

闪光灯泵浦染料激光器 PTM 运转的能量转移特性

潘安培 汤星里

(中国科学院上海光机所)

提要: 根据由速率方程导出的一组微分-积分方程,研究了闪光灯泵浦染料激光器 PTM 运转时的能量转移特性。比较了 PTM 运转和正常运转时能量转移过程的主要区别。给出了转移到受激辐射、非受激辐射、腔损耗、三重态吸收等方面的能量与腔内光子寿命的关系。

Energy transfer characteristics of a flashlamp pumped dye laser in PTM operation

Pan Anpei, Tang Xingli

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The energy transfer characteristics of a flashlamp pumped dye laser in PTM operation is investigated according to the differential-integral equations derived from the rate equations. Principal differences between energy transfer processes in normal operation and PTM operation are compared. The dependences of energy transfer to stimulated emission, non-stimulated emission, the loss in the cavity and the absorption in the triplet etc on the photon life-times are given.

一、引 言

激光器 PTM 运转(即腔倒空)是获取高功率窄脉冲的方法之一。染料激光器 PRM 运转通常是无效的。而由于染料的激发态寿命仅毫微秒量级,还存在着三重态的影响,这使得染料激光器的 PTM 运转具有特殊规律。这方面的实验及分析已有报导^[1,2]。我们在直管闪光灯泵浦染料激光器上通过 PTM 运转,使激光脉冲宽度从微秒压缩到毫微秒,脉

冲功率从几十千瓦提高到兆瓦。本文结合实验条件,从染料激光的速率方程及由此导出的一组微分-积分方程出发,以 R6G 为典型染料研究染料吸收了光泵能量后的能量转移规律。

二、基本方程组

图 1 是染料激光 PTM 运转原理图。图中 M_1 、 M_2 是全反射镜,组成无输出耦合的

收稿日期: 1981 年 10 月 5 日。

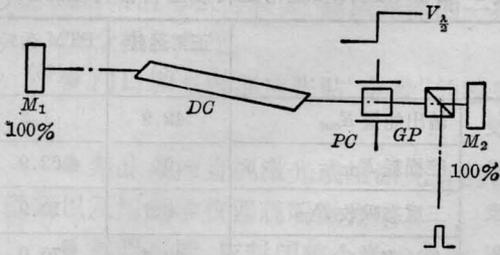


图1 PTM 运转原理图

谐振腔, PC 为普克尔盒, GP 为 o 光和 e 光双输出格兰棱镜, DC 为染料管。 PC 和 GP 组成光开关。激励开始后, PC 上加电压, 谐振腔处于通光状态。当腔内光子密度达到极大值时, 普克尔盒加半波电压, 把贮存在腔内的光子瞬时倒出腔外, 输出一个高功率窄脉冲。该脉冲能量为:

$$E_{out} = h\nu AL_0q \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数; ν 为激光频率; A 为腔模平均截面积; L_0 为腔长; q 为光子密度。

图 2 是染料分子的能级图。图中 αS_1 、 βS_1 代表基态的两个振动能级, S_2 、 S_3 代表激发态的两个振动能级, T_1 为三重态。受激发射产生于 S_2 和 βS_1 之间。由图 2 可得:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\tau_f} = K_f + K_{IC} + K_{ST} \quad (3)$$

式中 α 、 β 分别为热平衡时基态高、低振动能级粒子数的比例系数; τ_f 为荧光寿命; K_f 是自发辐射速率; K_{IC} 和 K_{ST} 分别是单态无辐射弛豫速率和系际交叉弛豫速率。考虑到激励过程中, βS_1 、 S_3 的能级寿命很短 (10^{-12} 秒), S_3 上粒子数可以忽略, 比例系数 β 近似

