,从而拓展了波谱检测动态范围。

[0047] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

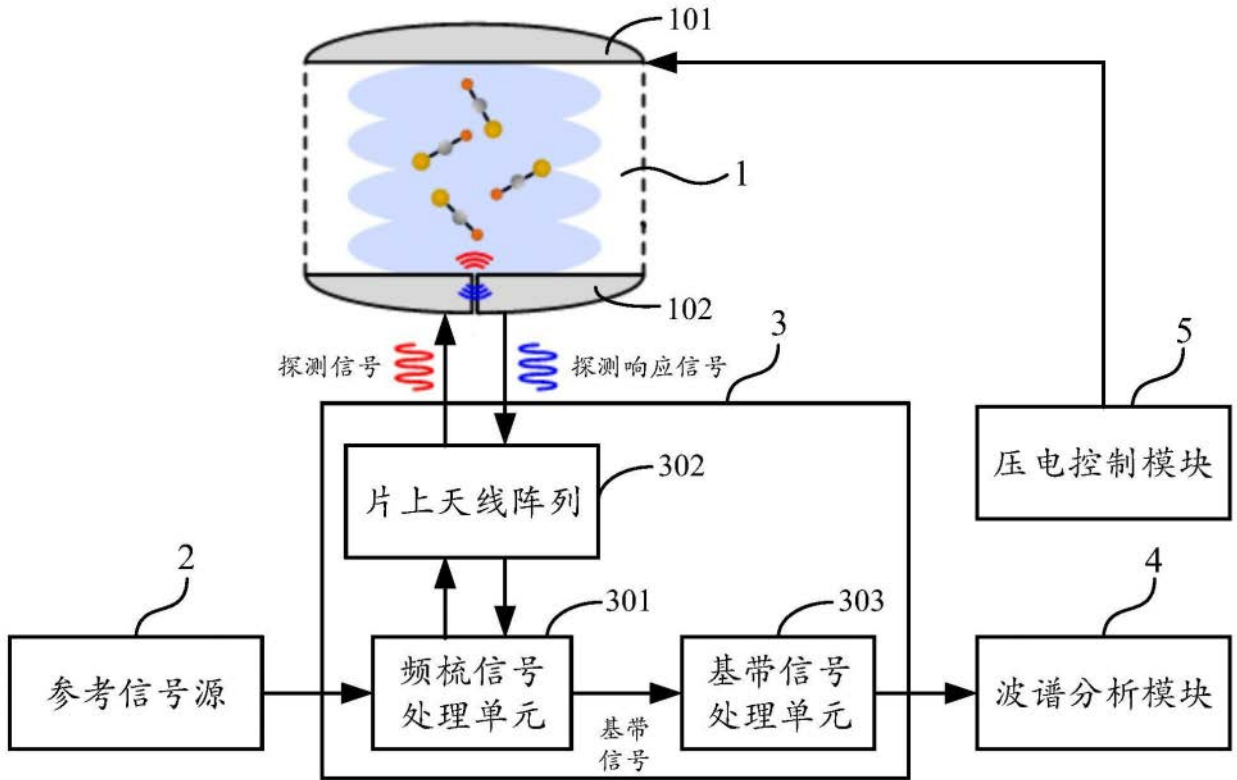


