

外腔谐振技术及其应用

王乃光

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学实验室)

提 要

本文叙述了连续单模染料激光在外腔谐振中增强的原理,外腔的构成,介绍了外谐振腔在无多普勒光谱测量中的应用,特别在单模连续染料激光倍频中,应用这种外谐振腔使倍频转换效率提高百余倍。

关键词: 外谐振腔,连续染料激光倍频,外谐振器光谱法。

一、简单原理

如图1所示,当一个单模连续的染料激光耦合到一个无源的谐振腔(简称外谐振腔) M_A 、 M_B 、 M_C ,调整无源腔的腔长,光就在此腔内发生振荡,这时在腔内的光强将增加到外面入射激光强度的几十倍到百余倍。对于一个没有任何增益介质的无源腔,在腔内光强达到如此之强初看起来似乎难以理解,其实它与能量守恒定律并不矛盾。它是外来激光在此无源谐振腔内累积的结果。斯托克斯(Stokes)定律^[1]认为(如图2(a)),如果入射光 I_i 射到一个物质界面上时,就会有一个反射光 I_r 和透射光 I_t ,如果另有两束光(图2(b)), I'_r 和 I'_t ,它的光强分别等于 I_r 和 I_t ,只是方向相反地入射到这个界面上,并且在界面上的相位要保持和图2(a)的情况一样*,这时就发生一种特有的现象,光线 I'_t 将无反射地全部透过此界面,而光线 I'_r 将无透射全部反射,构成在同一界面两侧发生光的单相流动现象。外腔内光强增强的现象正是利用这一原理产生的。当满足斯托克斯定律关系时,图1中反射镜 M_A 对 I_i 的

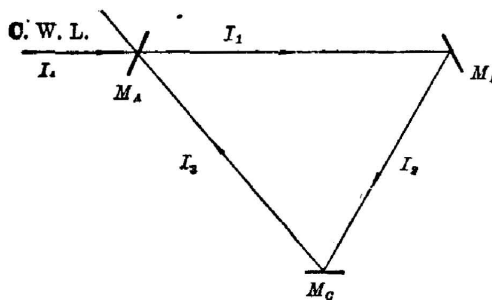


Fig. 1 Schematic diagram of an external resonant cavity

CW. L.: CW laser
 M_A : entrance mirror
 M_B, M_C : total reflectors

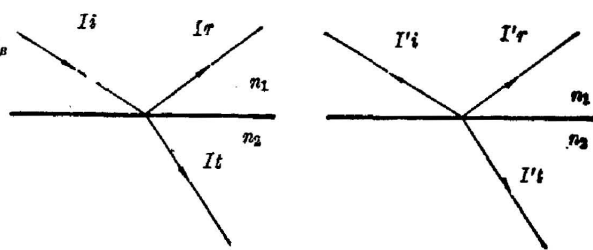


Fig. 2 Schematic diagram for illustration of Stokes law

收稿日期: 1986年8月21日; 收到修改稿日期: 1986年10月20日

* 我们是利用在本文第二部分所讲的稳频技术来保持这种相位关系。

光全透,对 I_3 的光全反射。此时,腔外的连续激光几乎无反射地透入腔内,而腔内的光几乎不能透出 M_A 镜,在腔内完全反射循环,使光只进不出,当腔内的振荡光与损耗达到平衡时,外谐振腔内的光强会几十倍到上百倍地强于输入光。

腔内的光究竟能达到多强,它和哪些因素有关呢?具体计算如下:在图 1 中假定 M_A 镜的反射率是 R_A , M_B 镜的反射率是 R_B , M_C 的反射率是 R_C ,入射的连续激光的光强是 I_i ,那么它穿过 M_A 镜进入腔内的光强是 $I_i(1-R_A)$ 。假定腔内的总损耗是 γ ,令

$$\Gamma = R_B \cdot R_C (1 - \gamma), \quad (1)$$

当输入到腔内的激光强度正好等于腔内振荡光所损耗的部分时,此时腔内的光强达到一个稳定的强度,根据光的电矢量强度迭加关系有

$$\sqrt{I_1} = \sqrt{I_i(1-R_A)} + \sqrt{I_3 R_A}, \quad (2)$$

式中 $\sqrt{I_i(1-R_A)}$ 为激光透过 M_A 镜的光电矢量强度对 I_1 的贡献, $\sqrt{I_3 R_A}$ 为 I_3 光经 M_A 镜反射后的电矢量强度对 I_1 的贡献,利用 $I_3 = \Gamma I_1$ 我们从(2)式得到增益系数 A 为

$$A = \frac{I_3}{I_i} = \frac{\Gamma(1-R_A)}{(1-\sqrt{R_A \Gamma})^2}, \quad (3)$$

