

双频复合腔染料激光器中的模式耦合

李师群* 邹英华 夏宗炬
(北京大学物理系)

提 要

本文将染料激光器的模式耦合方程应用于双频复合腔染料激光器,得到双频稳定运转条件,双频抑制宽度条件和双频强度比等。利用一种图解法可知,这类激光器有四种典型的调频过程,并可方便地得到若干参量。本文还报导了两种新构型的双频复合腔闪光灯泵浦的染料激光器,实验结果与理论基本吻合。

双频染料激光器是一种在光谱研究中非常有用的激光器。十多年来,已陆续有不少这方面的工作报道^[1~4],至今仍任发展中。这些工作虽各有各的特点,报导实验装置,结果甚多,但理论分析甚少,且由于腔内损耗较大,也不大适用于一般闪光灯泵浦染料激光器。

本文首次将复合腔调频技术应用于双频激光器,设计了两种可适用于闪光灯泵浦的双频染料激光器新构型,并根据染料激光器的半经典理论^[5],对这类双频复合腔染料激光器进行了理论分析,最后将结果直观地用图解法(“调频图”)表示出来。实验结果表明,这一理论分析可以定性地和半定量地说明双频复合腔染料激光器的工作状态和调频过程,为设计这类激光器提供了一定理论依据。

一、激光器的新构型

由同一台激光器得到各自可调谐的双频激光,关键是在腔内用某种方法将激光束分成两束各自调谐,再会合输出。已报道有用格兰棱镜分束^[3]、用光栅衍射的不同级次分束^[6],或在光束截面空间分割来分束^[1,4]等。

我们设计的两种新构型,采用光栅和介质膜反射镜进行强度分束,得到的双频激光在空间完全重合,准直,其偏振、线宽、发散角、传播方向等性能都相同,即光学特性十分一致;具有波长可各自调谐外,两者的强度比在一定范围内也可调整,且在光束截面内保持不变;结构简单,调整方便等优点。两种构型都采用掠入射光栅复合腔调频^[7]。由于使用了复合腔,激光效率较普通、调频腔高^[6];由于使用了掠入射光栅选频,激光线宽较窄,使用光学元

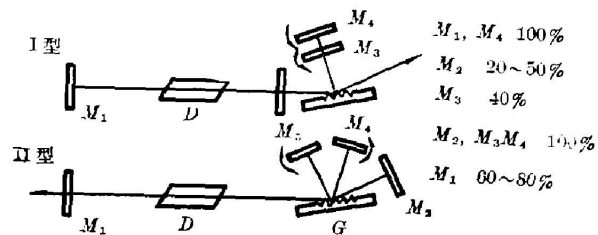


图1 两种双频染料激光器的新构型

Fig. 1 Schematic diagrams of two new types of double-frequency dye laser

收稿日期: 1982年5月20日;收到修改稿日期: 1983年3月9日

* 现在地址: 清华大学物理系近代光学教研室。

件也少。

这两种构型原理图如图 1 所示。图中 D 是染料池, G 是 1800 line/mm 的刻线光栅。

从图 1 可知, I 型实际上是宽带腔 M_1DM_2 和两个调频腔 M_1DGM_3 , M_1DGM_4 复合而成。分束是在 M_3 进行的, 同一束光被分成反射和透射两部分, 故称强度分束。两频调谐而分别转动 M_3 、 M_4 来实现, 双频激光由 G 的零级衍射输出。II 型由宽带腔 M_1DGM_2 和两个调频腔 M_1DGM_3 , $M_1DGM_2GM_4$ 复合而成。分束在光栅 G 进行, 两频调谐分别通过转动 M_3 、 M_4 来实现, 双频激光由 M_1 输出。

二、激光器中的模式耦合和调频图

近年来, 染料激光器的理论分析逐步由速率方程理论向半经典理论发展。已有人得到染料激光器的模式耦合方程^[5], 并较成功地被用于处理复合腔调频^[8]和自注入调频^[9]等问题。本文进一步将模式耦合方程应用于分析双频复合腔染料激光器中模式间的相互作用(耦合)。显然, 本文感兴趣的是窄线宽双频(以下“双频”含义同)的稳定运转。

