

体流量 V 约为 95ml/min. 从图中可以看出, 在实验范围内, σ_p 和 σ_D 都随 d 的增大而变小, 但两者的比率却基本上保持不变. 据此, 要获得大的 σ_p 应取较小的电极距离; 而欲获得较高的暗电阻率, 则需取较大的电极距离.

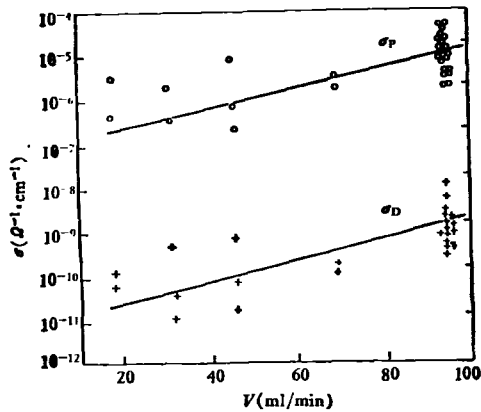


图5 气体流量 V 与室温 σ_p 及 σ_D 的关系 (σ_p 是在 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的单一光照射下测得的)

图5表示气体流量 V 与室温 σ_p 及 σ_D 的关系. 其它制备条件为: T_d 约为 450K, d 为 2cm. 从图中可以看出, 在这些条件下, σ_p 和 σ_D

皆随 V 的增大而变大, 同时比率 σ_p/σ_D 基本保持不变. 据此, 我们可通过调整 V 来得到不同的薄膜.

除上述所示的有关工艺参数对 σ_p , σ_D 以及 σ_p/σ_D 有影响外, 本实验过程中还发现放电功率的大小也有明显的影响. 例如, 在大的功率条件下所得薄膜一般性能较差.

本项工作得到陆大荣副教授、陈友鹏、马洪磊老师及余亦舜、郭青长、刘继田等同志的大力支持和帮助, 在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] D. E. Carlson et al., *J. Electr. Mater.*, 6(1977), 95.
- [2] P. J. Zanzuchi et al., *J. Appl. Phys.*, 48-12 (1977), 5227.
- [3] A. Madan et al., *Appl. Phys. Lett.*, 37-9(1980), 826.
- [4] N. F. Mott and E. A. Davis, *Electr. Processes in Non-Crys. Materials*, Second Edition, Oxford University Press, (1979), 365.
- [5] Ref. [4], 257.

连续染料激光器的稳频

傅 济 时

(北京大学无线电系)

连续波染料激光器是目前唯一在整个可见光谱区内波长能连续可调的连续波激光器. 经十余年的研究, 其性能有了很大改善, 现已成为在可见光谱区内光谱学的重要工具, 而且在其它科学技术领域例如激光化学、同位素分离等等也得到了广泛的应用. 但是, 作为激光光谱学的光源, 不经稳频的染料激光器, 其频率稳定性较差, 例如商品环形染料激光器秒级峰-峰频率波动约为 20MHz, 漂移就更大, 远不能满足高分辨率激光光谱学的要求. 但经稳频后用于激光光谱学, 其分辨率可优于 10^{-10} , 大大超过

传统光谱学的分辨率; 而它可能得到的极高频率稳定度^[1], 使人们自然把它视为未来激光频率标准的最佳候选者.

目前作为高分辨率激光光谱仪的染料激光器, 其长期频率稳定性和准确度同碘分子(或甲烷)饱和吸收稳频的氮氟激光器 (10^{-12} 量级) 相比, 其绝对频率漂移率 $\leq 1\text{kHz}/\text{min}$, 连续扫频范围宽达 900MHz, 步进分辨率为 1kHz, 谱线线宽为 2kHz^[2]. 下面就连续染料激光器的稳频及高分辨率激光光谱仪的几种稳频方案作一简要介绍.

