

专题讲座

激光光谱学中的激光器光源(续)

曹洪如*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

4 光谱学中激光器系统设计中的 一些单元技术

4.1 激光器的选模技术

在光谱学研究中,经常要用到单频激光源。而通常的激光器总是运转在多模状态,这意味着许多 TEM_{mng} 模,只要其增益超过总损耗就会在激光振荡中出现。而所谓选模,实质上就是让那些我们不想要的模式的损耗增大到超过增益,使其不能达到起振阈值,而让那些想要的模式损耗尽可能低。对高阶横模的抑制与纵模选择通常是用不同方法来实现的。这是因为不同的横模意味着径向不同的场分布,而不同的纵模可以具有相同的径向场分布,但在自由光谱区的频率是不同的。

在本讲座第2部分中可以看到高阶横模 TEM_{mng} 随着模向阶次 m 或 n 的增加,沿着共振轴方向分布的径向场会越来越小。这意味着在共振腔内插入一个适当的光阑,高阶模的损耗就会远远大于基模的损耗。正如前述,谐振腔模式的场分布或者说它们的衍射损耗与谐振腔的参量比如腔镜的曲率半径 R_1 、 R_2 和镜间距 l 有关,当然也同非涅耳数有关。只有当腔参量满足(5)式时,腔模才处于稳定状态,共振腔内才会出现有

限尺寸的场分布。

图16给出 TEM_{10} 和 TEM_{00} 模损耗比 r_{10}/r_{00} 对非涅耳数的函数关系。这里设定两腔镜曲率半径相等,即 $R_1 = R_2 = R$, 而 $g=1-l/R$ 。对任何给定的共振腔,由该图我们可以求得合适的直径为 $2a$ 的光阑。用它可以有效地抑制 TEM_{10} 模,而 TEM_{00} 基模损耗依旧足够小。在气体激光器中,内径为 $2a$ 的放电管就起着这种光阑的作用。通常我们选取基模束腰半径 ω 的 $3/2$ 为 a , 此时 TEM_{10} 模的损耗已足够大,而 TEM_{00} 模衍射损耗还小于1%,并且基模几乎充满了整个激活区。

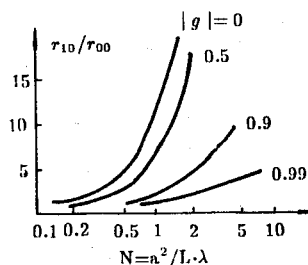


图16 TEM_{10} 和 TEM_{00} 模损耗比 r_{10}/r_{00} 对非涅耳数的函数关系

由上面的分析可知选用适当光阑,激光器通常总是运转在单横模状态。但此时的激光器仍运转在多纵模状态。这是因为在通常

收稿日期: 1995-12-18

* 现已调至上海紫江彩印包装公司。

情况下,激光器的增益宽度 $\Delta\nu_g$ 总比纵模间隔 $c/2L$ 大。获得单纵模运转的最简单的方法就是缩短腔长。也就是说增大纵模间隔,使得在整个增益宽度内只有一个纵模处于阈值之上。这种简单的选模方法的不足之处是,其激活介质通常很短,不可能获得高的输出功率。为了获得高功率输出的单模激光器,下面介绍一些腔内和腔外的选模技术。

当一个多模激光输出通过一个起滤波作用的装置(比如干涉器或者光谱仪)后就可选取单模激光输出。一个理想的选模,对不想要的模要有高的抑制,而对想要的模需要高的透过。但是这种腔外选模的缺点是总的激光输出功率只有一部分被利用。利用置于腔内的滤波器则可以抑制那些不想要的模,使其损耗大于增益,从而不可能出现在激光振荡之中。这样想要的模就可以从激活介质中提取更多的能量。单模激光器的输出功率,通常要比多模运转时的输出功率高。