1. 双频稳定运转条件

设激光器输出的双频为 i 频和 j 频。一般线宽($\sim 0.1 \text{ \AA}$)的情况下, 它们都是由若干腔模组成的(一个“模簇”)。记 i 频中某一模为 i 模, 其周围有 $(k-1)$ 个模(称 i' 模), 它们的强度、增益系数和损耗系数都与 i 模很相近, 即

$$E_i^2 \doteq E_{i'}^2, \quad g(\lambda_{i'}) \doteq g(\lambda_i), \quad \xi_{i'} \doteq \xi_i.$$

这里, E_i 表示 i 模的电矢量振幅; $g(\lambda_i)$ 表示受激发射线性增益系数, 与染料分子的荧光谱线型因子相似; ξ_i 是 i 模单位时间的衰减系数。 j 频的情况也一样, 由 l 个相近的模组成。

相应模式耦合方程应为:

$$\dot{E}_i = E_i \left[g(\lambda_{i'}) - \frac{1}{2} \xi_{i'} - \left(k + \frac{1}{2} \right) C_{i'i} E_i^2 - l C_{ij} E_j^2 \right], \quad (1)$$

$$\dot{E}_j = E_j \left[g(\lambda_{j'}) - \frac{1}{2} \xi_{j'} - \left(l + \frac{1}{2} \right) C_{j'j} E_j^2 - k C_{ji} E_i^2 \right], \quad (2)$$

式中, C_{pq} 是交叉饱和系数; 模数 k 、 l 可由线宽和纵模间隔决定^[8]。

由于闪光灯泵浦的染料激光器光脉宽较宽($\sim 1 \mu\text{s}$), 为简便起见, 以稳态作为实际情况的初级近似。稳态解由 $\dot{E}_i = \dot{E}_j = 0$ 得到, 很容易推出, 物理上有意义的解只有二组, 一组双频的场强都不为 0, 另一组只有一个频率的场强不为 0。这两组解分别对应双频运转和单频运转。我们的任务是找出双频染料激光器分别稳定地处于这两种运转态的条件。

采用微振动分析法, 类似 Lamb 处理双模运转问题^[10]那样, 据稳定性要求, 即分别得到双频染料激光器的

双频稳定运转条件:

$$\phi_j < \frac{l + \frac{1}{2}}{l} \phi_i, \quad \phi_i < \frac{k + \frac{1}{2}}{k} \phi_j. \quad (3)$$

单频稳定运转条件:

$$\phi_i > \frac{k + \frac{1}{2}}{k} \phi_j, \quad (i \text{ 频运转}) \quad \phi_j > \frac{l + \frac{1}{2}}{l} \phi_i \quad (j \text{ 频运转}). \quad (4)$$

上面诸式中, $\phi_i = 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi_i}{g_i}$, $\phi_j = 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi_j}{g_j}$; 这里将 $g(\lambda_i)$, $g(\lambda_j)$ 简记为 g_i , g_j 。推导中, 应用了文献[8]给出的 C_{pn} 系数间的关系

$$\frac{C_{in}}{g_i} = \frac{C_{jp}}{g_j} = \frac{C_{np}}{g_n} = F(\lambda_p). \quad (5)$$

$F(\lambda_p)$ 是只跟 λ_p 有关的某一函数。

显然, (3) 式描述了两模簇相互作用的结果可使两者共存的条件, (4) 式则描述了一个抑制掉另一个的条件。

2. 激光器的抑制宽带条件和双频强度比

复合腔激光器中, 在待选模尚未完全抑制住宽带振荡时, 还有若干较弱的宽带振荡模存在^[8], 设统称为 n 模。因之, 本文处理的是两个强“模簇”和若干弱模的耦合问题。相应模式耦合方程除 (1)、(2) 式外, 还有下式:

$$\dot{E}_n = E_n \left[g_n - \frac{1}{2} \xi_n - kC_{ni}E_i^2 - lC_{nj}E_j^2 \right]. \quad (6)$$

设稳定运转时输出双频, 则

$$g_i - \frac{1}{2} \xi_i - \left(k + \frac{1}{2} \right) C_{ii}E_i^2 - lC_{ij}E_j^2 = 0. \quad (7)$$

$$g_j - \frac{1}{2} \xi_j - \left(l + \frac{1}{2} \right) C_{jj}E_j^2 - kC_{ji}E_i^2 = 0. \quad (8)$$

