

自注入调频染料激光器调频宽度研究

邓道群、潘少华、许祖彦、郭东升、李秀芳
(中国科学院物理研究所)

提 要

本文从理论上探讨了自注入调频激光器的调频宽度与注入功率的关系,并从实验上得到相应的系数。

一、前 言

为获得高功率大能量可调谐窄线宽激光输出,许多人采用了注入锁频技术^[1~3],但存在总效率低和设备复杂等问题,为提高闪光灯泵浦有机染料激光器的调频效率,又发展了复合腔调频技术^[4]和自注入调频技术^[5]。自注入调频激光器原理如图1所示,令激光介质被泵浦初期,换腔开关使 M_1M_3 腔运转,当被选模式达到一定强度时,换腔开关使放大腔 M_1M_2 运转,由于模式竞争的结果,输出激光几乎全由被选模式构成。我们用自注入调频技术研究了闪光灯泵浦的 R6G 有机染料激光器的调频宽度与注入功率的关系,即换腔开关的开启时刻与调频宽度的关系。我们引用染料激光器模式耦合方程^[6],采用由实验待定系数法得到调频宽度与注入功率的关系。理论结果与实验符合较好,为设计注入调频激光器提供估算依据。

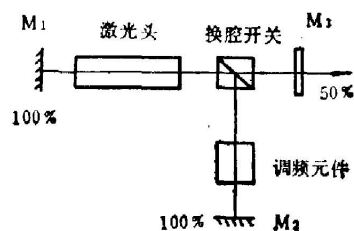


图1 自注入调频激光器原理图
Fig. 1 Schematic diagram of a self-injected tunable laser

二、调频宽度与注入功率的关系

激光器模式耦合方程^[6]:

$$\begin{cases} \dot{E}_j = E_j(a_j - b_j E_j^2), & (1) \\ \dot{E}_n = E_n(a_n - c_{nj} E_j^2) \quad (n \neq j). & (2) \end{cases}$$

由 $N = \frac{V}{2} (\hbar\nu)^{-1} \epsilon E^2$, 考虑单位时间注入功率 P , 则上式可变成。

$$\begin{cases} \dot{N}_j = N_j(a_j - b_j N_j) + P, & (3) \\ \dot{N}_n = N_n(a_n - c_{nj} N_j) \quad n \neq j, & (4) \end{cases}$$

其中 N_j 为被选模式光子数, N_n 为其余模式的光子数, a_j 和 a_n 分别为被选模式和其余模式的线性净增益系数, b_j 和 c_{nj} 分别是自饱和及交叉饱和系数。当 N_j 达到极值, 即 $\dot{N}_j = 0$ 时, :

有

$$N_j = \frac{a_j + \sqrt{a_j^2 + 4b_j P}}{2b_j} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式得

$$\dot{N}_n = N_n \left[a_n - c_{nj} \cdot \frac{a_j + \sqrt{a_j^2 + 4b_j P}}{2b_j} \right] \quad (6)$$

使 j 模抑制 n 模, 则 $\dot{N}_n \leq 0$, 临界时 $\dot{N}_n = 0$, 则

$$a_n = \frac{1}{2} \frac{c_{nj}}{b_j} [a_j + \sqrt{a_j^2 + 4b_j P}] \quad (7)$$

有机染料荧光光谱的半宽度为数百埃, 而实际上只用其很小一部份, 在此范围内由于 c_{nj} 和 b_j 变化较小, 故可近似地让 $c_{nj} = b_j$ 。我们注意到对于宽带振荡腔线性净增益系数 a_j 和 a_n 与染料分子荧光光谱线性因子 $g(\lambda)$ 相似, 因而近似地以 $g(\lambda)$ 来代替。且以待定系数 B 取代 b_j , 那么(7)式可以写成:

$$g(\lambda_j) = \frac{g(\lambda_n)^2 - BP}{g(\lambda_n)} \quad (8)$$

有机染料分子的荧光光谱如图 2 所示。设峰值波长为 λ_0 , 那么只要 λ_j 模能抑制自然增益最大的 λ_0 模, 则其余模将被抑制, 而(8)式可写成,

$$g(\lambda_j) = \frac{g(\lambda_0)^2 - BP}{g(\lambda_0)}, \quad (9)$$

式中待定系数 B 依赖于放大腔的状态, 即依赖于泵浦速率、能级寿命、腔内损耗等许多因素, 亦即依赖于 j 模光子的注入时刻。我们称之为放大腔的状态函数。对应于每一特定状态应有一确定的 B 值, 从而 B 值可由实验确定。对于每一个确定的 BP 值, 有一相应的 $g(\lambda_j)$ 。借助于图 2 的荧光光谱

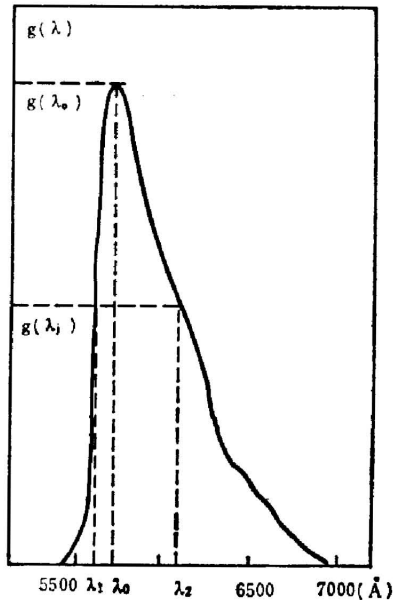


图 2 R6G 染料乙醇溶液的荧光光谱
Fig 2 Fluorescence spectrum of the
R-6G(in ethyl alcohol)

即可找出每一 $g(\lambda_j)$ 所对应的波长宽度 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 。由此我们可以得到如图 3 所示的注入锁频激光器的调频宽度 $\Delta\lambda$ 与 BP 值的关系, 即注入锁频激光器的调频宽度随 BP 值的增加而加宽。在固定开关时刻, 测出注入功率和相应的调频宽度, 借助于图 2 所示的染料荧光光谱曲线, 找出相应的 $g(\lambda_j)$, 代入关系式(9), 即可得到开关时刻的 B 值。对于自注入调频激光器, 通过改变换腔开关的开启时刻来改变注入放大腔的功率时, 由于不同时刻放大腔的状态不同, B 值随之改变, 调频宽度同时地随 P 值和 B 值的变化而改变。当注入功率 P 值独立地改变, 如通常的外注入式锁频或固定换腔开关开启时刻, 而改变调频腔的插入损耗来改变 P 值的自注入调频激光器, 则调频宽度在一定的频带内随注入功率 P 值近似线性变化。如图 4 所示, 不同的 B 值对应不同的曲线(即对应于不同的开关开启时刻)。

