

宽谱染料激光器的数值模型及实验验证

王墨戈 陆启生 许晓军 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2007 年 6 月 1 日收到,2007 年 8 月 1 日收到修改稿)

应用染料激光器半经典理论,数值模拟了脉冲染料激光器双频及宽谱共增益区的谱线竞争效应,与实验结果符合较好.在双频相关调谐工作条件下,调谐范围增大近 25%.在宽谱工作条件下,随着输出耦合损耗增大,谱线宽度逐渐减小.

关键词:染料激光器,半经典理论,谱线竞争

PACC:7000,7820,7840D

1. 引言

宽谱(多谱线)高平均功率的染料激光器在激光光谱学、军事等领域中是一种重要的光源^[1,2].以往的多谱线激光器都采用多个波长激光器的并束实现.多波长激光共轴的调节难度大,以及由于并束而产生的耦合损耗是难以回避的问题.共增益区的脉冲染料激光器则具有多波长激光共轴性好的优点,同时能量提取效率也比可调谐单波长染料激光器高.但是由于多个谱线激光处在同一增益介质中,所以谱线竞争效应异常激烈.

潘少华^[3]采用半经典理论,得到了染料激光器模式耦合理论.已有一系列实验^[4-7]研究了多种共增益区双谱线调谐的结构.张国威^[8,9]研究了双频及多频染料激光器的相关调谐原理.分析稳态下多频振荡的充分条件,并给出了相关调谐的定义及优点,获得了宽调谐范围.但对于短脉冲染料激光,这种方法并不适用.Huang^[10]和 Sun 等^[11]研究了纵向抽运宽谱染料激光的效率问题,但未对激光光谱进行研究.本文将采用染料激光器模式耦合半经典理论分析脉冲染料激光器多谱线竞争效应.

2. 理论基础

图 1 为简化的染料 Rh6G 能级结构图. $S_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 表示各个本征能级, $|\psi_a^i\rangle, |\psi_b^i\rangle$ 分别为第 i 个本征能级的振动子能级和最低振动子能级.在本模型中, $|\psi_0^1\rangle$ 为激光上能级, $|\psi_a^0\rangle$ 为激光下能级,

$|\psi_0^0\rangle$ 为基态能级.从图中可以看出,由于激光下能级的转动能级分裂及碰撞等因素而可以认为是一个能带,从而造成了染料激光器的宽谱性质.

染料激光器的模式耦合方程^[1]为

$$\dot{E}_i = E_i \left(a_i - b_i E_i^2 - \sum_{j \neq i} c_{ij} E_j^2 \right), \quad (1)$$

其中 a_i 为线性净增益系数, b_i 为自饱和系数, c_{ij} 为交叉饱和系数,即 j 频对 i 频的影响因子.在忽略染料三重态及自吸收等效应的影响,三个系数的表达式为

$$a_i = \frac{1}{2} \pi v_i (\epsilon \hbar)^{-1} \bar{N}_1 g(v_i) |\mu(v_i)|^2 - \frac{1}{2} v_i / Q_i, \quad (2)$$

$$b_i = \frac{2 + \eta}{8} \pi^2 \hbar^{-3} v_i (\epsilon \gamma_1)^{-1} \bar{N}_1 g(v_i)^2 |\mu(v_i)|^4, \quad (3)$$

$$c_{ij} = \frac{\pi^2}{8} \hbar^{-3} v_i (\epsilon \gamma_1)^{-1} \bar{N}_1 [2 + \eta N_{X_{j-1}} / \bar{N}_1] \times g(v_i) |\mu(v_i)|^2 g(v_j) |\mu(v_j)|^2, \quad (4)$$

式中 v_i, v_j 为光频率, ϵ 为介电常数, \bar{N}_1 为增益区长度内当具有零电场值时能级 $|\psi_0^1\rangle$ 上的粒子数, Q_i 为 i 频的品质因子, $g(v_i)$ 为能级谱密度函数, $\mu(v_i)$ 为电偶极矩, γ_1 为能级 $|\psi_0^1\rangle$ 的自发辐射速率,

$N_{X_{j-1}} = \frac{1}{L} \int_0^L dz N_j(z, t) \cos[\chi_{j-i} \pi z / L]$, L 为增益区长度, η 对于单向行波运转等于零;对于驻波运转等于 1.(2) 式中等式右边第一项表示当具有零电场值时, S_1 态的受激发射(即小信号增益项);第二项表示腔模损耗.

