

检测 Doppler-free 红外激光 光声信号的两种方法*

谭冠荣 杨文霞 郭明霞 隋 燕

(南开大学电子科学系, 天津)

傅汝康 开桂云

(南开大学光学研究所, 天津)

摘要——讨论了检测 Doppler-free 红外激光光声信号的和频方法和差频方法, 发现在用相同斩波叶片情况下, 几乎对所有的斩波孔数比 F_2/F_1 , 差频方法在减少组合频率干扰、提高信噪比方面都好于或等于和频方法。

关键词——Doppler-free 光声信号, 和频检测, 差频检测。

1. 引 言

70 年代末出现了 Doppler-free 红外激光光声光谱仪^[1~2], 由于消除了光声室中样品原子、分子多普勒热运动的影响, 这种光声光谱仪具有很高的分辨率, 可用于检测原子或分子能级的精细结构。近几年来, 已有许多有关这种技术的报道^[3~7], 这些报道都是采用和频方法检测 Doppler-free 红外激光光声信号。我们通过分析计算发现, 在用相同斩波叶片时, 几乎对所有的斩波孔数比 F_2/F_1 , 差频方法在减少组合频率干扰, 提高信噪比方面, 都好于或等于和频方法, 因此, 作者认为采用差频方法检测 Doppler-free 红外激光光声信号优于和频方法。

2. Doppler-free 红外激光光声信号的和频检测

2.1 实验装置

为了检测 Doppler-free 红外激光光声信号, 我们制作了以 CO_2 激光器为红外光源的实验装置, 参看图 1。与通常的激光光声光谱仪^[8, 9]不同的是它没有采用单路斩波器^[10, 11], 而是采用三重斩波器, 另外, 进入光声室的不是单束激光而是两束激光。

本文 1988 年 8 月 11 日收到, 修改稿 1989 年 4 月 2 日收到。

* 国家自然科学基金资助项目。

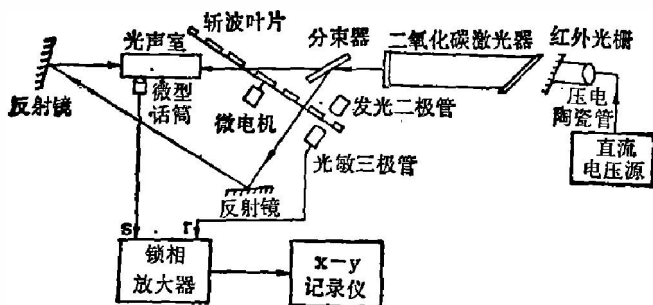


图1 实验装置

Fig. 1 The experimental set-up.

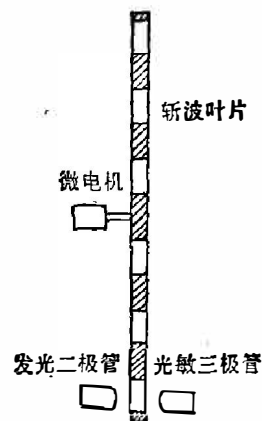


图2 三重斩波器

Fig. 2 The triple chopper.

三重斩波器的结构如图2所示，它由微电机、斩波叶片、光敏三极管和发光二极管组成，圆形斩波器叶片用金属薄片制成，用微电机带动，叶片上的许多斩波孔分布在3个不同半径的同心圆周上，同一圆周上相邻两孔的间距一定，如图3所示。最大圆周上的孔数 F_3 等于另外两个圆周上孔数 F_1 和 F_2 之和，即 $F_3 = F_1 + F_2$ 。光敏三极管和发光二极管相向位于斩波叶片最大圆周两侧，当斩波叶片转动时，发光二极管发出的光经斩波后进入光敏三极管，产生一个频率为 f_3 的矩形方波信号，作为参考信号进入锁相放大器，以便对Doppler-free红外激光光声信号进行相干检测。

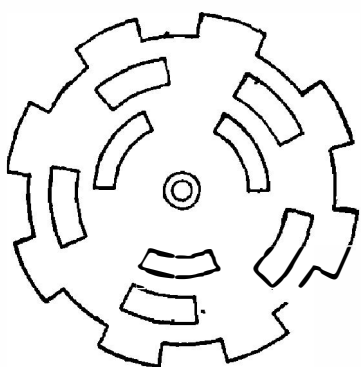


图3 斩波叶片

Fig. 3 The chopping vane.