在单模运转情况下,大约可以获得 $\Delta\nu_{hom}/\Delta\nu_g$ 部分的多模功率。 $\Delta\nu_{hom}$ 表示在非均匀增益线宽内的均匀线宽。对于单模运转由于高强度模的功率展宽 $\Delta\nu_{hom}$ 甚至会更大些。比如在氩离子激光器中用腔内的选模技术可以在一个单模内获得 30% 多模功率。这就是为什么实际上所有的单模激光器都使用腔内选模。

一种可能的腔内选模技术如图 17 所示,即在腔内插入一块倾斜的 F-P 标准具来选

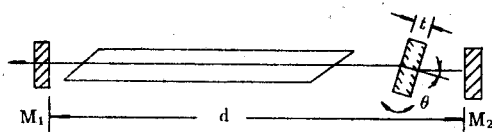


图 17 在腔内插入一块倾斜的 F-P 标准具实现单模运转

纵模。F-P 标准具在这些 λ_m 波长上具有最大的透过,如下式

$$m\lambda_m = 2nt \cos \theta \quad (32)$$

如果标准具的自由光谱区为

$$\delta\lambda = 2nt \cos \theta \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+1} \right) = \frac{\lambda}{m+1} \quad (33)$$

比阈值之上的增益宽度 $|\lambda_1 - \lambda_2|$ 要大,就可以获得单模振荡,如图 18 所示。因为波长 λ

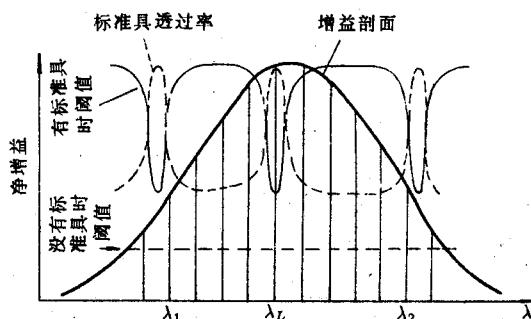


图 18 增益曲线,腔膜,以及标准具调整到单模运转的情况

还取决于共振腔长 L , 必须调节倾斜角 θ , 使

$$2nt \cos \theta / m = 2L / q \quad (34)$$

式中 q 为整数。也就是说此时标准具的透射峰必须与某一激光腔模相吻合。

经常用如图 19 所示的 Fox-Smith 干涉仪来选纵模。这种 Fox-Smith 腔的自由光谱区 $\Delta\lambda = c/[2(L_2 + L_3)]$, 应当比增益宽度大。在激光腔里由分束片 S 构成 $L_1 + L_2$ 的长腔和 $L_2 + L_3$ 的短腔。利用压电元件 PE 调节 L_3 , 当

$$(L_1 + L_2)q = (L_2 + L_3)m \quad m, q \text{ 为整数} \quad (35)$$

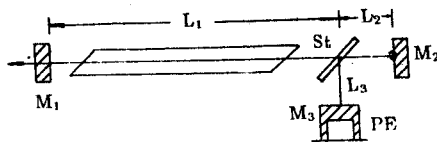


图 19 用 Fox-Smith 干涉仪选纵模的实验装置

复合腔发生谐振。对于频率等于该干涉仪谐振频率的辐射，其功率损耗最小，也就有希望获得激光振荡，而其它频率的损耗要大得多。只要这种频率的间隔大于增益宽度，就能获得单模激光。此时产生激光振荡的频率为

$$\nu = m \frac{c}{2(L_2 + L_3)} \quad (36)$$

还有其它几种谐振腔耦合方法可用作选择单模。图20给出一些这样的例子，同时给出它们损耗的频率特性。作为比较，横坐标上还标出了长激光腔的模间隔 $\Delta\nu = c/2d$ 。