考虑到电场强度 E_i 与光强 I_i 的关系，

$$I_i = \frac{n}{\Omega} E_i^2 = K E_i^2, \quad (5)$$

其中 n 为介质折射率, $\Omega = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为阻抗, μ_0, ϵ_0 分别为真空中的导磁率、介电常数.

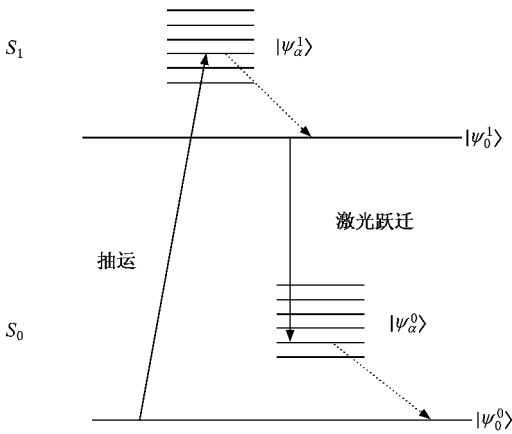


图 1 简化的染料能级结构图

可以得到光强的模式耦合方程

$$\dot{I}_i = I_i (A_i - B_i I_i^2 - \sum_{j \neq i} C_{ij} I_j^2). \quad (6)$$

比较 (1) (6) 式, 通过 (5) 式, 可以得到两式中系数之间的对应关系

$$\begin{aligned} A_i &= 2a_i, \\ B_i &= 2b_i/K, \\ C_{ij} &= 2c_{ij}/K. \end{aligned} \quad (7)$$

考虑增益介质的小信号增益系数分布 g_0 , 则单位时间内的增益 g_{0i} 系数为

$$g_{0i} = \frac{g_0 2L}{2nL/c} = \frac{g_0 c}{n}, \quad (8)$$

c 为光速 (8) 式对应于 (2) 式第一项的两倍. 则可以得到未知函数 $g(v_i) |\rho(v_i)|^2$ 的分布:

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(v_i) &= g(v_i) |\rho(v_i)|^2 \\ &= \frac{g_{0i}}{\pi v_i (\epsilon \hbar)^{-1} N_1} = \frac{c \sigma_c(v_i)}{n \pi v_i (\epsilon \hbar)^{-1}}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\sigma_c(v_i)$ 为染料受激辐射截面谱分布.

将 (9) 式代入 (2) (4) 式, 并应用 (7) 式, 则可以得到光强模式耦合方程的各项系数 A_i, B_i, C_{ij} . 采用自发辐射谱密度分布, 初始化光强分布. 通过方程 (6) 的求解, 我们可以得到在抽运脉宽的时间范围内, 各谱线的模式竞争过程.

3. 计算结果及讨论

数值模拟中, 采用染料 Rh6G 参数为基础, 图 2 表示了 Rh6G 的受激辐射截面的分布, 抽运源为铜蒸气激光器, $\lambda_p = 510.6 \text{ nm}$, 受激吸收截面为 $\sigma_{01}(p) = 2.2347 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 抽运光功率为 6 W, 脉冲重复频率为 8.3 kHz, 脉宽 20 ns.

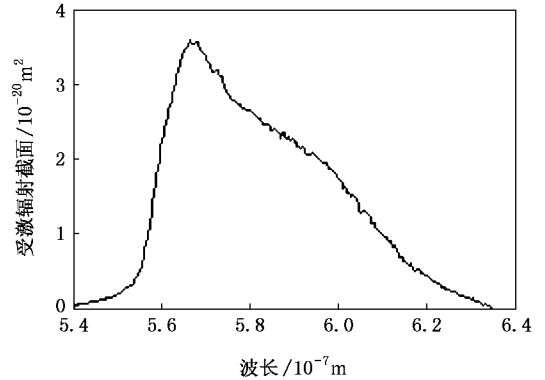


图 2 染料若丹明 6G 受激辐射截面分布

3.1. 双频调谐

固定一支分别为波长 $\lambda_1 = 566 \text{ nm}$ 和 $\lambda_1 = 590.1 \text{ nm}$, 调谐另一支波长, 得到的波长调谐曲线分别为图 3 和图 4 所示.