图1

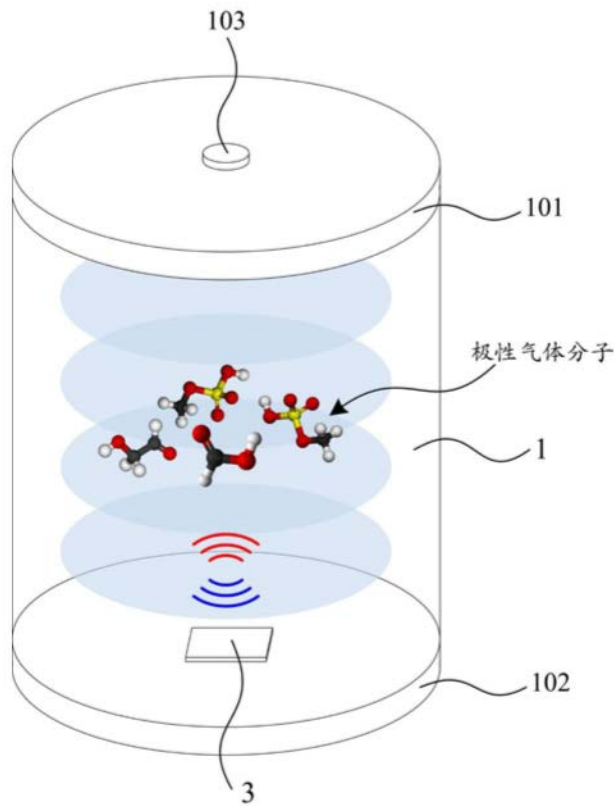


图2

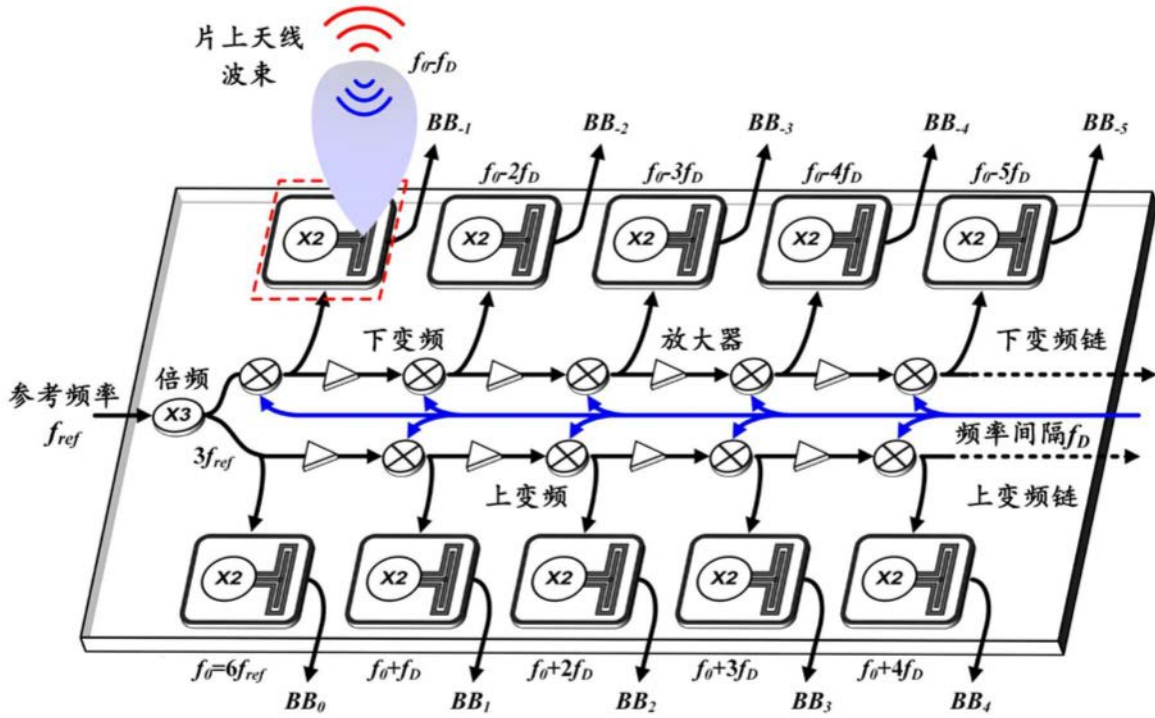