一、连续染料激光器的频率稳定

1. 连续染料激光器的噪声谱

目前得到广泛应用的是连续喷流染料激光器,它通常有较大的频率抖动,其频谱分布于直流至数百千赫的范围,且低频抖动的幅度较大。高频抖动的主要原因是:①喷流染料的快速运动。②抽运氩离子激光器的功率涨落。③染料喷流表面的不规则及其气泡、杂质粒子的影响,抖动频率约为不规则之染料喷流通过抽运激光光束束腰所需时间的倒数,所以其谱密度主要在100kHz以下的频域,高于100kHz则急剧下降。但如染料特别脏,则涨落谱密度的峰值可出现于较低频率例如50kHz处,且此峰值频率随染料泵压的增高而线性增大。而低频涨落则主要是:①抽运激光功率的慢速涨落;②染料喷流的不稳定及环境气压、温度、湿度的变化,外界的振动、干扰等所致。幅度(光强)的涨落亦有类似的谱分布^[3]。

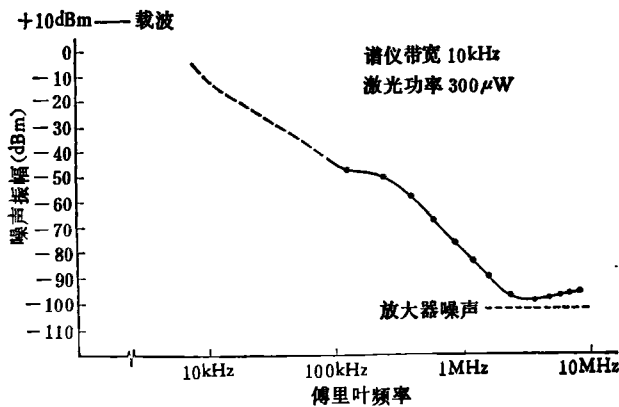


图1 环形染料激光器的振幅噪声谱密度

2. 连续染料激光器的外腔稳频

染料激光器可锁频于原子(分子)谱线一侧或中心,但为使频率连续可调,通常以一个可调高稳定度干涉仪作为参考腔,将染料激光器锁频于透过曲线中心以改善频率稳定度;为此可调制激光器或参考腔的频率,利用相敏检波器检测透过光强的振幅调制,在调制振幅较小时,经相检波可得参考腔透过曲线的微商线形,从

而可将激光器频率锁于透过曲线的中心频率处。也可利用参考腔的反射光所产生的色散线形的误差讯号将激光频率锁于参考腔的谐振频率^[4]。但前者电路较复杂,且环路的响应速度较慢、同步带较窄,后者虽可获得较大的锁频同步带,但光路较为复杂。最常用的方法是利用

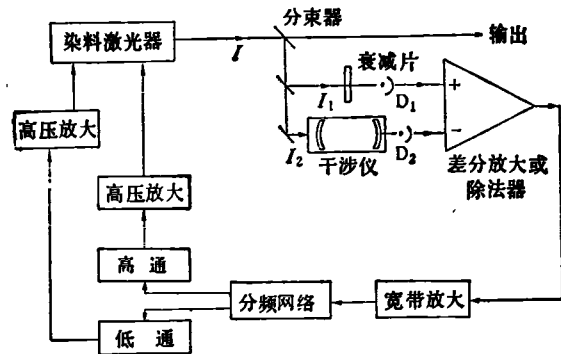


图2 连续激光器差分外腔稳频方块图

无调制的快速差分技术将染料激光器频率锁于参考腔透过曲线斜率最大处,其方块图如图2所示。其中参考腔有商品出售也可自制^[5],为获得较高的鉴频率,通常采用高精度的干涉仪,为防止跳模,美国光谱物理公司生产的S-P380D则采用两个低转细度的干涉仪。染料激光器经分束器,一路经衰减器由光电二极管 D_1 检测,一路则经干涉仪由 D_2 检测,然后分别送入差分放大器(或高速除法器)二端,放大后的输出即可作为伺服控制电压对染料激光器进行锁频,调整控制电压的直流电平(采用差分放大时可调 D_1 输出大小,采用除法器时则可调节其直流偏置电平)以调整染料激光器的锁定工作点。

