



南京光宝技术参数十问 系列

光腔衰荡光谱

光腔衰荡光谱

一、什么是光腔衰荡光谱

1、光腔 (optical cavity)

光腔又称为光学谐振 (频率一致而产生幅值增强的现象) 腔。其通常由两面反射镜形成的一个光学腔体结构。在光腔衰荡光谱法中, 两面反射镜都为高反镜, 一面为参考镜, 另一面为被测镜。光波会限制在腔体内产生多次反射。

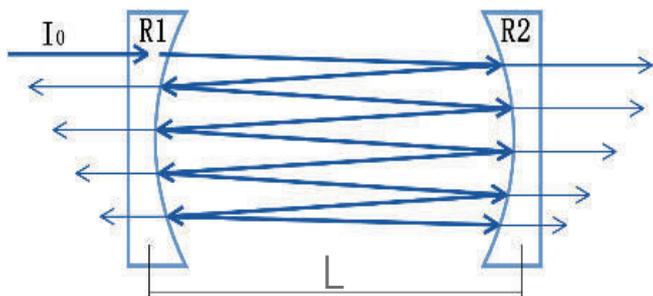


图1 光在光腔中传播示意图

2、光腔衰荡 (Cavity Ring-Down/CRD)

一束光照射进由参考镜和被测镜组成的光腔中, 光会在光腔中多次反射。由于反射镜并不是百分百反射, 有透射和吸收等损耗的影响。光的能量会随时间进行一个衰减。这个过程就叫光腔衰荡。

3、光腔衰荡光谱

(Cavity Ring-Down Spectroscopy/CRDS)

光腔衰荡光谱是一种高灵敏度的光谱技术, 可以通过光的总损耗来精确地确定反射镜的反射率。光腔衰荡光谱又被称为光腔衰荡激光吸收光谱 (CRLAS)。光腔衰荡光谱一般分为脉冲光腔衰荡光谱和连续波光腔衰荡光谱。

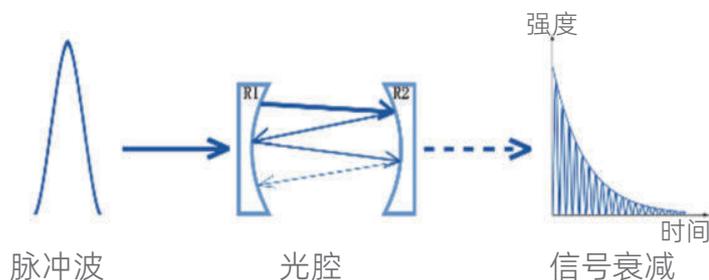


图2 光腔衰荡光谱示意图

二、什么是光谱仪

光谱仪 (spectrometer) 是一种科学仪器, 用于分离和测量物理现象的光谱分量。

其所测量的变量通常是光的强度, 但也可以是例如偏振状态。光谱仪主要由光源、色散组件 (棱镜或光栅) 和探测器组成。用光电探测器接收色散信号的光谱仪同时被称为分光光度计。