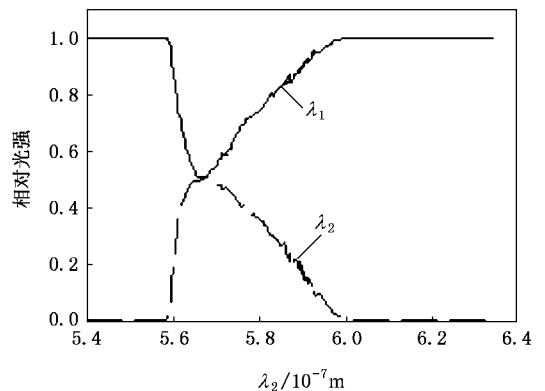


图 3 固定波长为 566 nm 的双频调谐关系图

两图分别反映了在 20 ns 抽运脉宽的条件下, 固定波长 λ_1 分别处于增益区中心和偏离中心区时, 调谐波长 λ_2 , 两腔的相对光强分布. 可以看出, 当 λ_1 处于增益区中心时, 两波长间增益竞争激烈, 可调谐范围缩短. 当 λ_1 偏离增益中心时, 可调谐区域增大, 结论与文献 [7] 相一致.

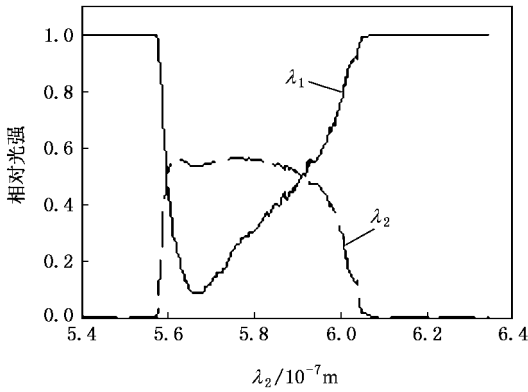


图4 固定波长为 590 nm 的双频调谐关系图

文献 [8] 中采用稳态解的方式分析双频谱线竞争效应. 我们认为在脉冲染料激光器中并不适用. 由于谱线竞争的复杂性, 在短脉冲激光抽运条件下, 谱线竞争无法达到稳态. 如图 5 所示, 抽运脉宽为 20 ns, 双波长为 $\lambda_1 = 566 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 590.1 \text{ nm}$ 时的光强与时间演化图.

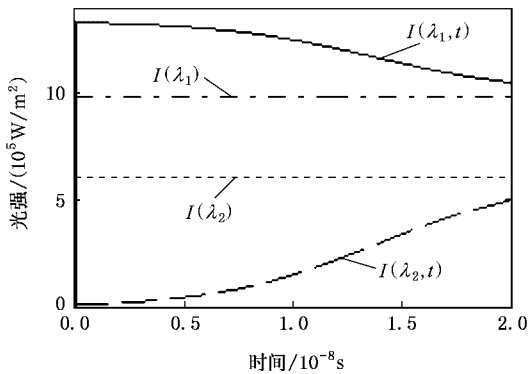


图5 稳态解与瞬态解的比较

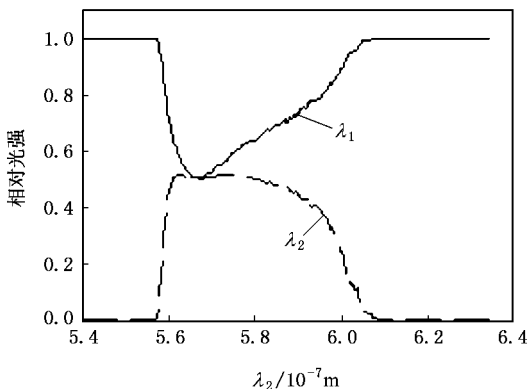


图6 固定波长为 566 nm 的双频相关调谐关系图

图中 $I(\lambda_1, t), I(\lambda_2, t)$ 分别为双波长光强随时间的演化图, $I(\lambda_1), I(\lambda_2)$ 则为方程组 (6) 的稳态解.