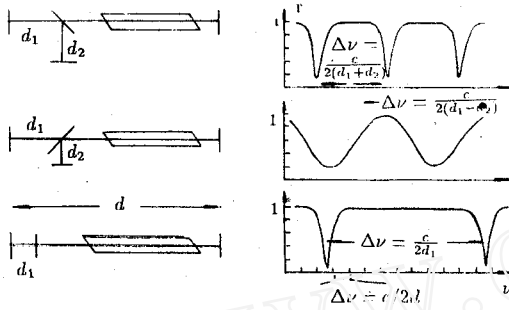


图20 几种可能的谐振腔耦合方法及其损耗的频率特性

在多谱线激光器情况(比如氩离子或氪离子激光)，可用棱镜结合迈克耳逊干涉仪同时实现谱线和单模的选择。图21给出两种可能的配置。第一种配置，用一块 Littrow 棱镜反射器取代图19中的镜片 M_2 (见图21(a))。在图21(b)中，棱镜的前表面 S_t 起着分束器的作用，而两个涂膜的棱镜背面取代了图19中的 M_2 和 M_3 。入射波被分成光束4和光束2。当光束2被 M_2 反射之后回到前表面 S_t ，又被分成光束3和光束1。光束3经 M_3 反射后与光束4发生干涉。若光程差 $\Delta S = 2n(S_2 + S_3) = m\lambda$ ，光束3和光束4发生相消干涉。如果能使光束3和光束4具有相等幅值，在光束4方向上光线将不复存在。这意味着所有的光将被反射向入射方向，而该装置起着类似 Fox-Smith 腔的波长

选择反射器的作用。由于激光波长 λ 与光程长 $n(L_2 + L_3)$ 有关，要达到稳定波长的单模运转该棱镜必须长时间稳定。整个棱镜被置于恒温器之中。

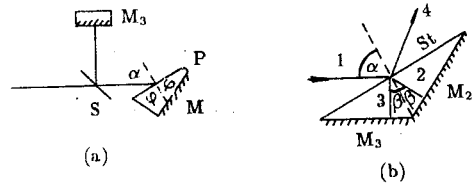


图21 (a)、(b) 棱镜结合迈克耳逊干涉仪同时实现谱线和单模选择

对具有宽增益的激光器而言，或许用单一的波长选择元件不足以达到单模运转。那就必须用不同色散元件的组合来实现单模运转。用一些色散元件，比如棱镜，光栅或者 Lyot 滤光片进行预选，有效增益的光谱区被压窄到与固定频率激光器多普勒宽度相当的宽度。图22和23给出实际中得到确认的

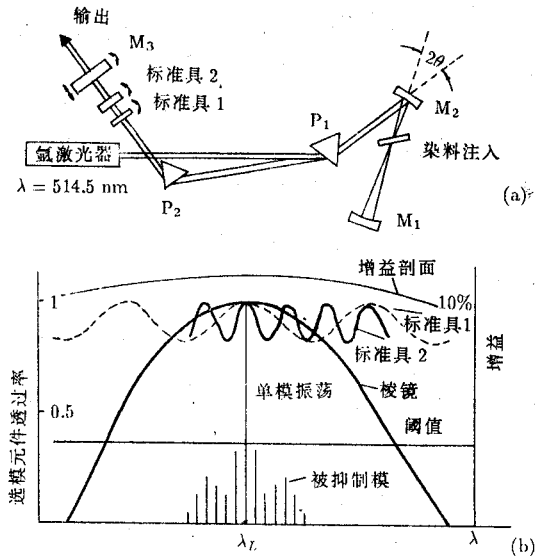


图22 用棱镜作预选器宽增益激光器的单模选择。(a)连续染料激光器的实验装置；(b)棱镜对增益压窄作用以及两块标准具的透射曲线

两种可能方案。第一种方案，用二块棱镜作

为预选择器将连续染料激光器的光谱宽度压窄,而用二块不同厚度 t_1 、 t_2 的标准具实现稳定的单模运转。图 22(b) 示出棱镜对增益的压窄和二块标准具的透射曲线,用以说明模选择。对具有均匀增益的染料激光器,由于空间烧孔效应并不是所有的谐振腔模都能振荡。图 22 底部示出的被抑制的模,就是由这种空间烧孔效应产生的。它们代表设有二块标准具时振荡的腔模。当然二块标准具在相同波长 λ_L 处具有最大的透射。这可以选择适当的倾斜角来实现

$$\begin{aligned} nt_1 \cos \theta_1 &= m_1 \lambda_L \\ nt_2 \cos \theta_2 &= m_2 \lambda_L \end{aligned} \quad (37)$$