对于一般光学元件的反射率测量中, 常用商用光谱仪直接测量反射光谱, 测量精确度往往依赖于仪器本身的精确度。

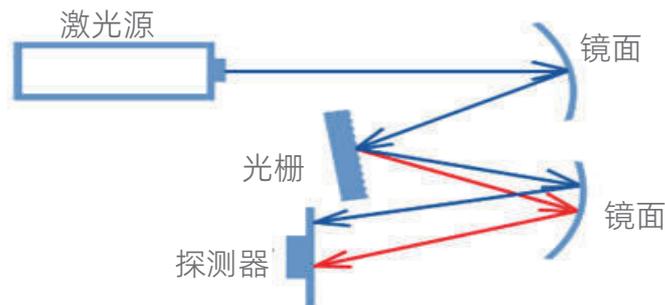


图3 简易光谱仪示意图

三、光腔衰荡光谱的设备是什么

光腔衰荡光谱测量所使用的设备称为光腔衰荡光谱仪。光腔衰荡光谱仪与一般光谱仪有一些区别, 其包含一个用于高精度光腔的激光光源、构成光腔的两面高反镜和探测器。

光腔衰荡光谱仪测量的是光强衰减为初始强度的 $1/e$ 所需要的时间, 这个时间被称为“衰荡时间”可以被用来计算系统的总损耗。

四、光腔衰荡光谱的测试方法是什么

- 将光腔的两面镜子分别设置为参考镜和被测镜;
- 将激光器的激光 (脉冲/连续) 引入光腔, 通过反射镜的反射, 往返光线因多次相长干涉 (频率相同、振动方向相同、相位差恒定的光的叠加增强) 迅速增强;
- 之后将激光迅速切断, 使用放置于反射镜后的探测器探测从腔中逸出光强的衰减程度;
- 通过衰荡时间来计算相应的激光往返一次的总损耗;
- 更改参考反射镜多次测量, 确认被测反射镜的损耗, 以获得被测反射镜的反射率及其反射光谱。

五、光腔衰荡光谱的技术原理是什么

以脉冲光腔衰荡光谱法做说明。脉冲光被限制在空的光腔中做多次反射，因吸收和散射造成光束能量的衰减，其总损耗已被证明为与时间相关的指数函数。

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

在上式中， $I(t)$ 为在 t 时刻的光强； I_0 为初始光强； t 为激光器被切断的瞬间后光束限制在腔内反射的时间； e 为自然常数，其值约为2.718； τ 为衰减时间常数，表示为 $I(t)$ 衰减到 I_0 的 $1/e$ 所需的时间，其值取决于腔内的反射镜的损耗和其它的一些光学损耗如散射等。 τ 用数学式可表示为：

$$\tau = \frac{n}{c} \cdot \frac{2L}{\alpha}$$

在上式中， n 为腔内的折射率，一般情况下为空气，则 $n=1$ ； c 为真空中的光速，其值为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ； L 为腔体长度，即两面反射镜中心的距离； α 为系统往返一次的总损耗（包括两面反射镜的透射损耗、吸收损耗和散射等其它光学损耗），即我们关心的值。

总损耗包括两面反射镜的透射损耗、吸收损耗和散射等其它光学损耗，若假设两面反射镜的反射率 $R_1=R_2=R \sim 1$ 时，由 $I(t) = I_0 (R_1 R_2)^{\frac{n \cdot 2L}{c}}$ 可确认总损耗：

$$\alpha = -\ln(R_1 R_2) \approx 2(1 - R)$$

但我们还有一种更精确的测试方式。

假设有三面反射镜， M_1 、 M_2 和 M_3 。 M_1 和 M_2 为参考反射镜， M_3 为被测反射镜。通过上述方法我们可以获得 M_1 和 M_2 的总损耗 α_{12} ， M_2 和 M_3 的总损耗 α_{23} ， M_1 和 M_3 的总损耗 α_{13} 。由此可以很简单地得出被测反射镜的单镜损耗为：

$$\alpha_3 = \frac{1}{2}(\alpha_{23} + \alpha_{13} - \alpha_{12})$$

由上式，我们就可以获得一个准确率极高的反射率及反射光谱。

六、光腔衰荡能测试的精度在多少

高反射率和透过率值在99.5-99.9999%的范围内是由空腔衰荡时间测量确定的。误差范围通过此方法可以做到极小，例如 $R=99.995\% \pm 0.001\%$ （分辨率为 10^{-5}cm^{-1} ）。通过设置，脉冲法的分辨率可以达到 10^{-6} - 10^{-9}cm^{-1} 。连续法优于脉冲法可以达到 10^{-7} - 10^{-12}cm^{-1} 。在相同方法下，反射镜的反射率越高，测量精度则越高。