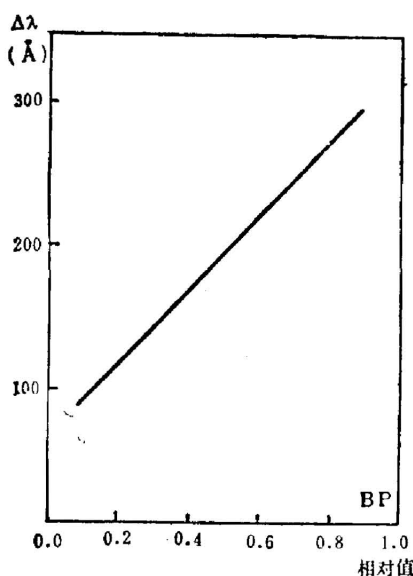


图3 调频宽度与BP值的关系

Fig. 3 Relationship between tunable band-width and BP value

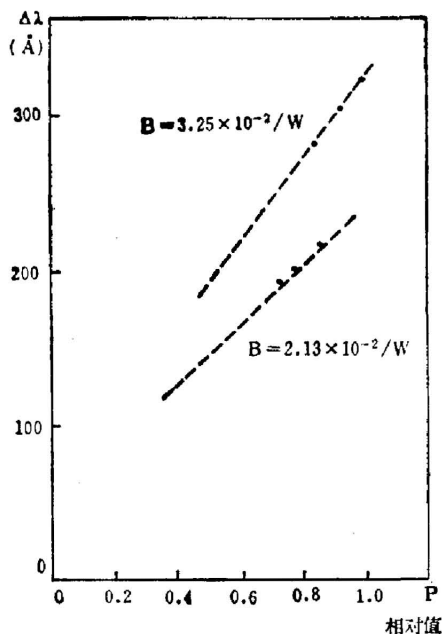


图4 调频宽度与注入功率的关系

(虚线为理论计算值, 点和叉为实验值)

1. 延迟时间=0.94 μs; 2. 延迟时间=0.82 μs

Fig. 4 Dependence of tunable band-width with injected power

(1) Delay time=0.94 μs; (2) Delay time=0.82 μs

三、实验和结果

实验所用的自注入调频激光器如图5所示。我们以干涉滤光片为调频元件, 以半米光栅光谱仪检测调频宽度, 以微焦耳级能量计测量注入能量, 以重复频率闪光灯泵浦的R6G有机染料激光头作实验, 得到如下结果:

1. 当泵浦速率不变、激光器的换腔开关置于某一固定时刻 t 时, 由转动干涉滤光片调节注入激光的频率得到如图6所示的锁频光谱照片。由图可以看到, 当调频腔运转于宽带振荡谱的中心位置时, 放大腔的宽带振荡谱全部被注入频率所抑制, 而且当调频腔的振荡谱偏移到宽带振荡中心波长的两侧时, 仍有一段范围其 $g(\lambda_j)$ 满足关系式(9), 亦即有一带宽 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 能被注入模所抑制。当调频腔振荡谱继续经长波或短波方向移动时, $g(\lambda_j)$ 不再满足(9)式, 注入模不能抑制宽带中心的振荡, 则输出激光既有调频腔所注入的频率, 又有宽带中心位置附近的宽带振荡。从光谱照片上还可看到, 长波部份

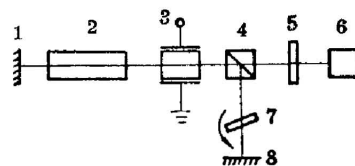


图5 实验装置图

1—宽带全反射镜, 2—染料激光头, 3—KDP晶体, 4—偏振棱镜, 5—反射率为50%的宽带反射镜, 6—检测器, 7—干涉滤光片(半宽度40 Å) 8—宽带全反射镜

Fig. 5 Experimental set-up

(1) 100% broad-band reflectance mirror, (2) Dye laser head, (3) KDP crystal (4) Polarizing prism, (5) 50% broad-band reflectance mirror, (6) Detector, (7) Interference filter (FWHM 40 Å), (8) 100% broad-band reflectance mirror

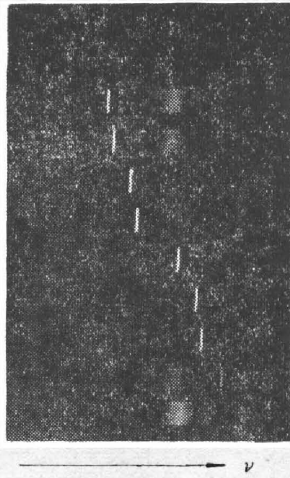


图 6 用半米光栅光谱仪所拍摄的不同注入频率时的光谱照片($\sim 16 \text{ \AA}/\text{mm}$)