可以看出, 在短脉冲抽运条件下, 双波长谱线竞争效应无法达到稳态. 光强为在抽运时间尺度内的光强时间平均.

根据文献 [8] 中的相关调谐关系, 通过改变不同波长的损耗值, 我们得到了固定波长 $\lambda_1 = 566 \text{ nm}$ 的双频调谐关系图, 如图 6 所示. 与图 3 相比, 相关调谐的范围加宽约 25%. 同时, 在长波方向, 两支腔功率更加接近. 由于在 20 ns 时间范围内, 双谱线竞争未达到稳态, 所以两波长光强未能相等. 但是可以看出, 通过调节其中一支腔的增益损耗比, 可以使两波长的功率接近相等输出.

3.2. 宽谱染料激光器模式竞争

根据 (6) 式, 我们数值模拟了平平腔宽谱染料激光的谱线竞争效应, 如图 7 所示. 表示了输出耦合损耗为 0.22, 0.4 时的染料激光光谱分布数值模拟结果. 计算中的谱线间隔为 0.3 nm, 小于激光下能级各转动能级间隔. 实验中采用数值模拟参数, 利用 Wgd-8A 型光谱仪得到图 8 的结果. 图 7 与图 9 分别

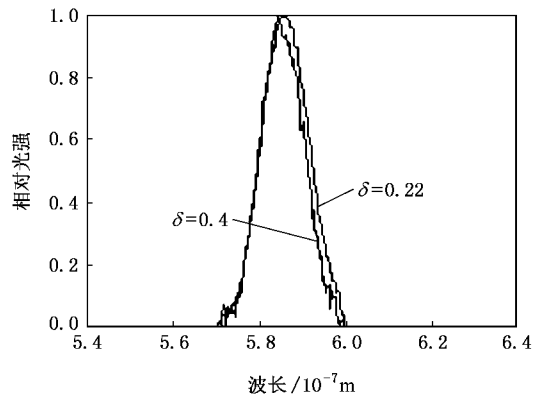


图7 输出耦合率为 0.22 和 0.4 时的模拟光谱图(考虑自吸收效应)

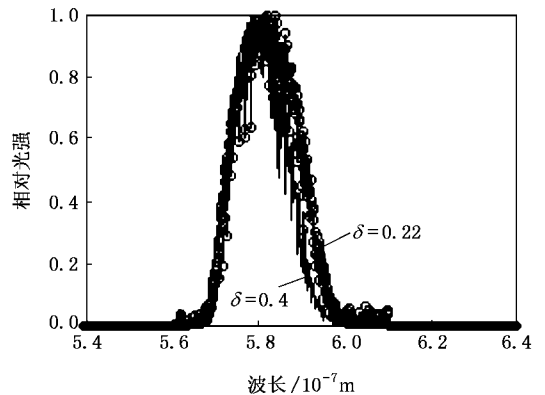


图8 输出耦合率为 0.22 和 0.4 宽谱竞争实验结果

为有无染料自吸收效应时的数值模拟结果.

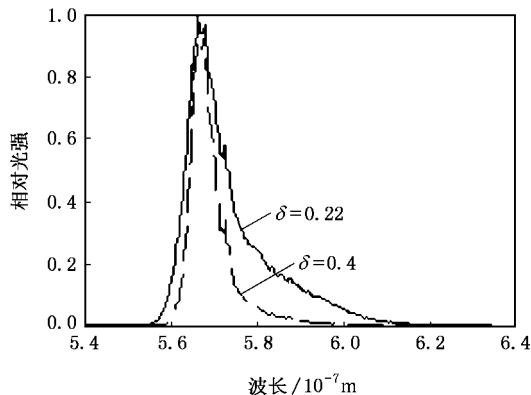


图9 输出耦合率为0.22和0.4时的模拟光谱图(未考虑自吸收效应)