2.2 和频 Doppler-free 红外激光光声信号

来自 CO_2 激光器的红外激光束，经分束器分成强度相同的两束，通过镀金全反射镜后，相向地进入装有样品的光声室。进入光声室之前，一束激光由最小圆周上的斩波孔斩波，而另一束由中间圆周上的斩波孔斩波，斩波频率分别为 f_1 和 f_2 。显然，斩波频率 f_1 和 f_2 以及参考信号频率 f_3 与斩波孔数 F_1 、 F_2 和 F_3 之间有如下关系：

$$\frac{f_1}{F_1} = \frac{f_2}{F_2} = \frac{f_3}{F_3} = v, \quad (1)$$

式中 v 是微电机的转速。相向进入光声室的两激光束被样品双光子共振吸收，吸收的部分光能因碰撞弛豫转化成分子热能，引起光声室中样品气体压强变化。由于吸收是非线性的，这一压强变化将包含频率为 $f_3 = f_1 + f_2$ 的成分，这一频率成分的压强波由光声室侧面的高灵敏微型话筒转换成频率为 f_3 的电信号，就是和频 Doppler-free 红外激光光声信号^[2]。该信号和来自光敏三极管的参考信号分别送到锁相放大器的待测信号输入端 s 和参考信号输入端 r ，就能测得和频 Doppler-free 红外激光光声信号。

我们的实验装置中，构成激光腔的红外光栅紧贴在压电陶瓷管上，压电陶瓷与一可调直流电源相接，电源输出的直流电压在慢速电机带动下线性增大（最大电压为800V），于是激光器腔长将随之变化，激光器输出频率也随之变化，这样，联结锁相放大器输出端的 $x-y$ 记录仪就能给出和频 Doppler-free 红外激光光声信号的形状，如图4所示，图中横轴 f 表示

激光频率(10 MHz/div), 纵轴 V 表示锁相放大器输出信号幅度(1 mV/div). 实验采用的 CO_2 激光谱线是 10p(28), 样品是无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), 斩波叶片的斩波孔数比是 $F_1:F_2:F_3=3:5:8$ (参见图 3).

2.3 组合频率及其对和频 Doppler-free 红外激光光声信号的干扰

从图 4 可知, 所得到的和频 Doppler-free 红外激光光声信号中存在由组合频率干扰造成的噪声成分, 在 Doppler-free 红外激光光声光谱仪中, 采用三重斩波器必定会导致组合频率的干扰. 实际上, 由于三重斩波器对相向进入光声室的两激光束进行不同频率的斩波, 以及样品吸收的非线性, 来自高灵敏微型话筒的信号中, 除了频率为 f_s 的和频 Doppler-free 红外激光光声信号外, 还包含频率为

$$f_{21} = Mf_1 + Nf_2 \quad (2)$$

的一系列信号, 式中 $M, N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 称为组合频率信号, 它们之中频率为

$$f_{21} = Kf_3 \quad (3)$$

的那部分信号, 没有完全被锁相放大器抑制掉, 而作为一种噪声对和频 Doppler-free 红外激光光声信号进行干扰, 这就是组合频率干扰.

从式(1)、(2)、(3)可得

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{M - K}{K - N} \quad (4)$$

当选定三重斩波时, 斩波孔的比值 F_2/F_1 就确定了, 这时组合频率的各种组合方式可以用

表 1 与组合频率各组合方式相应的 K 、 M 和 N 值($F_2/F_1=5/3$)

Table 1 Values of K 、 M and N corresponding to different combination modes of combination frequency ($F_2/F_1=5/3$).

Q	K	M	N
1	1	-9	7
2	1	-4	4
3	1	6	-2
4	2	-8	8
5	2	-3	5
6	2	7	-1
7	3	-7	9
8	3	-2	6
9	3	8	0

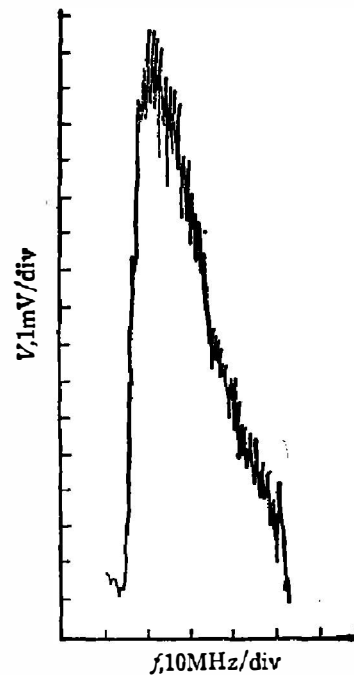


图 4 斩波孔数比 $F_1:F_2:F_3=3:5:8$ 时和频 Doppler-free 红外激光光声信号

Fig. 4 The sum frequency Doppler-free infrared laser optoacoustic signal for the ratio of chopping hole number of $F_1:F_2:F_3=3:5:8$.