且有 i 频和 j 频抑制住其余 n 模的条件:

$$g_n - \frac{1}{2} \xi_n - kC_{ni}E_i^2 - lC_{nj}E_j^2 < 0. \quad (9)$$

经过简单运算, 并注意到要抑制住所有 n 模, 只须能抑制住增益线型峰值处的 λ_0 模即可, 则得到双频抑制宽带振荡的必要条件:

$$\frac{k}{k + l + \frac{1}{2}} \phi_i + \frac{l}{k + l + \frac{1}{2}} \phi_j > 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi_n}{g_0}. \quad (10)$$

令 $k=0$ 或 $l=0$, 即可得到单频抑制宽带振荡的必要条件, 回到文献[8]的结果。

此外, 还可得到双频强度比 (由 (7)、(8) 式):

$$\frac{I_i}{I_j} = \frac{kF(\lambda_j)}{lF(\lambda_i)} \cdot \frac{\left(l + \frac{1}{2} \right) \phi_i - l\phi_j}{\left(k + \frac{1}{2} \right) \phi_j - k\phi_i}. \quad (11)$$

式中 I_i 、 I_j 分别表示 i 频和 j 频的强度。

3. 调频图

为了直观地分析这类激光器的工作状态, 把 (3)、(4) 和 (10) 式等用图来表示 (见图 2); 图 2(c) 中的图形 $ABCD$ 我们称之为“调频图”。图中, AB 线的方程为

$$\phi_i = 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi_i}{g_i},$$

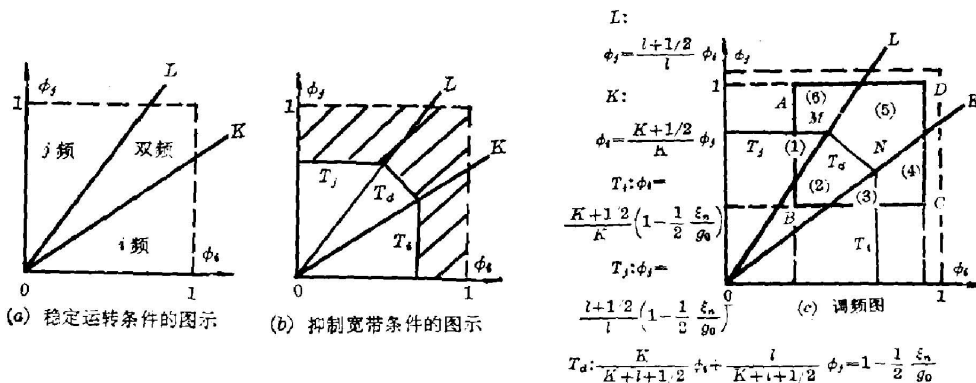


图 2

(a) 稳定运转条件的图示; (b) 抑制宽带条件的图示; (c) 调频图

Fig. 2

(a) A graphical illustration for stable operation condition; (b) A graphical illustration for condition of inhibiting broad-band oscillation; (c) A tuning diagram

是 i 频起振线; BC 线的方程为

$$\phi_j = 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi_j}{g'}$$

是 j 频起振线, g' 是起振时对应的增益值; CD 线和 DA 线分别是 i 频、 j 频的峰值线。

调频图上的一个点, 表示这类激光器的一个工作状态, 称工作点, 图上有六个区: 双频工作区②、⑤; 单频工作区①、⑥(j 频)和③、④(i 频); 其中④、⑤、⑥为无宽带区。调频图上的任一条线, 表示一个调频过程, 称调频线。

利用调频图除可直观地分析激光器的工作状态外, 还可

(1) 直接看出这类激光器有四种典型的调频过程, 如图 3 所示。各过程经历的调频步骤是:

- 过程(1) j 频 + 宽带 $\rightarrow j$ 频 + 宽带 + i 频 \rightarrow 宽带 + i 频 $\rightarrow i$ 频;
- 过程(2) j 频 + 宽带 $\rightarrow j$ 频 + 宽带 + i 频 $\rightarrow j$ 频 + i 频 $\rightarrow i$ 频;
- 过程(3) j 频 $\rightarrow j$ 频 + i 频 $\rightarrow i$ 频;
- 过程(4) j 频 + 宽带 + i 频 $\rightarrow j$ 频 + i 频 (“对称调频”)*