图 23 为氮分子激光泵浦的单模运转染料激光的实验装置。激光束被扩展以充满整个光栅。同棱镜相比光栅具有较高的光谱分辨率,以及相对短的腔长使模间隔增加,如图所示用一块标准具就足以实现单模运转。

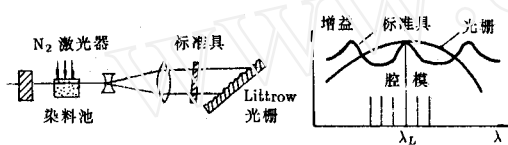


图 23 用光栅作预选择,一块标准具实现氮分子激光泵浦的染料激光器单模运转

4.2 锁模和超短脉冲激光器

超短脉冲激光器在激光光谱学中有广泛的应用,特别是在物理、化学、生物等领域,正在利用皮秒 (10^{-12} s) 光谱法甚至飞秒 (10^{-15} s) 光谱法进行各种各样快速过程的研究。产生超短脉冲激光的方法大致包括行波激发,共振腔瞬变过程的短脉冲激发;包括 Q-开关,腔倒空和 F-P 电光调制快耦合的共振腔 Q 调制;包括腔外调制,等离子体开关的光脉冲削波;以及主、被动锁模等。但是可以毫不夸张地说锁模技术是产生超短脉冲的中心问题。

在一般情况下,激光振荡的光谱是由许多纵模组成的。锁模法就是使这些纵模之间的相位一致,并由相位一致的许多纵模的叠加产生超短光脉冲的方法。锁模法大致可分为在共振腔内加以调制的主动锁模法和利用激光共振腔内的激光工作物质或者可饱和吸收体等非线性形成的被动锁模法。当然也可把这两种方法结合起来,称作主被动混合式锁模法。

在进行高可靠度、高精度的光谱实验时,越来越需要脉冲波形平滑,不具有微细结构,而且不伴随相位调制的脉冲。假设脉冲的光谱宽度(指半峰值全宽,FWHM)为 $\Delta\nu$ 、脉冲宽度为 Δt ,则光谱宽度与脉冲宽度的乘积为最小的脉冲(对高斯型脉冲, $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.441$,对正割型脉冲 $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.315$),称为变换极限光脉冲。锁模方法适合获得傅里叶变换极限光脉冲。

染料激光器的增益谱宽达 500 nm,可实现宽广的波长调谐,同时也可以获得皮秒量级的变换极限光脉冲。运用主、被动混合式锁模法,甚至能从连续染料激光器产生高速脉冲序列的亚皮秒激光脉冲。

连续染料激光器的锁模始于 1971 年,采用声光调制器获得几十皮秒量级的光脉冲。运用 KD*P 电光调制,以共振腔基频的四倍频调制,可以得到 10 ps 光脉冲。采用光调制器直接调制激光束的方式中,由于难以快速调制,缩短脉冲宽度并不容易。

如采用另一种锁模激光器,比如锁模氩离子激光器泵浦染料,实现染料介质的增益调制,就能获得与泵浦光脉冲同步的超短光脉冲输出。因为染料介质增益的饱和效应迅速产生,所以与泵浦光脉冲宽度相比得到的光脉冲宽度变得相当窄。输出光脉冲宽度 τ 和泵浦光脉冲宽度 τ_p 之间有如下关系。

$$\tau \propto (\tau_p / \omega_c)^{1/2} \quad (38)$$

式中, ω_c 是激光共振腔的光谱频带。用锁模氩离子激光器的 100 ps 的光脉冲泵浦, 从若丹明 6G 染料激光器中获得脉冲宽度 0.6~1 ps, 峰值功率达 1 kW 的光脉冲。调谐波长范围为 562.5~604.5 nm, 比用可饱和吸收体的被动锁模调谐范围宽。