计算机计算出来。例如：对于我们选定的图 3 所示的斩波叶片，其 $F_2/F_1=5/3$ ，组合频率的组合方式共有 9 个，与它们相应的 M ， N 和 K 值列于表 1，表中 Q 表示组合频率组合方式的序号，表中没有列出 $M>10$ ， $N>10$ 和 $K>3$ 的组合方式，因为它们相应的组合频率信号的幅度很小，对和频 Doppler-free 红外激光光声信号的干扰太小。

3. Doppler-free 红外激光光声信号的差频检测

3.1. 实验装置

用差频方法检测 Doppler-free 红外激光光声信号的实验装置与图 1 相似，不同之处是移动了三重斩波器的位置，使两束激光在相向进入光声室之前，由斩波叶片最大圆周和中间圆周上的斩波孔斩波，斩波频率为 f_3 和 f_2 ，另外，把光敏三极管和发光二极管的位置从最大圆周两侧移到最小圆周两侧，这样，当斩波叶片转动时，光敏三极管输出的矩形波参考信号频率为 $f_1=f_3-f_2$ 。

3.2. 差频 Doppler-free 红外激光光声信号

与和频 Doppler-free 红外激光光声信号一样，由于对进入光声室的两束激光进行了频率为 f_3 和 f_2 的斩波，以及样品吸收的非线性，从高灵敏微型话筒出来的光声信号中含有频率为 f_1 的成分，这就是差频 Doppler-free 红外激光光声信号^[12]。将它送入锁相放大器被测信号输入端 s ，将来自光敏三极管的参考信号送入参考信号输入端 r ， $x-y$ 记录仪就能绘出差频 Doppler-free 红外激光光声信号的波形，如图 5 所示。图中横轴 f 表示激光频率 (10 MHz/div)，纵轴 V 表示锁相放大器输出信号幅度 (1 mV/div)。实验采用的 CO_2 激光谱线、样品和斩波叶片均与和频方法相同。

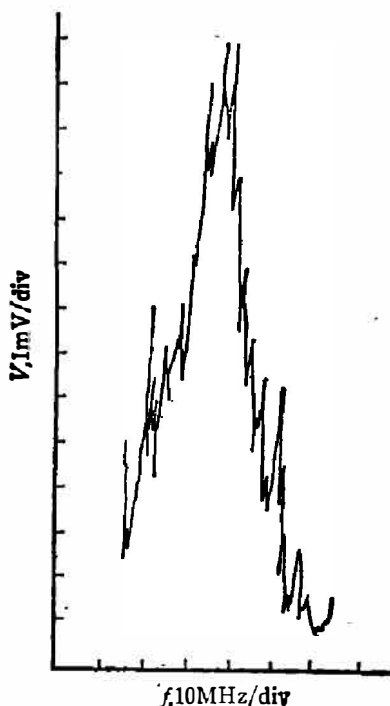


图 5 斩波孔数比 $F_1:F_2:F_3=3:5:8$ 时差频 Doppler-free 红外激光光声信号

Fig. 5 The difference frequency Doppler-free infrared laser optoacoustic signal for the ratio of chopping hole number of $F_1:F_2:F_3=3:5:8$.

3.3. 组合频率及其对差频 Doppler-free 红外激光光声信号的干扰

同样，由于对两激光束进行了不同频率 (f_2 和 f_3) 的斩波以及样品吸收的非线性，高灵敏微型话筒输出的光声信号中，除了频率为 f_1 的差频 Doppler-free 红外激光光声信号外，还包含频率为

$$f_{32} = Uf_3 - Tf_2 \quad (5)$$

($U, T = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 的一系列组合频率信号，其中频率为

$$f_{32} = Rf_1 (R = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

的那部分组合频率信号不会完全被锁相放大器抑制，

从而干扰差频 Doppler-free 红外激光光声信号，参看图 5。

从式(1)、(5)和(6)可得

$$\frac{F_3}{F_2} = \frac{T-R}{U-R} \quad (7)$$

根据我们选定的斩波叶片 ($F_3/F_2=8/5$), 用计算机算得在 $T < 10$ 、 $U < 10$ 和 $S < 3$ 时, 组合频率的组合方式只有 5 个, 与它们相应的 T 、 U 和 R 值列于表 2.

表 2 与组合频率各组合方式相应的 R 、 T 和 U 值 ($F_3/F_2=8/5$)
Table 2 Values of R 、 T and U corresponding to different combination modes of combination frequency ($F_3/F_2=8/5$).