由公式(3)可以看出,当输入镜的反射率 R_A 等于腔的 Γ 值时 A 取极大值。如果 $R_A = \Gamma = 90\%$,那么 $A \approx 10$,即腔内的光强是腔外的十倍。如果 $\Gamma = R_A = 99\%$,那么 $A \approx 100$,即腔内的光强是腔外的 100 倍。一般情况下,腔内有插入元件时, $A=10$ 是容易达到的。作者曾在西德 Kaiserslautern 大学做了一个两个反射镜的直线谐振腔,在腔内焦点处以布儒斯特角形式放置一块 1 mm 厚的石英片,腔内的光强达到输入光强的 40 倍(即 $A=40$)。

二、外谐振腔的构成和稳频技术

外谐振腔有直线腔和环形腔。直线腔是由两个反射镜组成的,如图 3 所示。通常情况

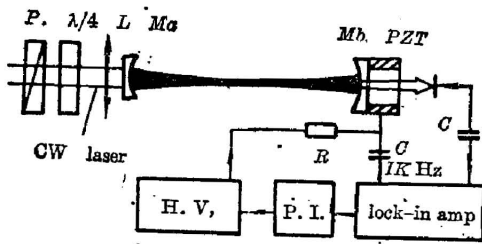


Fig. 3 Schematic diagram of a linear external cavity and frequency stability system

下 M_A 、 M_B 两镜的曲率半径是一样的,这样构成的一个共焦腔,其腔长等于镜子的曲率半径, M_B 镜的反射率一般在 99.5% 以上。由实验得知, M_B 镜只要有 0.1% 的透过光就可以供稳频系统作为反馈的控制信号。输入镜 M_A 的反射率 R_A 要根据腔的 Γ 值来定,其原则是选取 $R_A = \Gamma$ 。由于腔内要插入一些光学元件,所以 Γ 值要实际测出。测量方法是先任选一个 M_A 镜,其反射率是 R_A ,这时按图 3 组成一个线性

腔,当腔达到谐振时 M_B 镜后面的光电管测出一个光强值 Q_R ,然后,移去 M_C 镜,将激光直接照到 M_B 镜上,测出透过 M_B 镜的光强 Q_L ,那么谐振腔的实际增益系数 $A = (Q_R/Q_L)$,测出 A 值后,就可以由(3)式求出 Γ 的值。选取 M_C 镜的反射率等于 Γ 值,此时腔内的振荡将是最强。

由于线形腔耦合镜的反射光和入射光共线,这样会发生光反馈现象而使激光器不稳定。为此,在耦合镜的前面加一个用压力调谐的 $(\lambda/4)$ 波片和一个偏振片组成的光定向器,以防

止光反馈,如图3所示。

外环形腔有由三个反射镜组成的三元腔和由四个反射镜组成的八字环形腔两种。由于三元腔的腔镜上的入射光和反射光的夹角很大,结果 x 平面和 y 平面焦点位置差很大,这种象差将使谐振腔难以稳定。因此,三元腔现在很少有人采用,而广泛应用的是四反射镜的八字形光路的环形腔。这种腔可以使每块反射镜上的光线入射角很小,这样就大大地减少了象差,束腰的光点圆而小,腔可以数小时稳定振荡。八字腔的设计比较复杂,文献[2]已叙述。