这四种典型过程都已在实验上得到证实(见后)。

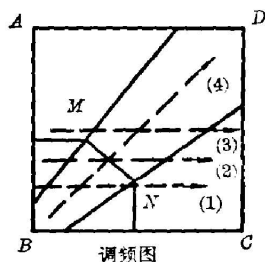


图 3 四种典型的调频过程

Fig. 3 Four typical tuning processes

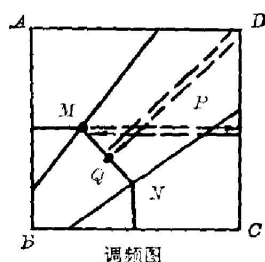


图 4 对称调频和只调 i 频

Fig. 4 Symmetric tuning, and i -frequency tuning

* 即 $g_i = g_j, \xi_i = \xi_j$ 的调频过程。

(2) 直观地得出无宽带条件下只调谐一频的最大宽度 $\Delta\lambda_{SM}$ 。

从图 4 可以看到, 无宽带时, 只调 i 频则从 M 点出发调谐宽度最大; 只调 j 频则从 N 点出发调谐宽度最大。 M 、 N 点分别是 T_d 线和 L 线、 K 线的交点, 因之有

$$\begin{cases} g_i(M) = \frac{\xi_i}{\xi_n} g_0, & (12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_j(M) = \xi_j \left[\left(1 + \frac{1}{2l} \right) \frac{\xi_n}{g_0} - \frac{1}{l} \right]^{-1}, & (13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_i(N) = \xi_i \left[\left(1 + \frac{1}{2k} \right) \frac{\xi_n}{g_0} - \frac{1}{k} \right]^{-1}, & (14) \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_j(N) = \frac{\xi_j}{\xi_n} g_0. & (15) \end{cases}$$

由激光器的具体构型确定 ξ_i 、 ξ_j 和 ξ_n 后, 利用染料的荧光谱线型, 由 (12)、(15) 求出 $g_i(M)/g_0$ 或 $g_j(N)/g_0$ 即可用作图法得到 $\Delta\lambda_{SM}$ ^[8]。

从图 4 还可得出, 在上述调频过程中, 双频共存时固定一频, 另一频的调谐宽度 $\Delta\lambda_{DW}$ 。例如固定 j 频, 调谐 i 频时, 双频共存范围对应 MP 段。易求出

$$g_i(P) = \xi_i \left[\left(1 + \frac{1}{2k} + \frac{1}{2l} + \frac{1}{4kl} \right) \frac{\xi_n}{g_0} - \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{l} + \frac{1}{kl} \right) \right]^{-1}. \quad (16)$$

由 (12) 式求出 $g_i(M)/g_0$, 由 (16) 式求出 $g_i(P)/g_0$ 后, 同样用作图法即可在染料荧光谱线型图上得到 $\Delta\lambda_{DW}$ 。

(3) 直观地得出“对称调频”的最大调频宽度 $\Delta\lambda_{QM}$ 。

由图 4 可看到, 从 Q 点出发“对称调频”宽度最大。 Q 是 T_d 线和 $\phi_i = \phi_j$ 线的交点, 因之有

$$g_i(Q) = \xi_i \left[\left(1 + \frac{1}{2k+2l} \right) \frac{\xi_n}{g_0} - \frac{1}{k+l} \right]^{-1} = g_j(Q). \quad (17)$$

用与 (2) 相同的方法可得到 $\Delta\lambda_{QM}$ 。

三、实 验

在一台闪光灯泵浦的染料激光器上进行了前述两种构型的实验。染料使用 Rh 6G 乙醇溶液, 浓度 $2 \times 10^{-4} M$ 。构型 I 中, $M_1DM_2 = 32 \text{ cm}$, $M_2GM_3 = 15 \text{ cm}$, $M_3M_4 = 1 \text{ cm}$, 光栅入射角 88° ; 构型 II 中, $M_1DGM_2 = M_1DGM_3 = M_1DGM_4 = 48 \text{ cm}$, 光栅入射角 80° 。

两种构型的 ξ_n 和 ξ_i 、 ξ_j 类似文献 [7] 计算, 对于 I 型有:

$$\xi_n^I = -\frac{C}{2L_1} \ln R_2, \quad (18)$$

$$\xi_i^I = \xi_j^I = -\frac{C}{2L_1} \ln [R_2 + T_2^2 r_1 r_1' R_3 (1 + r_1 r_1' R_2 R_3)], \quad (19)$$

