

脉冲染料激光强迫振荡器的调频研究

李兆霖 冯宝华

(中国科学院物理研究所)

提要: 本文研究了染料激光强迫振荡器的调频特性。应用为染料激光器导出的三阶模耦合方程解释了几种实验现象,并介绍了调频方法及实验结果。

Study of tuning of a pulsed dye laser forced oscillator

Li Zhaolin Feng Baohua

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract: Tuning characteristics of a pulsed dye laser forced oscillator are studied. Several experimental phenomena are explained by the third order mode-coupled equation deduced for dye lasers. The tuning method and the experimental results are also given.

一、引言

自从 L. E. Frickson 等报导了脉冲染料激光强迫振荡器以来^[1],人们对这类激光器进行了许多研究。这种激光器较好地解决了同时获得大能量和窄线宽之间的矛盾。我们曾简单报导了我们制作的闪光灯泵浦的染料激光强迫振荡器^[2]。本文将讨论影响宽光谱范围高效调频的诸因素,并介绍所用的具体调频方法和实验结果。

二、实验装置

实验装置如图 1 所示。激光器系统由驱动激光器和主振荡器(以下分别简称为前、后级)组成。在后级开始振荡稍前的时刻,由前级通过耦合镜 M_2 向后级注入窄带激光,由

于模式耦合与竞争,就可能把后级自由工作时的宽带激光的绝大部分能量集中到相应的窄带中去,从而获得大能量、窄线宽的可调频激光输出。

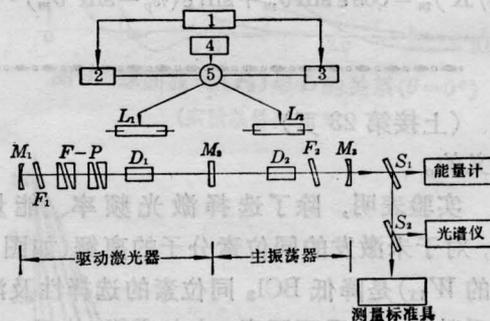


图 1 实验装置示意图

1—高压电源; 2、3—储能电容,分别为 1 微法和 2 微法; 4—触发器; 5—火花隙;
 L_1 、 L_2 —消磁灯

实验装置中的 M_1 是球面全反镜,曲率半径为 1 米; M_2 是反射率为 90% 的平面反

收稿日期: 1981 年 1 月 26 日。

射镜; M_3 是曲率半径为 5 米的球面反射镜, 反射率为 33%; F_1 为窄带干涉滤光片, 带宽 40\AA , 透过率 70%; F_2 为干涉滤光片, 带宽 $\sim 100\text{\AA}$, 透过率 $>90\%$; F-P 标准具, 空气间隙 100 微米, 反射率 50%; D_1 、 D_2 是染料池; S_1 、 S_2 为分光镜。

三、调频研究

采用干涉滤光片和 F-P 标准具作选频元件, 靠转动其倾角和适当地改变染料浓度进行调频。两激光器采用同一个染料循环系统工作。

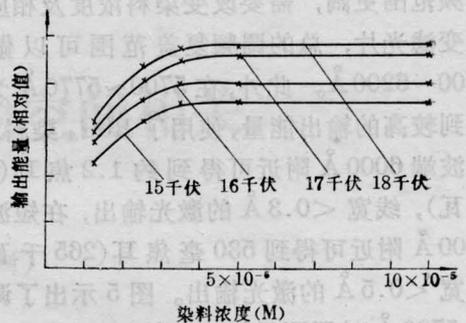
实验中使用 R6G 和 R6G_A 两种染料, R6G 已为大家所熟悉, 使用 R6G_A 染料自由工作时的激光峰位和输出能量与浓度的关系曲线分别如表 1 和图 2 所示。

图 3 给出了在 R6G_A 染料浓度为 $3.5 \times 10^{-5} M$ 时, 前、后级输出的宽带光谱。光谱位置的错开是因 Q 值不同所造成的。在 $5 \times 10^{-5} M$ 浓度下后级激光峰位为 5700\AA , 在此浓度下前、后级激光器的输出能量下降很小 ($>90\%$), 而在更低的浓度下输出则较明显地下降。所以下节调频指标中的调频复盖范围的短波端只算 5700\AA 。

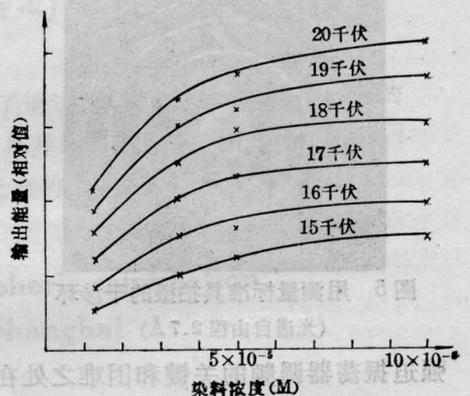
当插入干涉滤光片和标准具时, 靠转动标准具, 连续调频范围约 12\AA (用测量标准具测得), 单独转动干涉滤光片时, 调频范围典型值约 50\AA , 如图 4 所示。要得到效率高、