关于稳频系统有两种方法,一种是用压电陶瓷 PZT 对腔片加一个被动的 1kO 振动的微分稳频法;另一种是通过分析由耦合镜反射回来光的偏振状态达到稳频。前一种方法的原理是利用对腔的某一个纵模波形微分,如图4(a)所示,图中画出的是腔的两个纵模,把这个纵模微分就得到图4(b)的形式。可以看到,纵模的峰值处是微分值过0处,其峰的左半部微分值是正值,右半部是负值。用这个微分的信号就可以控制腔的长短,使腔长稳定在模的峰值处。另一种稳频方法,如图5所示^[3]从耦合镜反射回来的光是椭圆偏振光,然后再经 $(\lambda/4)$ 波片转 45° 角,再由偏振分束器 P. B. S. 分成水平偏振和垂直偏振的两束光,分别由光电管接收送到差分放大器,再经积分器 P. I. 和可控高压电源 HV 来控制压电陶瓷 PZT,转动腔内的布儒斯特偏振片 B. P. 片使腔内光的偏振方向和入射激光的偏振方向成 $\theta=45^\circ$ 。我们实际组装了这种控制光路发现它比微分稳频法响应快,可是腔内的光强只有微分稳频法的一半,但是用这种办法在染料激光器参考腔中产生误差稳频信号是很理想的。

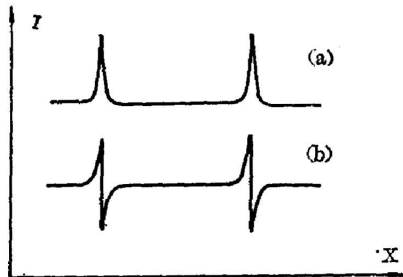


Fig. 4

- (a) The longitudinal mode of external cavity
(b) The differential signal of longitudinal mode

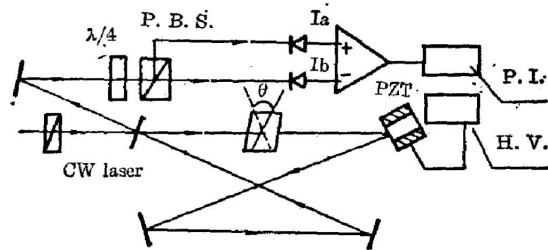


Fig. 5 Schematic diagram of frequency stabilizing system with controlled cavity length by reflected light from a coupling mirror

三、外谐振腔的应用

连续可调谐激光倍频常见的方法是把激光直接聚焦到倍频晶体上,用效率高的 LiIO_3 倍频晶体,1W的染料激光也只能产生 $100\mu\text{W}$ 的紫外光输出。这样弱的光在某些实验上是不行的,特别是在分子束上作激光激励光源就太弱了。我们使用外腔谐振技术增强染料激光的强度,达到了提高紫外光输出的目的。下面介绍作者曾做的一个八字环形腔^[2],如图6所示 M_1, M_2 是作引导镜用,它们使染料激光很好地耦合到环形腔中去。这里要求耦合光束的束腰大小等于腔中相应的束腰,并且位置要重合。为此要反复调正 M_1, M_2, M_3 镜的

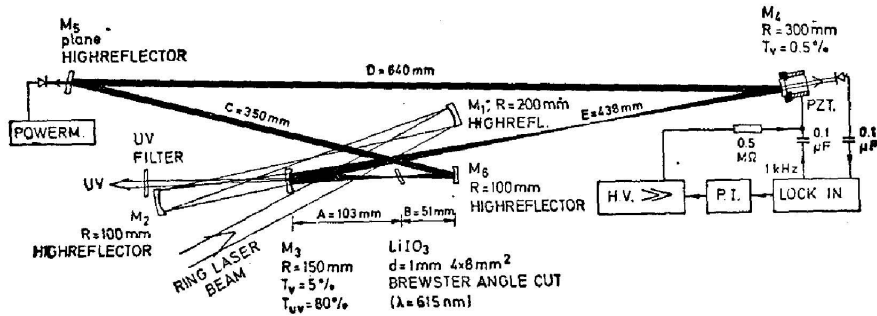


Fig. 6 Experimental set up for optical frequency doubling of a single mode dye laser in an external ring resonator