其中, $L_1 = M_1DM_2 = 32 \text{ cm}$; R_2 、 T_2 表示 M_2 的反射率、透射率; r_1 、 r_1' 分别是光栅 G 的正、反向一级衍射效率; R_3 是 M_3 的反射率, 已选取 $R_3 \sim 0.38$, 故 $\xi_i^I = \xi_j^I$ 。

对于 II 型,

$$\xi_n^{II} = -\frac{C}{2L_2} \ln (R_1 r_0 r_0'), \quad (20)$$

其中 $L_2 = M_1 D G M_2 = 48 \text{ cm}$; r_0 、 r'_0 分别是光栅 G 的正、反向零级衍射效率。设 M_3 调节的是 i 频, 则

$$\xi_i^{\text{II}} = -\frac{C}{2L_2} \ln[R_1(r_0 r'_0 + r_1 r'_1)] \quad (21)$$

有关实验结果如下:

1 四种典型调频过程的观察

使用摄谱仪观察并摄谱, 得到的光谱照片见图 5(I 型), 照片上调频过程进行方向是从上向下(对照图 3 中箭头指向)。实验证明, 前述理论分析能定性地说明此类激光器中的调频过程。

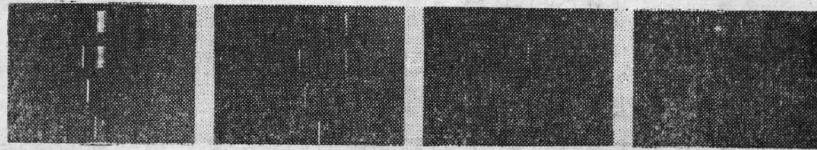


图 5 四种典型调频过程的光谱照片

Fig. 5 Spectral photographs of four typical tuning processes

2 调频宽度的观测

图 6 拍摄的是只调 i 频的过程和“对称调频”过程(I 型, 泵浦能量 $E_p \sim 13.2 \text{ J}$)。照片下部是同时拍摄的 F_e 谱, 已算出两条参考谱线的波长。测量结果为 $\Delta\lambda_{SM} \sim 210 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda_{OM} \sim 200 \text{ \AA}$, 由(12)式和(17)式得到的相应理论值分别是 $\sim 196 \text{ \AA}$ 和 $\sim 190 \text{ \AA}$, 与实验基本吻合。从图 6 还可看到, 此时 $\Delta\lambda_{DW}$ 约为 40 \AA , 但由(16)式得到的值只有 $\sim 10 \text{ \AA}$, 有较大偏差。

图 7 是 $\Delta\lambda_{SM}$ 与 E_p 的关系及 $\Delta\lambda_{SM}$ 与 R_2 的关系(I 型)。虚线表示理论值, 实线表示实验值。

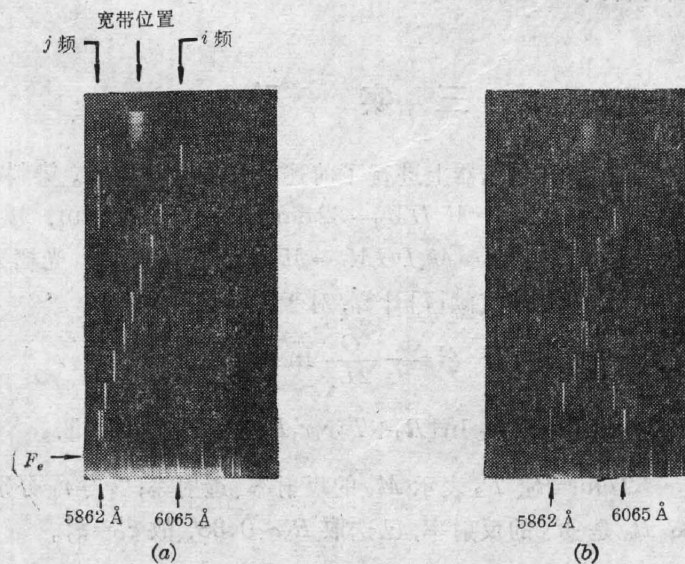


图 6 (a) $\Delta\lambda_{SM}$ 的测量; (b) $\Delta\lambda_{OM}$ 的测量

Fig. 6 (a) Measurement of $\Delta\lambda_{SM}$; (b) Measurement

3 输出能量 E_0 与泵浦能量 E_p 的关系 (每脉冲)