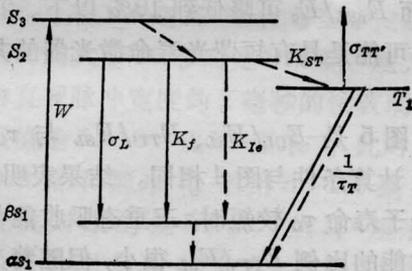


图2 染料能级图

地用热平衡时的值代替, 由此得如下激光振荡的速率方程组:

$$\frac{dN_2}{dt} = W(t) - c\sigma_L q(N_2 - \beta N_1) - \frac{N_2}{\tau_f} \quad (4-a)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = K_{ST}N_2 - \frac{N_T}{\tau_T} \quad (4-b)$$

$$\frac{dq}{dt} = c\sigma_J q F(N_2 - \beta N_1) - \frac{q}{\tau_c} - c\sigma_{TT'} F q N_T \quad (4-c)$$

$$N_1 + N_2 + N_T = N \quad (4-d)$$

式中 N_1 、 N_2 、 N_T 分别是基态、激发态和三重态粒子密度; N 是染料浓度; t 为时间; σ_L 是受激发射截面; τ_T 和 $\sigma_{TT'}$ 分别是三重态寿命和它对激光的吸收截面; c 为光速; $F = \frac{L_D}{L_C}$, L_D 为激活介质长; τ_c 是腔内光子平均寿命, 可用下式表示:

$$\tau_c = \frac{L_C}{c\gamma} \quad (5)$$

$W(t)$ 为泵浦速率, 取为高斯形;

$$W(t) = W_0 \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{\ln 2}}{T} t\right)^2\right] \quad (6)$$

式中 γ 为腔内平均单程损耗; T 为泵浦脉冲半宽度; W_0 是峰值泵浦速率。

从能量观点看, 以上方程组中, (4-a) 可理解为染料吸收了光泵能量 (称有效吸收能 E_e) 转换为受激发射能 (E_{SL}) 和非受激发射能 (E_{nSL}), (4-c) 可理解为受激发射能又转移到腔损耗 (E_{OL})、三重态吸收损耗 ($E_{TT'}$) 这两部分, 输出能量 (E_{out}) 也属于 E_{SL} 。从 (3) 式看, 非受激辐射过程包括自发辐射、单态无辐射弛豫和系际交叉弛豫三部分, 这些过程转移的能量分别用 E_{Kf} 、 E_{KIC} 、 E_{KST} 表示。图 3 表示上述能量转移过程。

为了便于计算, 我们略去泵浦光和激光波长之差, 并把每消耗一个激发态粒子看成消耗一份能量, 由图 3 可得各部分能量有以下关系:

表 1 PTM 运转和正常运转能量转移特性比较*

		正常运转 (%)	PTM 运转 (%)
受激发射	输出能量 E_{out}	42.9	1.2
	腔损耗 E_{CL}	0	62.9
	三重态吸收 $E_{TT'}$	6.7	10.9
	合计 E_{SL}	49.6	75.0
非受激发射	自发辐射 E_{Kf}	42.8	21.2
	单态无辐射弛豫 E_{KIC}	2.6	1.3
	系际交叉 E_{KST}	5.0	2.5
	合计 E_{nSL}	50.4	25.0
E_e		100.0	100.0

* 正常运转时输出反射镜反射率取 $R=0.4$, 其它参数与 PTM 运转相同。

表中可以看出, 正常运转时约有一半能量消耗在非受激辐射方面 (主要是自发辐射), 只有 50% 能量以受激辐射形式释放出来。PTM 运转时受激辐射能 E_{SL} 提高到 75%, 非受激辐射能 E_{nSL} 下降了 25%, 三重态吸收能 $E_{TT'}$ 从正常运转时的 6.7% 提高到 10.9%。两种运转下, 单态无辐射弛豫和单态至三重态的无辐射弛豫所转移的能量都不大, 它们显然不是主要因素。

