



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102590138 A

(43) 申请公布日 2012.07.18

(21) 申请号 201210012470.0

(22) 申请日 2012.01.16

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区 100084 信箱 82
分箱清华大学专利办公室

(72) 发明人 丁艳军 彭志敏 车璐

(74) 专利代理机构 北京鸿元知识产权代理有限公司 11327

代理人 邸更岩

(51) Int. Cl.

G01N 21/39 (2006.01)

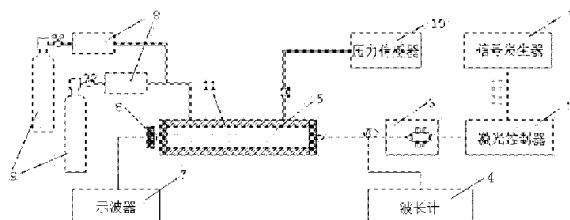
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法

(57) 摘要

一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法，属于可调谐激光二极管吸收光谱技术领域。该方法对 Beer-Lambert 定律进行二阶泰勒近似，并基于吸收信号二次谐波与背景信号一次谐波的比值确定气体浓度，无需标定实验。测量中在谱线中心频率处对激光器进行高频调制，并对采集到的信号进行离散傅里叶变换 (DFT) 得到各次谐波信号。该方法提高了气体测量精度，并使得波长调制技术可应用于强吸收条件下，扩展了 TDLAS 的应用范围。在实验中无需对激光器进行标定和应用锁相技术，简化了测量过程及测量系统，有利于 TDLAS 技术的广泛应用。



1. 一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法,其特征是该方法包括如下步骤:

1) 根据待测气体种类,从美国高分辨率光谱数据库中选取相应的吸收光谱谱线,并提取其光谱参数:中心频率 v_0 、线强度 $S(T)$ 、自身加宽系数 r_{self} 和空气加宽系数 r_{air} ;

2) 以可调谐半导体激光器(3)为光源,调节激光控制器(2)的温度及电流,使激光器的输出频率稳定在 v_0 处,并用波长计(4)进行标定和监测;

3) 将信号发生器(1)产生的高频正弦信号输入到激光控制器(2),以调制可调谐半导体激光器的输出频率;通过调节正弦信号的幅度,使调制系数 m 稳定在 $2.1 \sim 2.3$;

4) 将气室(5)抽真空,并将准直后的激光输入气室内,透过气室的激光由光电探测器(6)接收,输入示波器(7)进行采集,此时采集的信号记为背景信号 R ,背景信号 R 的光强记为 I_0 ;然后将气室内充满待测气体,再由光电探测器接收透射激光,并由示波器采集,此时采集的信号记为吸收信号 S ,吸收信号 S 的光强记为 I_t ,并通过压力传感器(10)和温度传感器(11)分别测量出气室内压力 P 和温度 T ,激光吸收光程 L 由游标卡尺测量;

背景信号 R 的激光强度 I_0 用下式表示:

$$I_0 = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(\omega t + \psi_1)] \quad (1)$$

其中 \bar{I}_0 为激光平均强度, i_1 为调幅系数, ψ_1 为光强调制与波长调制的相位差, ω 为正弦信号的角频率,均根据实验测定;

5) 对所采集的背景信号 R 的光强 I_0 和吸收信号 S 的光强 I_t 分别进行离散傅里叶变换,得到背景信号 R 的各次谐波 R_{nf} 和吸收信号 S 的各次谐波 S_{nf} 的幅值;求得吸收信号二次谐波与背景信号一次谐波的幅值比 $R_{2f/1f} = S_{2f}/R_{1f}$;

6) 根据步骤 1) 中所选择吸收谱线的光谱参数:线强度 $S(T)$,自身加宽系数 r_{self} ,空气加宽系数 r_{air} ,以及所测的待测气体压力 P 和温度 T ,确定福伊特线型函数 $\varphi(v)$,并代入公式(2)求出线型函数的傅里叶系数 H_k :

$$\begin{cases} H_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot d\theta \\ H_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot \cos k\theta \cdot d\theta \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (2)$$

其中, θ 是积分变量;

将 H_k 代入公式(3)求出 T_2 ,

$$T_2 = \frac{H_1^2}{2} + 2H_0H_2 + H_1H_3 + H_2H_4 + H_3H_5 + \dots + H_nH_{n+2}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