如图 8 所示, 曲线 1 表示宽带输出, 曲线 2 表示双频输出 ($i \sim 5900 \text{ \AA}$, $j \sim 6000 \text{ \AA}$), 曲线 3 表示普通调频腔输出。由图可知, I 型调频效率 (调频输出能量与宽带腔输出能量之比) 高于 26%, 体现了复合腔的优点; II 型的较低, 但也比普通调频腔为高。

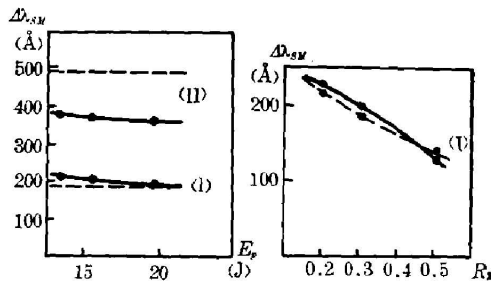


图 7 $\Delta\lambda_{SM}$ 与 E_p 、 R_2 的关系

Fig. 7 Relationships of $\Delta\lambda_{SM}$ with E_p and R_2

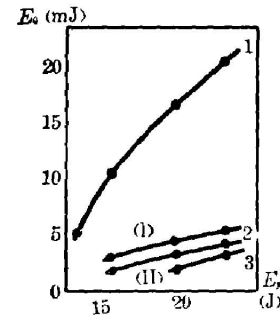


图 8 E_0 与 E_p 的关系

Fig. 8 Relationships between E_0 and E_p

四、讨 论

总之, 采用强度分束的复合腔双频染料激光器有较高的调频效率, 可适用于闪光灯泵浦的染料激光器。本文的理论分析为设计和合理使用这类激光器提供了一定的理论依据。

这类激光器除前述若干优点外, 不足之处是双频共存时固定一频, 另一频的调谐宽度 $\Delta\lambda_{DW}$ 较窄 (理论值 $\sim 10 \text{ \AA}$, 实验值 $\sim 40 \text{ \AA}$)。这反映了强度分束时两频间仍有较强的竞争。此外, 由于理论中未顾及染料温度和密度的热涨落及泵浦光造成的染料光学不均匀性引起模簇间耦合的削弱, 以及推算中的某些简化处理, $\Delta\lambda_{DW}$ 理论值与实验值偏差也较大。

本文的工作是在北京大学郑乐民先生热情关怀指导下进行的; 中国科学院物理所许祖彦、邓道群同志在工作中给予了很多有益的建议和帮助; 北京大学物理系黄植文副教授在实验中提供了不少方便, 作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] S. Chandra *et al.*; *Opt. Commu.*, 1979, **31**, No. 1 (Oct), 73.
- [2] Edward F. *et al.*; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 12 (Dec), 2773.
A. A. Friesem *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23** No. 5 (Sep), 249
- [3] K. H. Yang *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, No. 12 (Dec), 669
- [4] A. J. Schmidt; *Opt. Commu.*, 1975, **14**, No. 2 (Jun), 294.
Haim Lotem *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**, No. 6 (Sep), 344.
- [5] 潘少华; 《物理学报》1981, **30**, No. 8 (Aug), 1067.
- [6] Yehiam Prior; *Rev. Sci. Instrum.*, 1979, **50**, No. 2 (Feb), 259.
- [7] 吴令安等; 《激光》, 1982, **9**, No. 11 (Nov), 698.
- [8] 许祖彦等; 《物理学报》, 1981, **30**, No. 6 (Jun), 820.
- [9] 邓道群等; 《光学学报》, 1981, **1**, No. 6 (Nov), 531.
- [10] M. Sargent *et al.*; *Laser Physics*, (Addison-Wesley, 1974).

Mode coupling in a double-frequency compound cavity dye laser

LI SHIQEN ZOU YINGHUA AND XIA ZHONGJU

(Department of Physics, Beijing University)

(Received 20 May 1982, revised 9 March 1983)

Abstract

In this paper the mode coupling equations are used to study double-frequency dye laser with a compound cavity. The double-frequency stable operation condition, the condition of inhibiting broad-band oscillations and the intensity ratio of two frequencies are deduced. Using a graphical method it has been found that this kind of laser has four typical tuning processes and some parameters can be conveniently obtained. Two new designs for double-frequency flashlamp-pumped dye laser with a compound cavity are described. The experimental results agree with the theory on the whole.