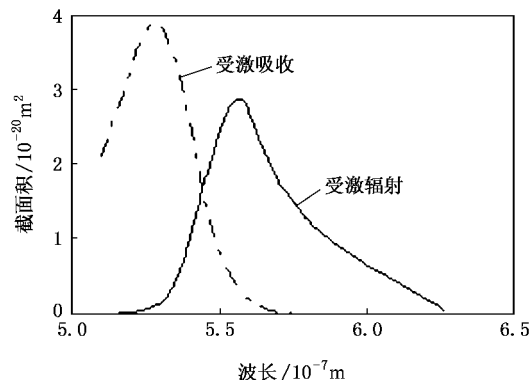


图10 若丹明6G受激吸收和受激辐射截面分布

如图10所示,染料的吸收光谱和在荧光光谱的短波部分有一定的重合,所以当宽谱染料激光输出时,存在染料的自吸收效应.比较图7,8,9,可以看

出当未考虑自吸收效应时,模拟结果中的中心波长与实验结果相差较大.且未能解释随着输出耦合损耗的增大,中心波长略向短波方向移动的实验现象.图7的模拟结果与实验结果较为符合.

实验与模拟结果表明:宽谱染料激光的中心波长未出现在荧光中心,同时随着腔损耗的增大,谱线宽度逐渐减小,中心波长略向短波方向移动.我们认为这是由染料自吸收效应和腔损耗两种机理共同作用的结果.自吸收效应抑制了荧光中心谱线的振荡,令中心波长产生红移.同时由于在长波范围内由于自吸收效应影响很弱,此时腔损耗成为该范围内的主要损耗源.当腔的输出耦合损耗增大时,与中心波长比,长波的竞争能力减小,从而使得中心波长略向短波方向移动.由于在数值模拟中考虑染料的自吸收效应时,采用的染料吸收辐射截面与实际工作染料溶液的数据有一定的差距,所以在中心波长和谱宽的具体数值上略有偏差.

4. 结 论

在短脉冲激光抽运的条件下,谱线竞争效应无法达到稳态.本文应用染料激光器半经典理论,数值模拟了双频及宽谱共增益区的谱线竞争效应,与实验结果符合较好.在双波长工作条件下,通过调节其中一支的腔损耗,可以达到双波长功率近似相等输出,并且调谐范围得到加宽.在宽谱工作条件下,随着输出耦合损耗增大,谱线宽度逐渐减小,中心波长略向短波方向移动.

- [1] Chen Y K, Dai H, Jiang N, Pu X Y, Yang Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2443 (in Chinese) [陈永康、戴宏、江楠、普小云、杨正 2003 物理学报 **52** 2443]
- [2] Jia S T, Li C Y, Ma W G, Xiao L T, Yin W B, Zhang L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 814 (in Chinese) [贾锁堂、李昌勇、马维光、肖连团、尹王保、张临杰 2002 物理学报 **51** 814]
- [3] Pan S H 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 1067 (in Chinese) [潘少华 1981 物理学报 **30** 1067]
- [4] Herschel S P 1972 *Appl. Phys. Lett.* **21** 339
- [5] Dinev S G, Koprinkov I G, Stamenov K V, Stankov K A 1980 *Opt. Commun.* **32** 313

- [6] Dorsinville R 1978 *Opt. Commun.* **24** 31
- [7] Nair L G, Dasgupta K 1980 *J. Quantum Electronics* **QE-16** 111
- [8] Zhang G W 2002 *Tunable Lasers* (National Defense Industry Press) (in Chinese) [张国威 2002 可调谐激光技术(国防工业出版社)]
- [9] Zhang G W 2002 *Acta. Opt. Sin.* **10** 881 (in Chinese) [张国威 2002 光学学报 **10** 881]
- [10] Huang Z G, Namba K 1980 *Jpn. J. Appl. Phys.* **20** 2383
- [11] Sun W, Tang C S, Zhuge X B, Chen M S 1986 *Opt. Commun.* **58** 196



The theoretical model of broad band dye laser and experimental validation

Wang Mo-Ge Lu Qi-Sheng Xu Xiao-Jun Guo Shao-Feng

(*College of Optoelectronic Science and Engineering ,National University of Defense Technology ,Changsha 410073 ,China*)

(Received 1 June 2007 ; revised manuscript received 1 August 2007)

Abstract

The spectral competition in pulsed dye laser is modified by semiclassical dye laser theory ,showing good agreement with experimental results. Under the circumstance of interrelated competition of double-wave ,the tuned spectrum is expanded by 25% .The spectrum is gradually compressed with the increase of the coupler loss under the condition of broad spectrum width.

Keywords : dye laser , semiclassical theory , spectral competition

PACC : 7000 , 7820 , 7840D