通常计算到 $n = 20$ 即收敛;

7) 将环境参数气体压力 P 、激光吸收光程 L ,谱线强度 $S(T)$, $R_{2f/1f}$ 和调幅系数 i_1 以及所计算参数 H_2 、 T_2 ,代入下式(4)

$$X = \frac{H_2 + \sqrt{H_2^2 + 2T_2i_1 \cdot R_{2f/1f}}}{PS(T)L T_2} \quad (4)$$

即求得待测气体的浓度 X 。

一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法,特别涉及在气体浓度较大时,提高气体测量精度的二阶泰勒近似测量方法。

背景技术

[0002] 可调谐激光二极管吸收光谱技术 (Tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 利用窄带的激光扫描气体分子的吸收线,通过分析被气体分子吸收后的激光强度得到待测气体的浓度和温度。与传统的采样式气体检测技术相比,TDLAS技术具有众多优势,不仅可实现非接触式在线测量,而且选择性强、灵敏度高,可测量某个区域气体浓度的平均水平,已经成为当前气体浓度在线检测技术的重要发展方向和技术主流。

[0003] 激光穿过被测气体后,激光透过率 $\tau(\nu)$ 可以用 Beer-Lambert 定律描述:

[0004]

$$\tau(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp[-PXS(T)\varphi(\nu)] = \exp[-\alpha(\nu)] \quad (1)$$

[0005] 式中, I_0 为无吸收气体时的背景信号光强, I_t 为有气体吸收时的吸收信号光强, P 为气体总压, L 为激光吸收光程, X 为待测气体浓度, $S(T)$ 为谱线的线强度, $\varphi(\nu)$ 为分子吸收线型函数, $\alpha(\nu)$ 为光谱吸收率。

[0006] 目前 TDLAS 测量方法可分为直接吸收法和波长调制法。

[0007] 对公式 (1) 两边求对数,再在整个频域内积分,即可得到气体浓度的表达式如下:

$$[0008] X = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\nu) d\nu}{PS(T)L} = \frac{A}{PS(T)L} \quad (2)$$

[0009] 其中 A 为光谱吸收率在频域上的积分值。

[0010] 从 (2) 式知,在气体温度 T 、压力 P 和激光吸收光程 L 已知的情况下,将光谱吸收率 $\alpha(\nu)$ 在整个频域上进行积分并将其代入 (2) 式即可得到气体浓度的绝对值 X ,此即为直接吸收法。

[0011] 直接吸收法在测量中容易受到颗粒物浓度、激光强度波动的影响,且在高压下谱线重叠严重,无法准确获取基线及吸收率函数,不适宜用于恶劣的工业环境,难以满足气体测量精度要求。

[0012] 科研工作者将波长调制 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) 引入 TDLAS 技术以提高测量精度和灵敏度。将激光器通过低频电流调制,使其以频率 $\bar{\nu}$ 扫描吸收谱线,再注入一个角频率 ω 的高频正弦信号同时对激光输出频率和光强进行调制,此时,激光瞬时频率为: $\nu(t) = \bar{\nu} + \alpha \cos(\omega t)$, a 为调制幅度,定义 $m = a / \Delta \nu$ 为调制系数,其中 $\Delta \nu$ 为吸收谱线的二分之一半高宽。

[0013] 在弱吸收情况下,即当光谱吸收率 $\alpha(\bar{\nu} + \alpha \cos(\omega t)) < 10\%$ 时,可以对 Beer-Lambert 定律进行一阶泰勒级数近似,如公式 (3) 所示:

[0014]

$$\tau(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp\left[-\alpha\left(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)\right)\right] \approx 1 - \alpha\left(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)\right) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k\omega t) \quad (3)$$

[0015] 式中, $H_k(\bar{\nu}, a)$ 表示各次谐波幅值, 表达式如下:

[0016]

$$\begin{cases} H_0(\bar{\nu}, a) = -\frac{PS(T)XL}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cdot d\theta \\ H_k(\bar{\nu}, a) = -\frac{PS(T)XL}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cdot \cos k\theta \cdot d\theta, k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (4)$$