采用差分比较或使二路讯号相除,是为了避免光强涨落导致 D_2 输出的变化造成错锁或乱纠偏,因染料激光器光强变化 dI 可导致的频率误差为

$$d\nu = (dI/I)(\Delta\nu_{\text{FPS}}/2), \quad (1)$$

其中 I 为染料激光器的输出光强, $\Delta\nu_{\text{FPS}}$ 为参考干涉仪透过曲线半高宽度,例如 $\Delta\nu_{\text{FPS}} = 2.5$ MHz, $dI/I = 10\%$,则 $d\nu = 125$ kHz,所以,

不采用上述办法就需使染料激光器光强高度稳定,方可获得较高的频率稳定度。

对染料激光器高频的频率抖动,采用腔内电光晶体相位调制器(KDP或ADP)最为理想;因它没有任何形式的机械运动,其频率响应可高达数百兆赫。但由于其光学性能及插入损耗往往使它无法应用于低增益或高功率激光器中,为此有人设计了一种快速响应的压电陶瓷(PZT)驱动系统^[6],其响应可高达数百千赫。主要措施是通过弹簧将振动部件与镜架相连,避开了系统与镜架的机械共振,而振动部件由两块同样的镜片及PZT相对安装于一块蓝宝石两面。这样,二镜片作为整体快速振动,其质心相对保持静止。为了提高镜片的频率响应,镜片直径为6mm、厚为2mm,PZT用直径为6mm、厚为0.5mm的薄片,且四周充填钨橡胶吸声以减小机械Q值并增宽频应。设计的系统最低径向共振频率为490kHz,最低纵向共振频率则为350kHz。

作为低频伺服环路(<10kHz)的控制元件(PZT或插在腔内的电流计驱动石英平板)则应有较大的运动范围以伺服控制染料激光器低频的幅度较大的频率变化,所以需电调率大一些的PZT。

染料激光器外腔稳频中还必须解决的一个重要问题是跳模问题。由于参考腔相间一个自由光谱区就有一透过曲线(纵模),染料激光器频率的跳模或较大频率抖动可能导致从外腔某一透过曲线的锁定点跳至相邻透过曲线的锁定点,故防止跳模十分重要。为此,除可采用外腔反射光色散效应稳频方法外,在利用透过曲线稳频时还可:(1)在伺服环路上想办法,例如同时采用一辅助腔,此腔有较大自由光谱区及较低的精密度,染料激光器跳模后也跑不出其透过曲线。正常锁频时,它锁于激光频率(此时激光频率则锁于另一高稳参考腔),而当激光有跳模时它可作为一个记忆元件,将激光频率锁至跳模前的频率,当激光频率返回高稳参考腔锁频捕捉带后,环路自动转换,染料激光器重新锁于原参考腔的锁定点。(2)使染料激光器频率预

稳,减小其频率抖动及跳模,方法是用 $\phi 0.8\mu\text{m}$ 的过滤膜对染料进行精细的过滤,滤除其中的杂质。减小染料喷流中的气泡含量,为此,染料循环泵宜长期连续运转(即使激光器不工作)。另外,在染料送至加压泵前,先在预真空中减压使气泡膨胀破裂,这样因气泡所致较大幅度的快速频率变化仅约10s一次,对这种变化可不去管它。(3)减振、防止外界振动的干扰。染料激光头加罩隔声,例如在光学平台上采用气垫隔振,并将染料激光器装于气密的木箱内,这样其线宽可从5—10MHz减至2MHz^[7]。(4)稳定抽运氩离子激光器的抽运功率。