相对位置以达到上面提出的最佳耦合条件。一块 $d=1\text{ mm}$ 通光面积为 $4\times 8\text{ mm}^2$ 的 LiIO_3 晶体放在 M_3 镜和 M_4 镜之间的束腰上。束腰的直径是 $25\ \mu\text{m}$, M_3 是一个特制的耦合镜, 其透过率在可见区内是 $T_v=5\%$, 对紫外光的透过率 $T_{uv}=80\%$, 这个镜既是染料激光的输入耦合镜, 又是倍频光的输出镜。 LiIO_3 晶体以布儒斯特角切割的, 并以角度匹配实现倍频的。为实现腔内角度匹配要求晶体转动时不影响腔内光程。作者选用 Majewski^[4] 提出的晶体在布儒斯特平面内转动达到相位匹配的方法。实验测得在此环形腔内的光强是输入染料光强度的十多倍。由于倍频晶体的倍频效率和基频光强的平方成正比, 所以紫外光的输出就可以提高 100 多倍, 我们实测的结果也这样^[5]。本文采用前面所述的微分稳频系统, 即 Lock-in 的办法, 它能使得整个谐振腔随着染料激光的波长扫描而随动扫描, 输出的紫外光以基频光倍频的形式亦跟随调谐。整个谐振腔工作稳定, 这是一个理想的染料激光的倍频器。如果在染料激光器腔内倍频, 整个激光器需大改动, 而倍频晶体只能放在第二束腰处, 此束腰比较大, 这就对倍频不利; 此外, 在激光器腔内插入倍频晶体会降低激光的能量。最佳情况下, 其结果与外腔倍频的效果相当, 有时还不如外腔倍频。外腔倍频器比较灵活, 它可以作为染料激光器的一个附件。倍频时把此外腔倍频器附件插入就可以; 不需倍频时, 染料激光器照样可以正常工作。

外腔谐振技术增强光强在光谱测量中也广泛应用, 如在分子束激光诱导荧光的实验中, 分子束的密度很低, 总希望有强的激励光源, 用外腔谐振技术来增强激励光是有效的方法。因为在真空中腔内的损耗很小, 腔片可以用真空波纹管连接, 形成在真空室内的外谐振腔。

直接把具有布儒斯特窗的样品池放在外谐振腔中, 可以大大提高样品分析的灵敏度^[5]。

另外直线谐振腔可以做无多普勒光谱的工作, Herlemont 等人用外谐振腔做了 SF_6 的无多普勒双光子吸收光谱的工作^[6]。

四、讨 论

外谐振腔已广泛地应用到激光光谱学的很多方面, 但是它仍有很多局限性, 它不仅对反射镜要求反射的波段范围宽广, 且要求整个腔安装在稳定的防震台上, 通常在花岗岩的台板上安装反射镜*。此外, 外谐振腔严格要求输入的激光必需单模。若输入激光器一旦发生跳

* 也可以用钢架组装机谐振腔, 但造价更昂贵。

模,外谐振腔就停振。但是,上面提到的这些条件,现代光学技术是可以达到的。

参 考 文 献

- [1] 母国光,战元令;《光学》(高等教育出版社,北京,1978),216
- [2] N. Wang, U. Gaubatz; *Appl. Phys. (B)*, 1986, **40**, No. 1 (May), 43~47.
- [3] T. W. Hansch, B. Couillaud; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, No. 3 (Dec), 441~444.
- [4] W. A. Majewski; *Opt. Commun.*, 1983, **45**, No. 3 (Apr), 201~207.
- [5] W. Demtroder; *Laser Spectroscopy*, (Springer Verlag, Berlin, New York, Heidelberg, 1982), 391.
- [6] F. Herlemont, *Opt. Commun.*, 1984, **49**, No. 5 (Apr), 329~334.

External cavity and its applications

WANG NAIGUAN

(Laboratory of Laser Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 21 August 1986; revised 20 October 1986)

Abstract

The paper reports the enhanced mechanism of a dye laser in an external resonant cavity and its construction. The applications of an external resonant cavity in Doppler-free spectroscopic measurement and in frequency doubling of a single-mode CW dye laser are introduced. We achieved a conversion efficiency of frequency doubling over 100 times the original level by using the cavity.

Key Words: external cavity; frequency doubling of CW dye laser; spectroscopy of external cavity.