[0017] 其中, θ 为积分变量。

[0018] 在谱线中心频率处, 奇数次谐波信号为零, 而偶数次谐波信号取得峰值, 二次谐波的峰值信号由于幅度大、信噪比高而经常被采用, 因此常称为二次谐波法。 $H_2(\bar{\nu}, a)$ 与气体浓度 X 成正比, 利用这一关系, 科研工作者通过二次谐波峰值信号和标定实验即可得到待测气体浓度的绝对值。

[0019] 美国斯坦福大学的 Hanson 课题组基于剩余幅度调制 (RAM) 提出了 2f/1f 免标定法, 该方法采用谱线中心频率处的一次谐波信号来修正二次谐波, 无需标定, 消除了激光强度、光电放大系数等因素的影响:

[0020]

$$X = \frac{S_{2f}}{S_{1f}} \cdot \frac{i_1 \pi}{PS(T)L \left| \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cdot \cos 2\theta \cdot d\theta \right|} \quad (5)$$

[0021] 式中: i_1 为调幅系数, 可由实验确定; S_{1f} 和 S_{2f} 为谱线中心频率处的一次、二次谐波信号, θ 为积分变量。由公式 (5) 可知, 如果气体温度 P、压力 T、吸收强度 S(T)、调幅系数以及 S_{1f} 和 S_{2f} 可以精确测量得到, 即可得到气体浓度的绝对值。

[0022] 波长调制法可以有效的提高 TDLAS 技术的测量精度和灵敏度, 但二次谐波法必须进行标定实验, 不能通过测量得到的谐波信号直接得到气体浓度的绝对值; 2f/1f 免标定法虽然可直接得到气体浓度, 但实验中需要标定激光器参数, 并采用锁相技术得到谐波信号, 限制了该方法的广泛应用。另外, 与二次谐波法相同, 2f/1f 免标定法只适用于吸收率小于 10.0% 的弱吸收情况下, 由于对激光透过率采用一阶泰勒级数近似的方法, 忽略了高阶项的影响, 使得气体浓度的测量误差随着吸收率的增大而急剧增大。

发明内容

[0023] 为提高 TDLAS 技术测量气体浓度的精度、拓宽其在工业现场中的应用范围, 本发明的目的是提供一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法, 以进一步提高测量精度, 简化测量过程。

[0024] 本发明的技术方案如下:

[0025] 1) 根据待测气体种类, 从美国高分辨率光谱数据库 (HITRAN 数据库) 中选取相应的吸收光谱谱线, 并提取其光谱参数: 中心频率 ν_0 、线强度 $S(T)$ 、自身加宽系数 r_{self} 和空气加宽系数 r_{air} ;

[0026] 2) 以可调谐半导体激光器 3 为光源, 调节激光控制器 2 的温度及电流, 使激光器的输出频率稳定在 v_0 处, 并用波长计 4 进行标定和监测;

[0027] 3) 将信号发生器 1 产生的高频正弦信号输入到激光控制器 2, 以调制可调谐半导体激光器的输出频率; 通过调节正弦信号的幅度, 使调制系数 m 稳定在 $2.1 \sim 2.3$;

[0028] 4) 将气室 5 抽真空, 并将准直后的激光输入气室内, 透过气室的激光由光电探测器 6 接收, 输入示波器 7 进行采集, 此时采集的信号记为背景信号 R, 背景信号 R 的光强记为 I_0 ; 然后将气室内充满待测气体, 再由光电探测器接收透射激光, 并由示波器采集, 此时采集的信号记为吸收信号 S, 吸收信号 S 的光强记为 I_t , 并通过压力传感器 10 和温度传感器 11 分别测量出气室内压力 P 和温度 T, 激光吸收光程 L 由游标卡尺测量;

[0029] 背景信号 R 的激光强度 I_0 用下式表示:

$$I_0 = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(\omega t + \psi_1)] \quad (1)$$

[0031] 其中 \bar{I}_0 为激光平均强度, i_1 为调幅系数, ψ_1 为光强调制与波长调制的相位差, ω 为正弦信号的角频率, 均根据实验测定;

[0032] 5) 对所采集的背景信号 R 的光强 I_0 和吸收信号 S 的光强 I_t 分别进行离散傅里叶变换, 得到背景信号 R 的各次谐波 R_{nf} 和吸收信号 S 的各次谐波 S_{nf} 的幅值; 求得吸收信号二次谐波与背景信号一次谐波的幅值比 $R_{2f/1f} = S_{2f}/R_{1f}$;