表 1 不同浓度下 R6G_A 的荧光峰位和激光器使用 R6G_A 时相应的激光峰位

浓度 (M)	1×10^{-4}	5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.25×10^{-5}
荧光峰位波长 (\AA)	5540	5510	5482	5460
前级激光峰位波长 (\AA)	5750	5720	5690	5650
后级激光峰位波长 (\AA)	5730	5700	5660	5630



(a) 前级输出能量与浓度的关系曲线



(b) 后级输出能量与浓度的关系曲线

图 2

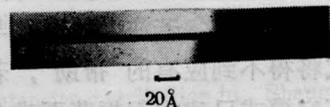


图 3 前、后级输出的宽带光谱

上方为后级输出的宽带光谱; 右方为短波方向



图 4 转动干涉滤光片的典型高效调频光谱图

粗谱线相应于只插入干涉滤光片; 细谱线相应于再插入一个标准具, 后级能量几乎完全锁在窄带中

调频范围更阔，需要改变染料浓度及相应地改变滤光片，总的调频复盖范围可以做到 $5700 \sim 6200 \text{ \AA}$ 。此外，在 $5700 \sim 5770 \text{ \AA}$ 为了得到较高的输出能量，使用了 R6G_A 染料。在长波端 6000 \AA 附近可得到约 1.2 焦耳 (600 千瓦)，线宽 $< 0.3 \text{ \AA}$ 的激光输出，在短波端 5700 \AA 附近可得到 530 毫焦耳 (265 千瓦)，线宽 $< 0.5 \text{ \AA}$ 的激光输出。图 5 示出了调频至 5720 \AA 时用测量标准具拍摄的干涉环。

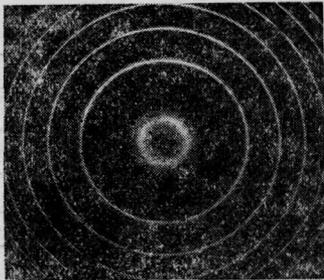


图 5 用测量标准具拍摄的干涉环 (光谱自由程 2.7 \AA)

强迫振荡器调频的关键和困难之处在于如何能在宽的调频范围内高效率地锁频。实验表明下述诸因素和规律是重要的。(1) 前级激光脉冲峰值应在后级激光脉冲阈值附近且略为超前为恰当。若注入过早，与注入相应的模式将得不到应有的“帮助”，若注入过迟，则其它模式已建立起振荡而难以抑制。图 6 是耦合较好的激光脉冲波形图。(2) 存在注入能量阈值。阈值随注入激光频率远离后级净增益峰的位置而增加，当后级输出能量加大时，阈值也相应地增大。本实验的能量增益约为 200，例如总输出为 800 毫焦耳时，注入锁频的能量阈值约 4 毫焦耳。(3) 高效率锁频总是发生在后级自由工作宽带光谱的一定范围内，即增益相等的范围内。图 7 是从图 4 的宽带光谱测得的黑度曲线，可以把它近似地看成增益对时间积分的对数的轮廓，或者近似地把它叫做增益谱，图 4 和图 7 表明在实验误差范围内调频范围的边界正好是相距 50 \AA 增益相等处。

以下借助于染料激光器模式耦合的三阶

方程^[3]对上述实验现象予以解释。该方程为：

$$\frac{dE_n}{dt} = E_n(a_n - b_n E_n^2 - \sum'_m C_{nm} E_m^2) \quad (1)$$

其中 E_n 是 ν_n 模式电场强度的振幅； a_n 相当于净增益系数，是激活介质增益和激光腔等效损耗的差； b_n 相当于自饱和系数； C_{nm} 相当于交叉饱和系数； \sum'_m 表示取和时 $m \neq n$ 。

上述系数的表达式详见文献 [3]。将此方程

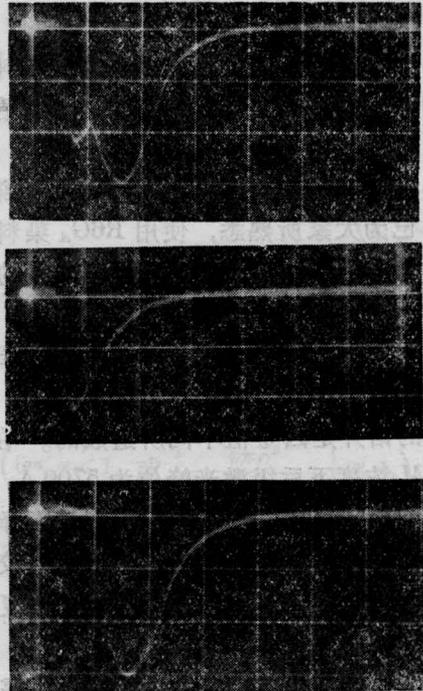


图 6 激光脉冲波形图 (2 微微秒/格)