3. 连续染料激光器的功率稳定

从(1)式可知染料激光器光强的稳定性直接影响到稳频性能,虽在稳频电路中可用多种方法予以解决,但在激光器实际应用时,其功率的稳定也很重要,最简单的方法是利用光电器件,将光强的变化变为电压的变化,以此作为误差讯号去控制抽运激光器的放电电流,从而使抽运功率变化来稳定染料激光器的光强,采用这种方法约可得1%左右的稳定度。更好的方法是利用电光效应直接控制抽运光强或染料激光器的光强^[8],其稳定度可达 10^{-4} — 10^{-5} 。随光强稳定方案的不同,染料激光器的稳频方案也有所不同。

二、高分辨率染料激光光谱仪

作为高分辨率激光光谱仪,不仅需其光源(染料激光器)具有频率的高度稳定性(线宽窄)而且需在较大范围可连续调谐、调节精度严格可控。采用外腔稳频可得100kHz的分辨率^[9](5×10^{-9}),更高分辨率的染料激光光谱仪目前可行方案有两种,分别介绍如下。

1. 计算机控制偏频锁定的染料激光光谱仪

这种方案同偏频锁定的氩氦激光光谱仪类似,由于采用偏频锁定,其长稳取决于参考频率标准(例如取决于 I_1^{27} 饱和吸收稳频的氩氦激光器),而扫频步进精度、扫频范围、扫频次数等均可独立选择,具有优异的频率复现性,可以多

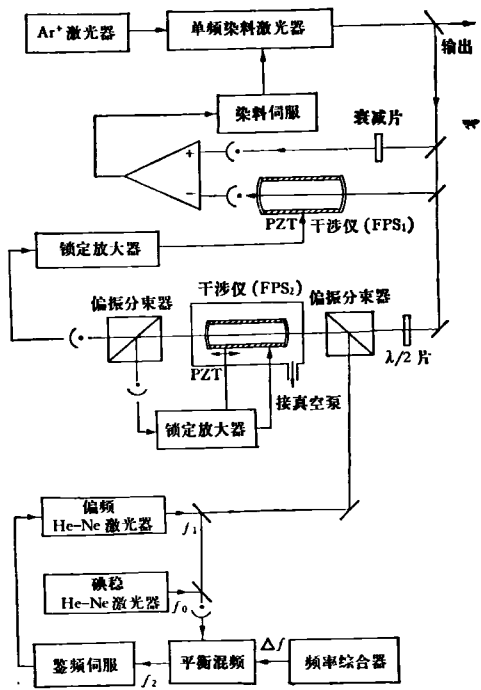


图3 偏频锁定的染料激光光谱仪

次扫频对时间平均取得较高的信噪比，因此宜于检测弱讯号^[2,10]。图3是其原理方块图，为抑制染料激光器的频率抖动，首先将它锁于一高精度干涉仪(FPS₁)透过曲线一侧斜率最大处，图中采用差分比较方法以避免光强不稳的影响。伺服环路采用分频伺服控制方案，低频环路时间常数 $\tau = 100\text{ms}$ ，有较宽的伺服控制动态范围，而高频环路 $\tau = 100\mu\text{s}$ ，采用PZT驱动的反射镜或用ADP晶体作为控制元件。为使染料激光器频率具有高度复现性，从而可进行多次测量取其时间平均，又使此干涉仪锁频于I₂²⁷或I₂²⁹稳频的氦氖激光器。采用的方法是偏频锁定；设I₂²⁷稳频的氦氖激光器频率为恒定的 f_0 ，偏频氦氖激光器频率为 f_1 ，计算机程序控制的频率综合器输出频率为 Δf ，将 f_0 与 f_1 之激光共同聚焦于一高速光电二极管上，检出其拍频 $|f_0 - f_1|$ 讯号。此拍频讯号同综合器的频率 Δf 的讯号经平衡混频后变为某一低频 f_2 的讯号。再经 f_2 的鉴频器取得误差讯号使偏频激光器频率锁于 $f_1 = f_0 + \Delta f$ 。所以只要综合器的输出频率 Δf 改变，则偏频激光器