[0033] 6) 根据步骤 1) 中所选择吸收谱线的光谱参数: 线强度 $S(T)$, 自身加宽系数 r_{self} , 空气加宽系数 r_{air} , 以及所测的待测气体压力 P 和温度 T, 确定福伊特线型函数 $\varphi(v)$, 并代入公式 (2) 求出线型函数的傅里叶系数 H_k ;

[0034]

$$\begin{cases} H_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot d\theta \\ H_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot \cos k\theta \cdot d\theta \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (2)$$

[0035] 其中, θ 是积分变量;

[0036] 将 H_k 代入公式 (3) 求出 T_2 ,

$$T_2 = \frac{H_1^2}{2} + 2H_0H_2 + H_1H_3 + H_2H_4 + H_3H_5 + \dots + H_nH_{n+2}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

[0038] 通常计算到 $n = 20$ 即收敛;

[0039] 7) 将环境参数气体压力 P、激光吸收光程 L, 谱线强度 $S(T)$, $R_{2f/1f}$ 和调幅系数 i_1 以及所计算参数 H_2 、 T_2 , 代入下式 (4)

$$X = \frac{H_2 + \sqrt{H_2^2 + 2T_2i_1 \cdot R_{2f/1f}}}{PS(T)L T_2} \quad (4)$$

[0041] 即求得待测气体的浓度 X。

[0042] 本发明方法相对于 TDLAS 的其他测量方法, 有以下优点: ①对激光进行高频调制, 有效抑制了背景噪声, 提高了测量精度; ②无需标定, 可根据吸收信号二次谐波和背景信号一次谐波的幅值比直接确定气体浓度; ③直接对所得到的信号进行 DFT 处理, 无需激光标定技术和锁相技术, 简化了测量过程及测量系统; ④对 Beer-Lambert 定律采用二阶泰勒近似, 使 WMS 技术同时适用于吸收率较大的情况下, 即使吸收率达到 30.0% 也具有较高的测

量精度,有效地拓展了 TDLAS 技术的应用范围。

附图说明

- [0043] 图 1 是本发明的气体浓度测量系统结构原理图。
- [0044] 图 2 是针对 NH₃ 和空气混合气体背景信号 R 与吸收信号 S 原始数据。
- [0045] 图 3 是针对 NH₃ 和空气混合气体背景信号 R 与吸收信号 S 各次谐波示图。
- [0046] 图中 :1- 信号发生器 ;2- 激光控制器 ;3-DFB 激光器 ;4- 波长计 ;5- 气室 ;6- 光电探测器 ;7- 示波器 ;8- 质量流量控制器 ;9- 气瓶 ;10- 压力传感器 ;11- 温度传感器。

具体实施方式

- [0047] 下面结合附图对本发明作进一步的说明。
- [0048] 本发明提供了一种基于激光吸收光谱的气体浓度在线测量方法,该方法包括了如下步骤 :

- [0049] 1) 根据待测气体种类,从 HITRAN 数据库中选取相应的吸收光谱谱线,并提取其光谱参数:中心频率 v₀、线强度 S(T)、自身加宽系数 r_{self} 和空气加宽系数 r_{air};
- [0050] 2) 以可调谐半导体激光器 3 为光源,调节激光控制器 2 的温度及电流,使激光器的输出频率稳定在 v₀ 处,并用波长计 4 进行标定和监测;
- [0051] 3) 将信号发生器 1 产生的高频正弦信号输入到激光控制器 2,以调制可调谐半导体激光器的输出频率;通过调节正弦信号的幅度,使调制系数 m 稳定在 2.1 ~ 2.3;
- [0052] 4) 将气室 5 抽真空,并将准直后的激光输入气室内,透过气室的激光由光电探测器 6 接收,输入示波器 7 进行采集,此时采集的信号记为背景信号 R,背景信号 R 的光强记为 I₀;然后将气室内充满待测气体,再由光电探测器接收透射激光,并由示波器采集,此时采集的信号记为吸收信号 S,吸收信号 S 的光强记为 I_t,并通过压力传感器 10 和温度传感器 11 分别测量出气室内压力 P 和温度 T,激光吸收光程 L 由游标卡尺测量;