上图是耦合情况下拍摄的；中图是前级激光脉冲波形；下图是后级激光脉冲波形

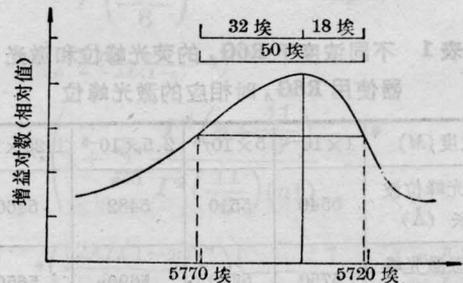


图 7 由图 4 宽带光谱得到的近似增益谱
横座标上的虚线是相距 50 \AA 增益相等的一对位置

运用于主振荡器, 将 E_n 的方程变换为光子数 N_n 的方程, 考虑在 ν_j 模处每秒注入 J 个光子的情况, 只要 J 足够大, 那么在阈值时不难造成 $N_j \gg \sum_{n \neq j} N_n$ 的情况, 于是可得到下述方程:

$$\frac{dN_j}{dt} = 2N_j(a_j - b_j N_j) + J \quad (2)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = 2N_n(a_n - C_{nj} N_j) \quad (3)$$

我们讨论稳态 (即 $\frac{dN_j}{dt} = 0$) 情况, 可导出下式 (其中粗略地认为 $C_{nj} \approx b_j$):

$$\begin{aligned} a'_n &= 2(a_n - C_{nj} N_j) \\ &= 2 \left[a_n - a_j \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 2b_j J / a_j^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

a'_n 相当于有效增益系数, $a'_n > 0$, $a'_n < 0$ 则表示 ν_n 模由于 ν_j 模光子数的急剧增长而受到抑制。借助于 (1)~(4) 式进行分析可以看出: (1) 只要提前注入的 J 足够大, 就可以使 ν_j 模式最先受激, 并把其它模式抑制下去; (2) a_j 越大, 则实现 ν_j 模处的高效锁频所需的 J 越小, 对于一定的 J , 则总是 a_j 大于某值的光谱范围内可以高效锁频, 因此此范围的边界必是 a_j 相等的地方; (3) 在阈值附近的模式竞争是决定性的。只要在阈值附近 ν_j 模占了绝对优势, 当泵浦继续增大时, 即使 $a'_n > 0$, 能量也大部分集中到 ν_j 模处, 而集中的程度还与阈值附近 a 的增长速度有关, 此速度越小越有利; (4) 如果 $Q_j \gg Q_n$ (Q 是谐振腔的等效 Q 值), 则有 $a_j \gg a_n$, 也可使得 $a'_n < 0$, 即大大有利于 ν_j 模处的注入锁频。

有了上述分析, 就不难理解前述的实验现象, 进而还可得到有利于调频的两点实用结论: a) 以后级激光器自由工作的光谱轮廓为依据, 适当地选择染料浓度, 将有利于得到

我们需要的调频范围; b) 可采用在后级中插入高透过率的选频元件或饱和吸收染料等方法提高注入模处的 Q 值相对值, 从而扩展调频范围。图 8 是在后级中插入高透过率的干涉滤光片的调频光谱图, 从图看出调频范围往短波方面大大扩展了。长波方面亦可如此。

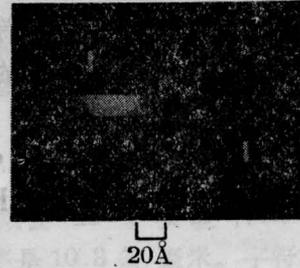


图 8

(右方是短波方向)

此外, 在采用一个染料循环系统时, 受 Q 值影响, 前、后级宽带光谱有 $\sim 30 \text{ \AA}$ 的光谱错动 (如图 3)。但由图 7 看到调频范围主要与后级增益谱相联系, 这说明在染料激光强迫振荡器中只要恰当地选择腔参数, 以使得前、后级净增益谱不要相差太远, 使用一个染料循环系统也是可行的。

我们用此激光器和前述的调频方法还获得了 $4550 \sim 4620 \text{ \AA}$ 的调频激光。分别进行了钾原子共振三光子电离和铯原子共振二光子电离的研究。这表明了此激光器和所用调频方法在实验室的实用性。

参 考 文 献

- [1] L. E. Friekson et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 18, No. 10, 433.
- [2] 汤 晓等; 《激光》, 1979, 6, No. 9, 29.
- [3] 潘少华; “染料激光器模式耦合半经典理论”, 《物理学报》, 待发表。