Fig. 6 Output spectrum for different inject waves, taken with a 0.5 m grating spectrograph ($16 \text{ \AA}/\text{mm}$)

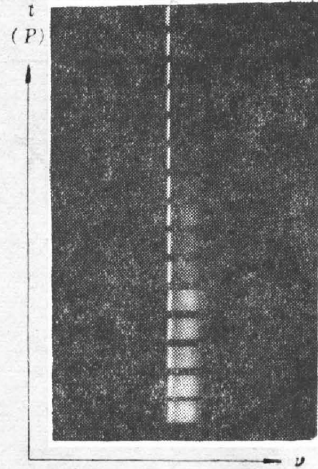


图 7 用半米光栅光谱仪所拍摄的不同注入时刻的光谱照片($\sim 16 \text{ \AA}/\text{mm}$)

Fig. 7 Output spectrum for different injection times t , taken with a 0.5 m grating spectrograph ($16 \text{ \AA}/\text{mm}$)

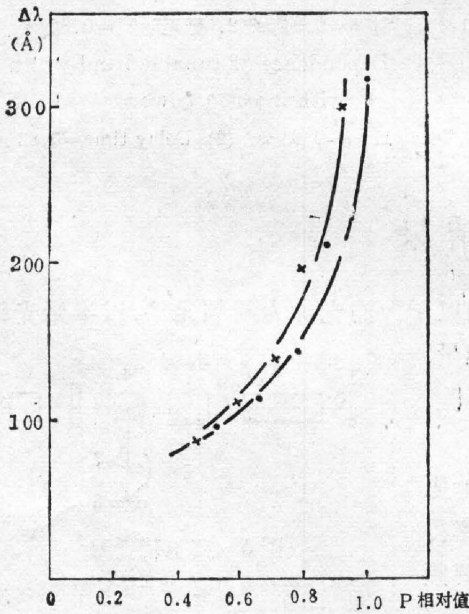


图 8 自注入调频激光器调频宽度与注入功率的关系

--- 一枚干涉滤光片 -x- 一枚干涉滤光片加一块平板玻璃

Fig. 8 Relationship between tunable band-width and injected power

--- with an interference filter in tuning cavity
-x- with an interference filter and a plane glass plate in tuning cavity

的调频宽度比短波部分宽, 这是由 R6G 乙醇溶液的荧光谱所决定的。

2. 固定泵浦速率, 并将调频腔振荡频率调节到偏离放大腔宽带振荡中心的某一频率上。当改变换腔开关的开启时刻, 使注入功率逐渐改变得到如图 7 所示的光谱照片。从图中可以定性地说明: 随注入功率的增加, 宽带中心两侧的频率首先满足关系式(8), 而被注入模所抑制。随换腔开关的延迟开启, BP 值增加, 使中心波长 λ_0 满足(9)式, 至此, 整个宽带振荡谱都被注入模 λ_i 所抑制。

3. 固定泵浦速率, 改变换腔开关开启时刻, 得到自注入调频激光器的调频宽度与注入功率的关系曲线(见图 8), 图中的两条曲线对应于调频腔不同的插入损耗。对于同一注入功率因对应于不同开关时刻, B 值不同调频宽度也不一样宽。从图中可以看出: 由于不同时刻放大腔的 B 值不一样, 因而调频宽度随注入功率的增加而非线性地加宽。

4. 泵浦条件不变, 换腔开关固定在某一时刻开启, 当调频腔插入不同损耗时, 得到注入功率与调频宽度的关系曲线(见图 4 所示), 图中的两条

直线对应于不同的换腔开关开启时刻,即对应于不同的 B 值。从图中可以看到放大腔初始状态不变时,在一定的宽度内,调频宽度随注入功率线性加宽。图中虚线是用相应的开启时刻的实验所确定的 B 值计算的理论曲线,可以看到理论与实验符合较好。