物理

频率随之改变。为将偏频频率转换于染料激光器，又利用了一个传递干涉仪(FPS₂)。将偏频激光注入FPS₂，对FPS₂加以调制或利用偏频激光器的低频调制(因I₂稳频的参考激光器采用谐波稳频技术，故其频率 f_0 有低频调制)，可将FPS₂透过曲线中心锁频于 f_1 (保持FPS₂的腔长对偏频激光器有最大透过率)。再将染料激光器激光同时注入FPS₂，其透过光强经光电二极管检测后送于相检波器，取得误差讯号可用于使FPS₁锁频于FPS₂，亦即 f_1 上。显然在FPS₂抽真空的情况下，染料激光器与偏频激光器的频率变化有下述关系：

$$df_{\text{dye}}/df_{\text{He-Ne}} = \lambda_{\text{He-Ne}}/\lambda_{\text{dye}}, \quad (2)$$

其中 $\lambda_{\text{He-Ne}}$ 及 λ_{dye} 分别为偏频激光及染料激光在真空中的波长。由于利用了传递腔FPS₂，从而极大地改善了染料激光器的长稳及复现性，特别是染料激光器输出光束方向角漂移所致的假频移(造成染料激光器与FPS₁模不匹配)。其扫频范围仅受偏频激光器增益曲线所限，约为1GHz。这种方案是目前染料激光光谱仪中较先进的一种，由于采用了微处理机控制，谱仪参数可按测量要求加以选取，数据贮存、记录等均可自动进行，但系统复杂，所需设备较多。

2. 射频调制边带稳频的染料激光光谱仪^[11]

同上述方案相比，这是一种较简单、经济的方法，只需一台I₂稳频的氦氖参考激光器、一个参考干涉仪和一射频电光调制器。其方块图如图4所示。染料激光的一部分被送至电光调

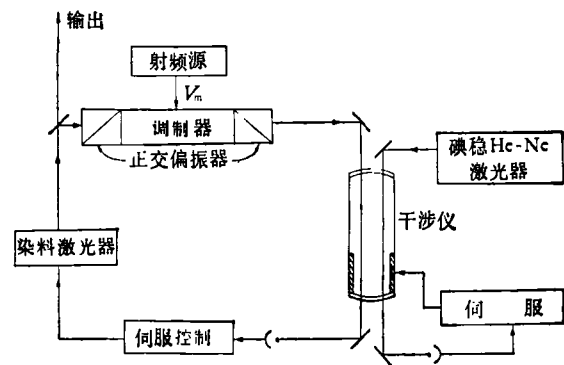


图4 边带稳频染料激光光谱仪的方块图

制器,此调制器由两块正交偏振棱镜(如染料激光是很好的线偏振光则可不用起偏镜)及一块KDP或ADP晶体制成,输出光强为

$$I = I_0 \sin^2 \delta / 2, \quad (3)$$

其中 I_0 为入射至起偏镜的光强, I 是从检偏镜透过的光强, δ 为相位差, 对线性电光调制而言:

$$\delta = \pi \cdot V / V_{\lambda/2}, \quad (4)$$

其中 $V_{\lambda/2}$ 为晶体在使用波长下的半波延迟电压, V 为外加调制电压. 调制电压为零时, 检偏镜的透出光强最弱, 随着所加电压 $V = V_m \sin \omega_m t$ 的变化, 检偏器输出光强亦变化, 即实现了光强的调制, 从而使出射光有 $f_0 \pm f_m$ 的边带. 参考腔锁频于参考激光频率, 如果染料激光器的 $f_0 \pm f_m$ 之二边带有一个可透过参考腔, 则可将此边带锁至参考腔透过曲线一侧的斜率最大处, 因 f_m 为射频的调制频率, 具有确定值, 所以染料激光器频率通过参考腔而受控. 如 f_m 改变, 则染料激光频率 f_{dye} 随之变化:

$$df_{dye} = (\lambda_{He-Nc} / \lambda_{dye}) df_m. \quad (2')$$

由于采用无调制之伺服控制, 所以 $f_0 \pm f_m$ 之边带功率需保持恒定, 否则光强的变化就将按(1)式导致染料激光频率的变化. 而此边带功率即使染料激光功率不变, 也可因射频激励功率的变化或电光晶体的响应变化而变化, 所以需用一个宽带调制器以减小因射频频率 f_m 大范围变化引起的边带功率的变化. 因此, 对调制器要求是较高的, 且通常还辅以边带功率的伺服控制以保证所需的频率精度.