七、光腔衰荡光谱为什么有极高灵敏度

1、光程大

光程是光在光学介质中传播的路径。由于两面高反射率反射镜的作用，光腔中的有效光程长度可达几公里。在反射镜测量中，可以检测到的最小量与光穿过光腔的长度成正比。由此可用较短的光腔获得极高灵敏度的损耗测量精度。

2、仅由衰荡时间决定

光腔衰荡光谱的测量仅与衰荡的时间有关而无需关注光源的脉冲（连续）激光特性。在一般的光谱测量中，光源的强度波动会一定程度地影响光谱的准确度。但光腔衰荡光谱测试中，衰荡呈现 e 指数的形式与光源强度无关。

八、高反膜为什么不能使用直接光谱法

若直接使用光谱仪（分光光度计）进行反射光谱测量，测量结果的误差范围依赖于仪器的分辨率。常用光谱仪直接测量反射率的误差范围在 $\pm 0.5\%$ 左右。如果在干扰极低的情况下使用较优质的光谱仪，误差范围可以降到 $\pm 0.1\%$ 左右。通常情况下，一般误差在 $\pm 0.2\%$ 左右。对于低反射率的反射镜可以说足够了，但对于99.5%及以上反射率的高反镜来说，就算是0.1%，也可以说是极大的差别。其中透过或不透过的差异可能就小于0.1%。其差异可能就会导致仪器性能下降和安全问题，甚至导致整个系统的不可修复的损坏。

所以，对于99.5%反射率以上的高反镜，应使用较高精度的光谱测量方法，如光腔衰荡光谱法进行反射率的测量。

九、光腔衰荡光谱法的限制是什么

1、获取光谱速度较慢

光腔衰荡光谱法使用的是单色激光源进行一定时间的衰荡进行反射率测量，对于连续波长范围下的反射光谱，光腔衰荡光谱法无法快速获取。但是，必须说明的是，一些团队正在研发使用宽带LED光源或超连续光源进行测量并部分已在近紫外到中红外范围得到了证明。除此之外，频率捷变快速扫描（FARS）光谱技术已被用来改善影响光腔衰荡光谱法采集速率的机械或热频率调谐，使光腔衰荡光谱法的采集效率较传统提高了2个数量级。



2、受到波长限制

光腔衰荡光谱法既受到波长可调谐激光的可用性的限制，也受到这些波长下高反射镜的可用性的限制。

3、费用高

因光腔衰荡光谱法需要较高的反射率的反射镜和高标准的激光系统使其比其它方法贵几个数量级。

4、只能用于高反镜测量

对于低反射率的反射镜，光腔中可能甚至不能产生共振。光腔衰荡光谱法无法确定低于99.5%的反射率值。

十、使用光腔衰荡光谱法需要注意什么

1、清洁度

对于光腔衰荡光谱法中，光腔腔镜的反射率十分重要，其影响系统的准确度。而清洁度会严重影响反射镜或系统使其反射率降低和其损耗增加。因此，光腔衰荡光谱测量通常需要在无尘实验室中进行。

2、反射率足够高

因低反射率镜可能导致光腔衰荡的过程无法进行，所以被测镜需大于99.5%。若低于99.5%，建议直接使用直接光谱法测量。除此之外，参考镜也需要尽量高的反射率以提高系统的准确率。

3、多参考镜

因单次测量的数据是两片反射镜共同的损耗，为确保数据准确，需要至少两片参考镜参与光腔衰荡光谱测量。

参考文献

[1] Cavity ring-down spectroscopy. https://en.wikipedia.org/wiki/Cavity_ring-down_spectroscopy, 2021

[2] Spectrometer.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrometer>, 2021

[3] V. P. Gupta, Yukihiko Ozaki. Molecular and Laser Spectroscopy. Elsevier, 2020

[4] Ian Stevenson, Cory Boone. Spectroscopy and Optics: Laser mirrors: High reflectance is measured best with cavity ring-down spectroscopy. Laser Focus World, 2019.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