图 4 是在腔长固定条件下, E_{SL}/E_e 、 E_{SL}/E_e 与 τ_c 的关系。计算中除腔损耗 γ 外其它参数与表 1 所用相同。结果表明, PTM 运转中随着 τ_c 的增长, 受激辐射能与有效吸收能的比例 E_{SL}/E_e 逐步提高, 而非受激辐射能与有效吸收能的比例 E_{nSL}/E_e 相应下降。当光子寿命 τ_c 较长时 E_{SL}/E_e 可达 90% 以上, 而 E_{nSL}/E_e 可降低到 10% 以下。我们认为这可能是具有短荧光寿命激光器的共同规律。

图 5 是 E_{CL}/E_{SL} 、 $E_{TT'}/E_{SL}$ 与 τ_c 的关系。计算条件与图 4 相同。结果表明, 当腔内光子寿命 τ_c 较短时, 三重态吸收能与受激发射能的比例 $E_{TT'}/E_{SL}$ 很小, 但随着光子寿命 τ_c 增长, $E_{TT'}/E_{SL}$ 显著上升, 成为不可忽

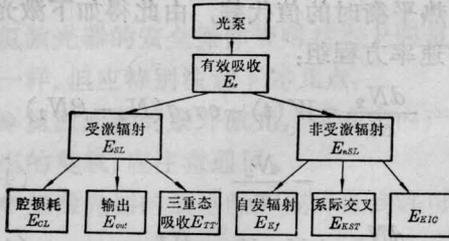


图 3 能量转移关系

$$E_e = E_{SL} + E_{nSL} \quad (7-a)$$

$$E_{SL} = E_{CL} + E_{TT'} + E_{out} \quad (7-b)$$

$$E_{nSL} = E_{Kf} + E_{KST} + E_{KIC} \quad (7-c)$$

根据方程组 (4) 右边各项的物理意义可得以下公式:

$$E_e = h\nu V_D \int W(t) dt$$

$$E_{SL} = h\nu V_{DC} \sigma_L \int q(t) [N_2(t) - \beta N_1(t)] dt \quad (8)$$

$$E_{CL} = \frac{h\nu V_C}{\tau_C} \int q(t) dt$$

$$E_{TT'} = h\nu V_{DC} \sigma_{TT'} \int q(t) N_T(t) dt$$

式中 V_D 是激活区体积, V_C 是腔模体积。用计算机求解 (4) 和 (8) 方程组, 并利用代数方程组 (7) 就可以把图 3 中各部分能量全部计算出来。

三、计算过程和结果

计算是在 TQ-16 计算机上进行的, 使用 Runge-Kutta 法求解。使用的参数如下: $\sigma_L = 1.07 \times 10^{-16}$ 厘米², $\sigma_{TT'} = \sigma_L/19$, $K_{ST} = 1.8 \times 10^7$ 秒⁻¹, $\tau_f = 5.5$ 毫微秒, $\tau_T = 100$ 毫微秒, $\beta = 0.7 \times 10^{-3}$ 。其它数据取以下值: $L_C = 70$ 厘米, $L_D = 10$ 厘米, $A = 0.07$ 厘米², $\gamma = 0.15$, $T = 0.9$ 微秒, $W_0 = 3 \times 10^{14}$ 厘米⁻³ 毫微秒⁻¹, $N = 2 \times 10^{-4}$ 克分子/升, $\lambda = 0.59$ 微米。