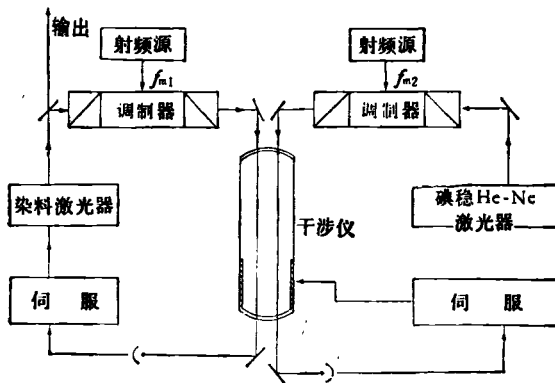


图 5

此外,由(2')式已知 f_m 变化时要精确知道染料激光频率的变化量, 还需精密测知染料激光的波长 λ_{dye} , 如 $df_m = 1\text{GHz}$, 则 λ_{dye} 须精确测至 10^{-6} 才能使 df_{dye} 有 1kHz 的精度, 故还需有干涉条纹计数的波长计.

除图 4 方案外, 也可将调制器接入参考激光器光路, 使参考激光产生 $f_r \pm f_m$ 之边带, 再将干涉仪锁于其中某一边带频率, 并随 f_m 的变化而变化, 染料激光器又以干涉仪为外腔锁频于其透过曲线一侧斜率最大处, 故其频率也随 f_m 变化. 此方案因碘稳频参考激光器频率有调制, 所以相应的边频也有调制, 故可利用基波锁频方法使干涉仪透过峰中心频率锁于边带频率. 因此, 伺服控制与边带功率无关, 即克服了前一方案的缺点. 但干涉仪伺服环路截止频率(相应于环路增益为 1 处的频率)要比参考激光器调制频率低, 这样也就使染料激光器扫频速率不能过高; 因改变 f_m 扫频时干涉仪之锁定时间约需毫秒量级, 这是一个缺点. 另外, 在此方案中二台激光器的光束在干涉仪内须调至共轴.

除上述二种方案外, 还可分别对染料激光及参考激光施以光强调制(图 5), 这种方案既保持了上述二方案的优点, 可避免它们的缺点, 而且改变 f_{m1} , f_{m2} 便于精密测量二谱线之间距.

参 考 文 献

- [1] R. L. Barger, Proc. 29th Ann. Sym. On Frequency Control (1975).
- [2] S. A. Lee et al., Laser Spectroscopy IV, Proc. of the 4th International Conference 1979, Edit. H. Walther and K. W. Rothe, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1979), 135.
- [3] J. L. Hall et al., The 3rd Symposium of Frequency Standards and Metrology, (1981).
- [4] T. W. Hänsch, B. Couillaud, Opt. Commun., 35 (1980), 441.
- [5] F. Y. Wu, Appl. Phys. Lett., 25(1974), 73.
- [6] W. Jitschin et al., Appl. Phys., 19(1979), 181.
- [7] C. Wieman et al., Phys. Rev. A, 22(1980), 192.
- [8] W. Hartig, Appl. Phys., 1(1973), 171.
- [9] H. Gerhardt et al., Opt. Commun., 21(1977), 343.
- [10] H. Gerhardt et al., Appl. Phys., 22(1980), 361.
- [11] B. Burghardt et al., Appl. Phys., 20(1979), 141.