5. 泵浦条件不变时,我们还得到自注入调频激光器的调频宽度与换腔开关开启时刻的关系曲线(见图 9),从图可知,调频宽度随被选模的注入时间的延迟而加宽(这一曲线与图 8 相似,但较适用方便)。图中的延迟时间是相对于激光脉冲前沿而言。

四、讨论和结论

自注入调频染料激光器的调频宽度主要依赖于注入功率和注入时刻。 BP 值大,则调频宽度宽。对于外注入式锁频激光器,通常选在放大器达到振荡阈值之前的时刻注入,其 B 值几乎不变,因而调频宽度就取决于注入功率的大小。

由染料激光器模式耦合方程所得到的调频宽度,在一定的频宽内与实验符合较好,它能半定量地说明注入功率与调频宽度的关系,结果也将适合于外注入式锁频染料激光器。

实验所确定的 B 值是放大腔的状态函数,它主要是模式耦合方程中的自饱和系数 b_i 的贡献,但又有区别,这是由于公式推导过程中的一些近似引进的。

自注入调频激光器的调频宽度随注入时刻的推迟而加宽,当注入时刻过了激光器宽带振荡脉冲的峰值位置之后,放大腔的放大作用下降,输出功率相应减小。

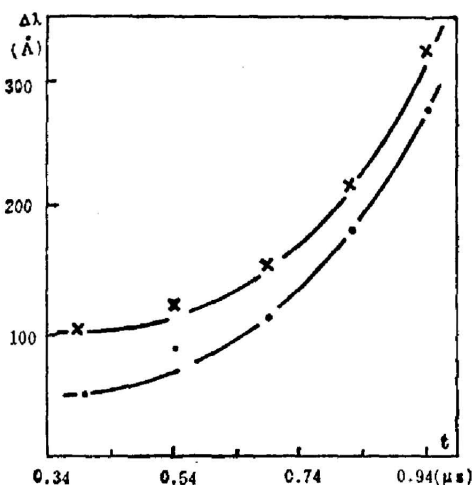


图 9 自注入调频激光器调频宽度与开关 t 的关系(t 以激光脉冲前沿为零点)

-x- 调频腔只有一块干涉滤光片, ··· 一块干涉滤光片 + 2 块平板玻璃

Fig. 9 Relationship between tunable bandwidth and switch time t (t counted from the beginning of the laser pulse)

--- with an interference filter in tuning cavity
-x- with an interference filter and two plane glass plate in tuning cavity

参 考 文 献

- [1] M. Meada, O. Uchimo *et al.*; *Japan J. A. P.*, 1975, **14**, No. 12 (Dec), 1975.
- [2] S. Bit, U. Ganiel *et al.*; *Appl. Phys.*, 1977, **12**, No. 1 (Jan), 69.
- [3] 潘少华等;《物理学报》, 1981, **30**, No. 2 (Feb), 291.
- [4] 许祖彦等;《物理学报》, 1981, **30**, No. 6 (Jun), 820.
- [5] 许祖彦等;《物理学报》, 1980, **29**, No. 12 (Dec), 1588.
- [6] 潘少华;《物理学报》, 1981, **30**, No. 8 (Aug), 1067.

Investigation of the tuning range of self-injected tunable lasers

DENG DAOQUN PAN SHAOHUA XU ZUYAN

GUO DONGSHENG AND LI XIUFANG

(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing)

(Received 28 January 1981)

Abstract

In order to obtain tunable, very narrow linewidth laser radiation of high power and energy, we have developed a self-injected tunable dye laser based on a new technique. In this paper the theory of mode coupling in dye lasers is used to study the relationship between tunable bandwidth range and injected power. It is shown that the tuning range of a self-injected dye laser is associated with the injected power p and the state function of the amplifying cavity; when the switching time of the cavity switch (Pockel cell) is fixed, the tuning range increases almost linearly as the injected power increases. The experimental results agree with the theoretical analysis, which is useful for actual injection laser devices.