- [0053] 背景信号 R 的光强 I₀ 用下式表示:

$$I_0 = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(\omega t + \psi_1)] \quad (1)$$

- [0055] 其中 \bar{I}_0 为激光平均强度, i_1 为调幅系数, ψ_1 为光强调制与波长调制的相位差, ω 为正弦信号的角频率,均根据实验测定;

- [0056] 对 Beer-Lambert 定律进行二阶泰勒近似,激光透射率 $\tau(\nu)$ 用下式表示,在吸收率小于 30.0% 范围内,该近似方法有很高的精度:

[0057]

$$\tau(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp[-\xi X \varphi(\nu)] \approx 1 - \xi X \sum_{k=0}^{\infty} H_k \cos(k\omega t) + \frac{\xi^2 X^2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} H_k \cos(k\omega t) \right]^2}{2} \quad (2)$$

- [0058] 其中, $\xi = PS(T)L$, H_k 为线型函数的傅里叶系数,满足 $\varphi(\nu) = \sum_{k=0}^{\infty} H_k \cdot \cos(k\omega t)$,其表达式如下:

[0059]

$$\begin{cases} H_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot d\theta \\ H_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot \cos k\theta \cdot d\theta \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (3)$$

[0060] 式中, θ 为积分变量。

[0061] 定义 $\sum_{k=0}^{\infty} T_k \cos(k\omega t) = \left[\sum_{k=0}^{\infty} H_k \cos(k\omega t) \right]^2$, 通过谐波理论得 :

$$\begin{cases} T_0 = \frac{1}{2} \left(H_0^2 + \sum_{n=0}^{\infty} H_n^2 \right) \\ T_k = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^k H_n H_{k-n} + \sum_{n=0}^{\infty} H_n H_{n+k} \quad k = 1, 2, 3 \dots; n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

[0063] 5) 对所采集的背景信号 R 和吸收信号 S 的数据分别进行离散傅里叶变换, 得到背景信号各次谐波 R_{nf} 和吸收信号各次谐波 S_{nf} 幅值 ; 求得吸收信号二次谐波与背景信号一次谐波幅值比 $R_{2f/1f} = S_{2f}/R_{1f}$;

[0064] 根据谐波理论, 将 (1) 式代入 (2) 式, 得到探测器所接收新号的一次、二次谐波信号表达式如下 :

$$\begin{cases} S_{1f} = \frac{G\bar{I}_0 i_1}{2} \left\{ \left[\left(A_0 + \frac{A_2}{2} \right) \cos(\psi_1) \right]^2 + \left[\left(A_0 - \frac{A_2}{2} \right) \sin(\psi_1) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ S_{2f} = \frac{G\bar{I}_0 A_2}{2} \end{cases} \quad (5)$$

[0066] 其中, G 为光电放大系数, A_k 的表达式如下 :

$$\begin{cases} A_0 = 1 - \xi X H_0 + \frac{\xi^2 X^2}{2} T_0 \\ A_k = -\xi X H_k + \frac{\xi^2 X^2}{2} T_k \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (6)$$

[0068] 将式 (6) 代入式 (5) 并进行简化可得吸收信号 S 的二次谐波如下 :

$$S_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left(-\xi X H_2 + \frac{\xi^2 X^2}{2} T_2 \right) \quad (7)$$

[0070] 当没有气体吸收时, 谱线中心处有 $H_k = 0, T_k = 0 (k = 0, 1, 2 \dots)$, 代入式 (6) 从而有 $A_0 = 1, A_k = 0 (k = 1, 2 \dots)$, 代入式 (5) 可得背景信号 R 的一次谐波如下 :

$$R_{1f} = \frac{G\bar{I}_0 i_1}{2} \quad (8)$$

[0072] 将吸收信号 S 的二次谐波 S_{2f} 与背景信号 R 的一次谐波 R_{1f} 相比, 则有

$$R_{2f/1f} = \frac{S_{2f}}{R_{1f}} = \frac{-\xi X H_2 + \frac{\xi^2 X^2}{2} T_2}{i_1} = \frac{-PS(T)LXH_2 + \frac{(PS(T)L)^2 X^2}{2} T_2}{i_1} \quad (9)$$