Q	R	T	U
1	1	-7	-4
2	1	9	6
3	2	-6	-3
4	2	10	7
5	3	-5	-2

4. 两种检测方法组合频率干扰的比较

为了粗略地估计和比较组合频率信号对和频和差频 Doppler-free 红外激光光声信号的干扰情况, 我们引入两个符号:

$$A = \sum_Q \frac{1}{K^2(M^2 + N^2)}$$

和

$$B = \sum_Q \frac{1}{R^2(T^2 + U^2)}$$

它们与组合频率的数目 Q 以及组成这些组合频率的各个谐波的阶数 R 、 T 、 U 、 K 、 M 、 N 有关, 因而, A 和 B 的值愈大, 组合频率干扰就愈大. 对于本文采用的斩波叶片 ($F_1:F_2:F_3=3:5:8$), 由表 1 和表 2 可以算得 $A=0.084$ 、 $B=0.035$, 即 $B < A$, 所以差频方法的组合频率干扰要比和频方法小, 也就是信噪比要大一些. 比较图 4 和图 5 也可看出这一点.

对于任意一个 $F_3 = F_1 + F_2$ 的斩波叶片, 为了比较两种方法的组合频率干扰, 我们用计算机计算了 B/A 与 F_2/F_1 的关系曲线, 如图 6 所示. 从图中看出, 对于几乎所有的斩波孔数比 F_2/F_1 , 都有 $B \leq A$, 这表明: 在绝大多数情况下, 差频方法的组合频率干扰都小于或等于和频方法, 所以从减少组合频率干扰和提高信噪比两方面来看, 差频方法都好于或等于通常采用的和频方法.

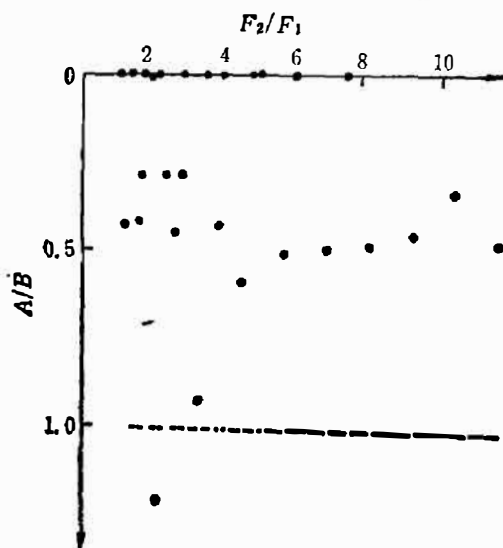


图 6 B/A 与 F_2/F_1 的关系

Fig. 6 The relation between B/A and F_2/F_1 .

致谢——本文撰写过程中得到朱遐教授的支持和帮助, 在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Wieman C. and Hansch T. W., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 1170.
- [2] Marinero E. E. and Stuke M., *Opt. Commun.*, **30**(1976), 349.
- [3] Gerstenberger D. C., Latush E. I. and Coolins G. J., *Opt. Commun.*, **31**(1979), 28.
- [4] Lawler J. E. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 1046.
- [5] Duffey T. P. et al., *Optics Letters*, **10**(1985), 597.
- [6] Minguzzi P., Profeti S. and Tonelli M., *Opt. Commun.*, **42**(1982), 237.
- [7] Akiyoshi Watanabe, et al., *Japan J. Appl. Phys.*, **20**(1981), 673.
- [8] Konjevic N. and Jovicevic S., *Spectroscopy Letters*, **12**(1979), 259.
- [9] Rewer R. J. and Bruce C. W., *Appl. Optics*, **17**(1978), 3746.
- [10] Mendes I. and Cvijin P. V., *Appl. Phys.*, **B33**(1983), 119.
- [11] Mendes I. and Cvijin P. V., *Appl. Phys.*, **B34**(1984), 1.
- [12] Yang W. J. et al., *Infrared Phys.*, **27**(1987), 121.

TWO METHODS FOR DETECTING DOPPLER-FREE INFRARED LASER OPTOACOUSTIC SIGNAL*

TAN GUANRONG, YANG WENXIA, GUO MINGXIA, SUI YAN
(*Department of Electron Science, Nankai University, Tianjin, China.*)

FU RULIAN, KAI GUIYUN
(*Research Institute of Optics, Nankai University, Tianjin, China*)

ABSTRACT

Both the sum and difference frequency methods for detection of the Doppler-free infrared laser optoacoustic signal are discussed. It is discovered that the difference frequency method is better than, or equal to the sum frequency method in terms of decreasing interference of the combination frequency and increasing signal-to-noise ratio when using the same chopping vane for almost all the ratios of chopping hole number F_2/F_1 .

* Project supported by the Fund of the Natural Sciences of China.