像这种与泵浦光脉冲同步的增益调制法, 因为在两个以上的不同波长处得到与电信号同步的光脉冲序列, 所以在许多光谱测量方面会获得应用。

图 24 示出用于若丹明 B 可调谐亚皮秒染料激光器的串联泵浦装置。用一台锁模氩离子激光器同步泵浦若丹明 6G 染料激光器。若丹明 6G 激光器为若丹明 B 提供短的泵浦脉冲。

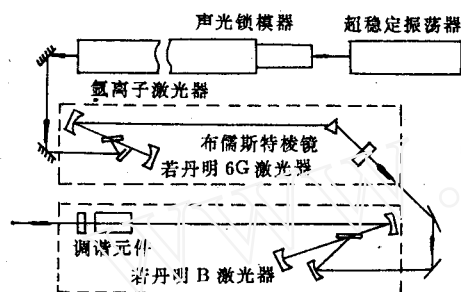


图 24 用于若丹明 B 可调谐亚皮秒染料激光器的串联泵浦装置

采用可饱和染料的被动锁模法, 由于可饱和染料的吸收饱和效应与作激光介质用的染料的增益饱和效应同时存在, 所以可得到宽度很窄的光脉冲。与固体激光器不同, 即使在低输入的情况下, 也迅速形成增益饱和效应, 采用恢复时间长的可饱和染料也可以进行锁模。

现在, 连续染料激光器的被动锁模是产生超短光脉冲的一种成熟的技术。图 25 示出被称为碰撞锁模染料激光器的激光腔结构。它由一系列构成环形腔的反射镜组成, 而腔内只包括两个主要元件: 即处在该腔两个焦点上的光泵浦可饱和增益染料(若丹明 6G)和可饱和吸收染料(DODCI)用工作在

514.5 nm 的氩离子激光器作泵浦源。由于腔内元件降至最低限度, 群速色散效应减少, 并使腔能维持宽带振荡, 这是形成超短光脉冲所必需的。这种结构激光器的脉冲压缩机制和被动锁模染料激光器非常相似。如果我们考虑一个环绕环形腔引进的光脉冲, 由于它多次都受到增益染料的放大和可饱和吸收染料的吸收, 光脉冲被整形。脉冲前沿优先受到可饱和吸收体的削波。脉冲前沿的优先放大再加之激光腔的损耗, 使脉冲后沿多次通过腔时都受到有效的限幅, 直至达到极限脉宽。碰撞锁模环形腔的另一种脉宽变窄机制是这样的: 在环形腔内存在两个同样稳定而方向相反的脉冲, 这两个脉冲在环形腔内行进时相遇而碰撞。从能量上说, 这两个

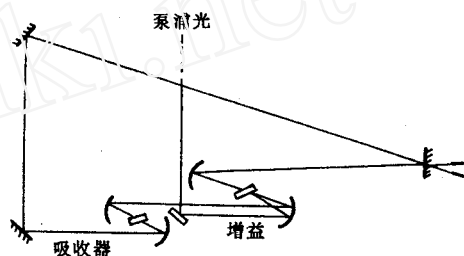


图 25 碰撞锁模染料激光器的腔结构

脉冲相遇的最佳位置是在可饱和吸收体内。由于这些脉冲是相干的, 它们在吸收体中可以干涉并建立起驻波图样。因为驻波场在吸收饱和处最强, 在吸收没有饱和处最弱, 所以吸收体对光场相位相关部分的损耗速率总是小于随机分量。也就是说吸收体对随机部分有比较大的抑制作用。由于腔内增益染料的作用, 光场中相位相关部分很快被突出来, 而随机部分被抑制。相位相关的模之间产生拍频, 形成了宽度窄的碰撞锁模脉冲。这种方法已经能获得 10 fs 量级的超短光脉冲。

(待续)