[0074] 对式 (9) 进行求解, 即可得到气体浓度绝对值 X 的表达式如下 :

$$[0075] \quad X = \frac{H_2 + \sqrt{H_2^2 + 2T_2 i_1 \cdot R_{2f/1f}}}{PS(T)LT_2} \quad (10)$$

[0076] 6) 根据步骤 1) 中所选择吸收谱线的光谱参数 : 线强度 $S(T)$, 自身加宽系数 r_{self} , 空气加宽系数 r_{air} , 以及所测的待测气体压力 P 和温度 T , 确定福伊特线型函数 $\varphi(v)$, 代入公式 (3) 求出 H_k , 并代入公式 (4) 求出 T_2 , 通常计算到 $n = 20$ 即收敛。

[0077] $\varphi(v)$ 的确定方法参见文献“李宁 . 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及三维分布重建研究 [博士学位论文]. 浙江大学, 2008. ” 和文献“Y. Liu, J. Lin, G. Huang, Y. Guo and C. Duan. Simple empirical analytical approximation to the Voigt profile. J. Opt. Soc. Am. B, 2001, 18 :666-672. ”。

[0078] 7) 将环境参数气体压力 P 、激光吸收光程 L , 谱线线强度 $S(T)$, $R_{2f/1f}$ 和调幅系数 i_1 以及所计算参数 H_2 、 T_2 , 代入式 (10) 即可求得所测气体的浓度 X 。

[0079] 实验例 :

[0080] 1) 实验例采用 NH_3 与空气混合气体为例, 测量混合气体中 NH_3 的浓度, 在 HITRAN 数据库中选用的 NH_3 分子吸收谱线中心频率 v_0 为 6529.184cm^{-1} , 其光谱参数如表 1 所示。

[0081] 表 1 NH_3 分子 6529.184cm^{-1} 吸收谱线光谱参数 (296K)

[0082]	v_0 [cm^{-1}]	S [$\text{cm}^{-2}/\text{atm}$]	加宽系数	
			γ_{self} [$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$]	γ_{Air} [$\text{cm}^{-1}/\text{atm}$]
	6529.184	0.0322	0.535	0.0762

[0083] 2) 以可调谐半导体激光器 3 为光源, 调节激光控制器 2 的温度及电流, 使激光器的输出频率稳定在 v_0 处, 并用波长计 4 进行标定和监测 ;

[0084] 3) 将信号发生器 1 产生的频率为 1000Hz 的高频正弦信号输入到激光控制器 2, 以调制激光器输出频率 ; 通过调节正弦信号的幅度, 使调制系数 m 稳定在 2.2 ;

[0085] 4) 将气室 5 抽真空, 并将准直后的激光输入气室内, 透过气室的激光由光电探测器 6 接收, 输入示波器 7 进行采集, 此时采集的信号记为背景信号 R , 背景信号 R 的光强记为 I_0 , 如图 2 中 A 曲线所示 ; 然后将气室内充满待测气体, 再由光电探测器接收透射激光, 并由示波器采集, 此时采集的信号记为吸收信号 S , 吸收信号 S 的光强记为 I_t , 如图 2 中 B 曲线所示 ; 分别由压力传感器 10 和温度传感器 11 测得气室内压力 $P = 0.1\text{atm}$, 温度 $T = 296\text{K}$, 激光吸收光程 $L = 25.5\text{cm}$, 由游标卡尺测量 ;

[0086] 背景信号 R 的光强 I_0 用下式表示 :

$$[0087] \quad I_0 = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(\omega t + \psi_1)] \quad (1)$$

[0088] 其中 \bar{I}_0 为激光平均强度, i_1 为调幅系数, ψ_1 为光强调制与波长调制的相位差, ω 为正弦信号的角频率, 根据实验例测定, $i_1 = 0.136$, $\psi_1 \approx \pi$;

[0089] 5) 对所采集的背景信号 R 和吸收信号 S 的数据分别进行离散傅里叶变换, 得到背景信号 R 的各次谐波 R_{nf} 和吸收信号 S 的各次谐波 S_{nf} 幅值, 如图 3 所示, 其中 $R_{1f} = 459$, $S_{2f} = 194$; 求得吸收信号二次谐波与背景信号一次谐波幅值比 $R_{2f/1f} = S_{2f}/R_{1f} = 0.423$;