图3

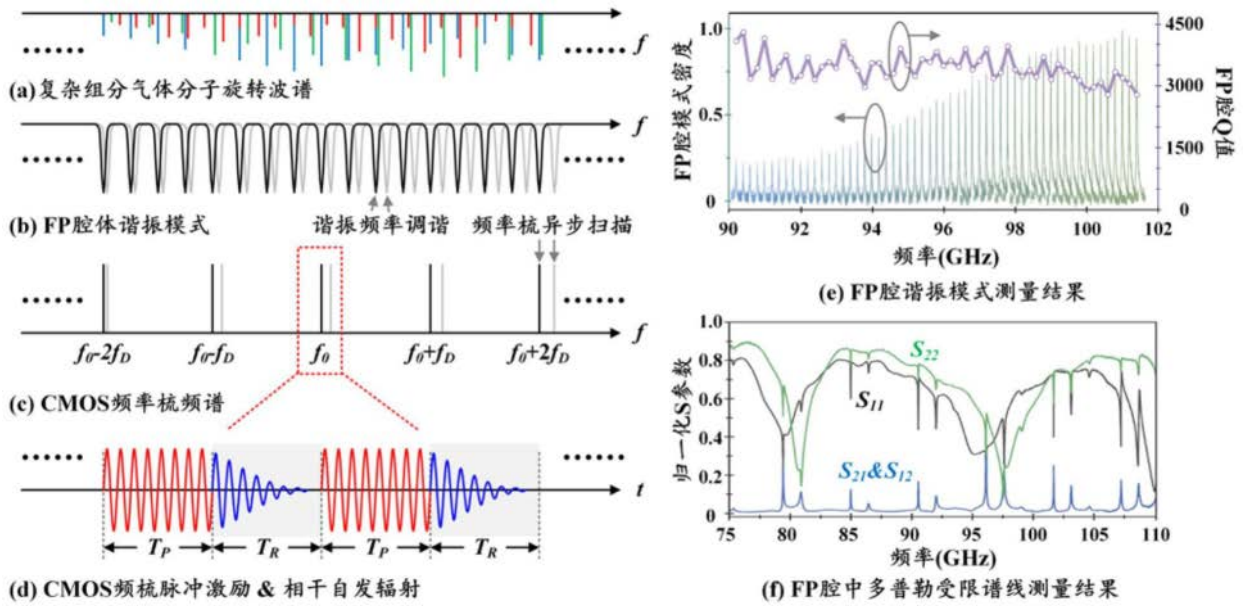


图4

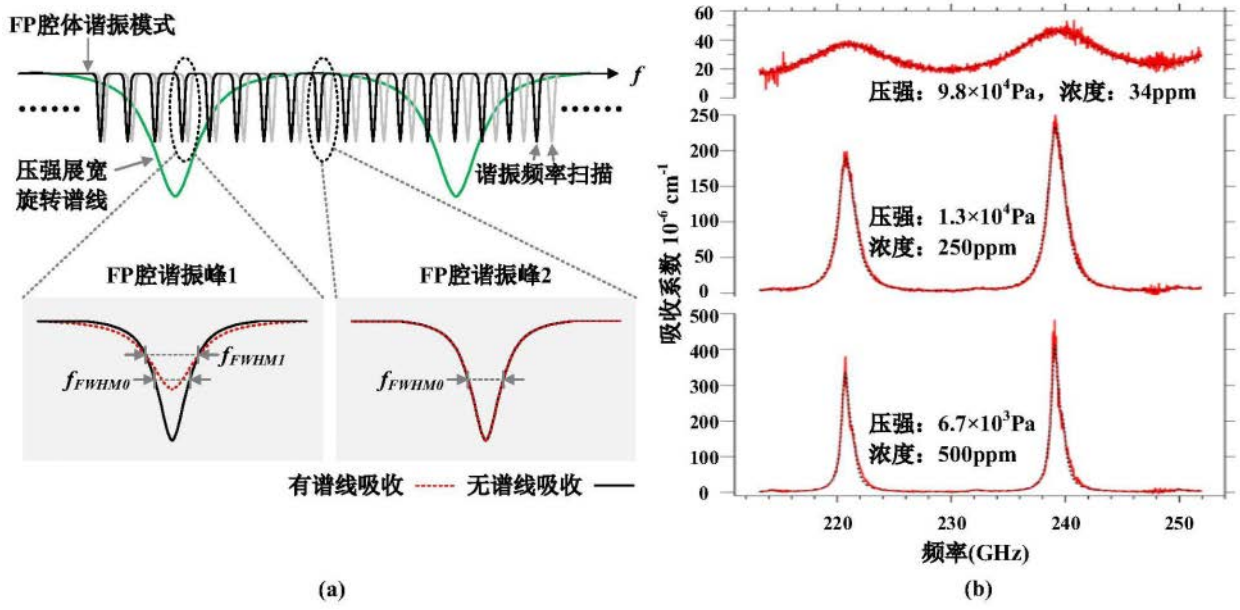


图5