[0090] 6) 根据所选择吸收谱线的光谱参数 : 线强度 $S(T)$, 自身加宽系数 r_{self} , 空气加宽系数 r_{air} 以及所测得的待测气体压力 P 和温度 T , 确定福伊特线型函数 $\varphi(v)$, 代入公式 (2) 求得 $H_2 = 7.56$, 代入公式 (3) 求得 $T_2 = 145.51$, 其中, 计算至 $n = 20$;

[0091]

$$\begin{cases} H_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot d\theta \\ H_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v) \cdot \cos k\theta \cdot d\theta \quad k = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (2)$$

[0092] $T_2 = \frac{H_1^2}{2} + 2H_0H_2 + H_1H_3 + H_2H_4 + \dots + H_nH_{n+2}, n = 1, 2, 3 \dots$ (3)

[0093] 7) 将环境参数气体压力 P、激光吸收光程 L, 谱线强度 S(T), R_{2f/1f} 和调幅系数 i₁ 以及所计算参数 H₂、T₂, 代入式 (4) :

[0094] $X = \frac{H_2 + \sqrt{H_2^2 + 2T_2i_1 \cdot R_{2f/1f}}}{PS(T)L T_2} \quad (4)$

[0095] 即可求得所测气体的浓度 X = 10.069%。

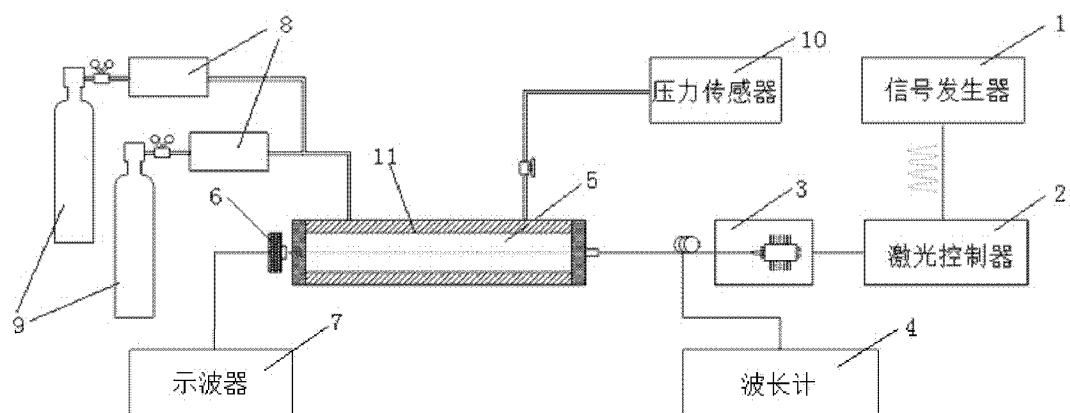


图 1

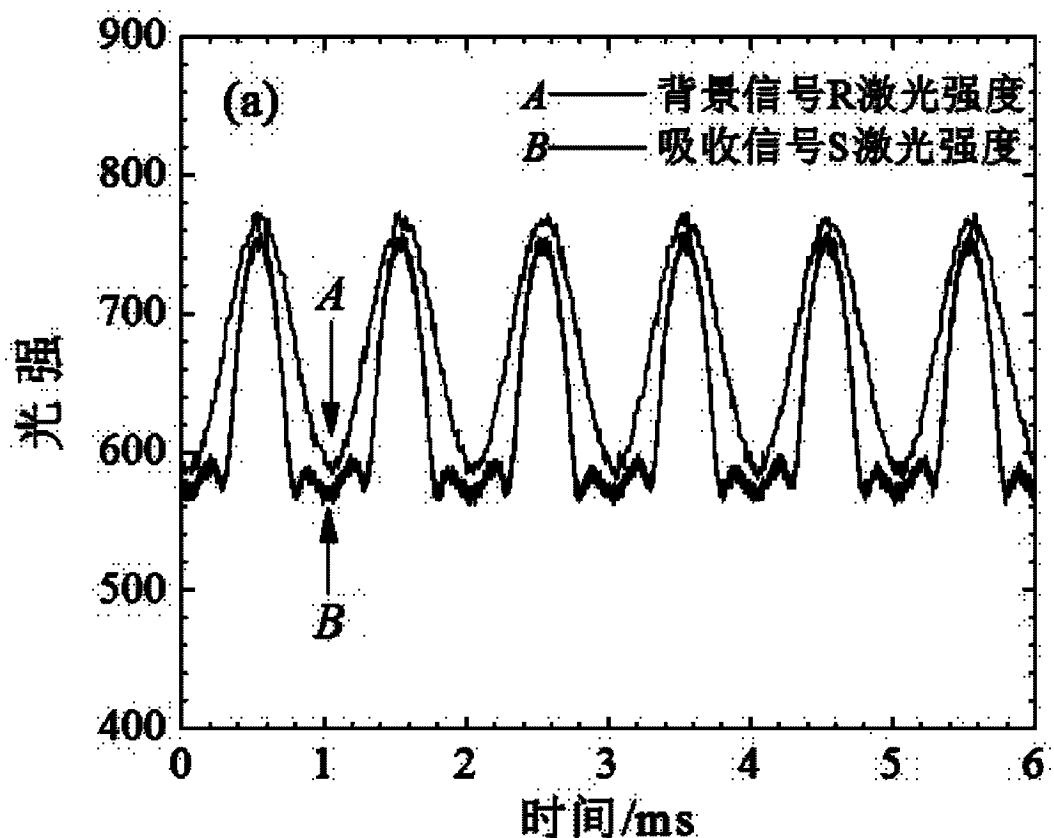


图 2

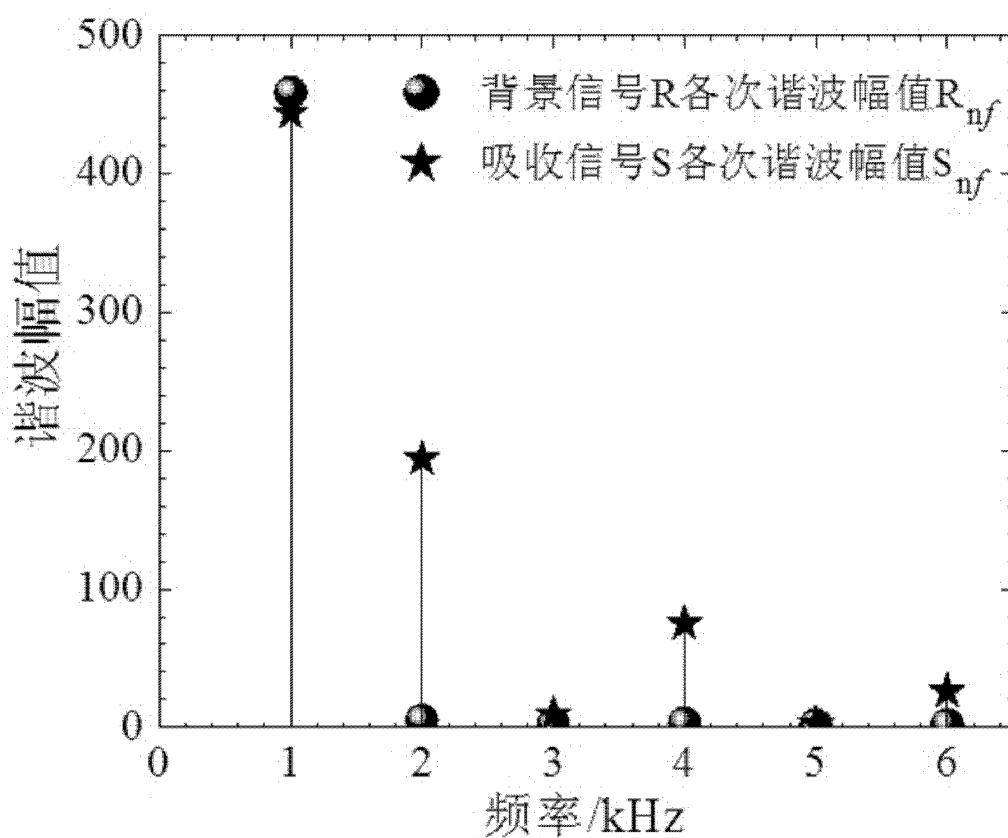


图 3