表 1 是根据以上数据算得的正常运转和 PTM 运转的能量转移过程。计算中我们取染料吸收光泵的有效能量 E_e 为 100%。从

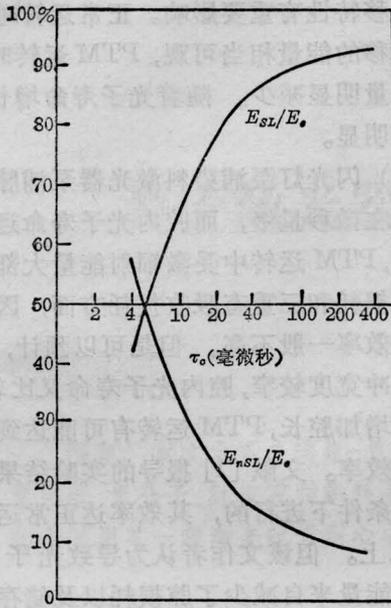


图 4

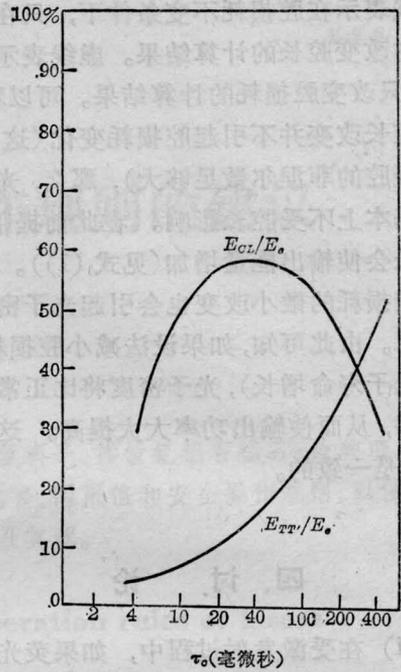


图 6

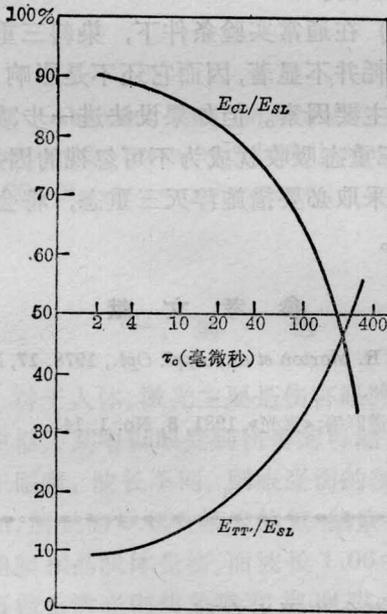


图 5

变化趋势。这是因为当 τ_c 较短时 ($\tau_c < 40$ 毫微秒), 尽管 E_{CL}/E_{SL} 随 τ_c 增长而下降, 但它仍然在 80% 以上(图 5), 与此同时 E_{SL}/E_0 上升很快, 因而使 E_{CL}/E_0 随 τ_c 而上升。随着 τ_c 继续增长 ($\tau_c > 40$ 毫微秒), E_{CL}/E_{SL} 迅速下降, 而 E_{SL}/E_0 变化逐渐缓慢, 因而使 E_{CL}/E_0 也迅速下降。

图 7 是腔内光子密度 q 与 τ_c 的关系。其

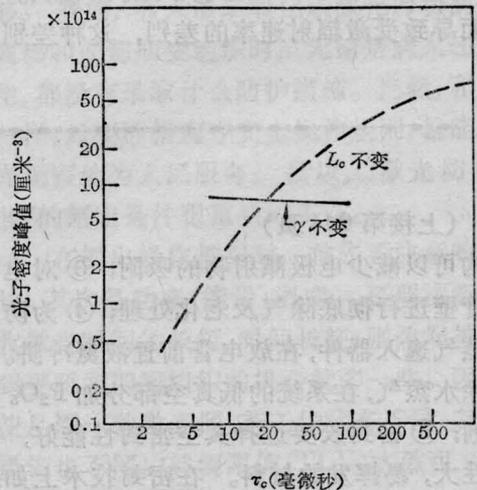


图 7 光子密度与光子寿命的关系

视的因素。

图 6 是 E_{CL}/E_0 、 $E_{TT'}/E_0$ 与 τ_c 的关系。计算条件与图 4 相同。计算结果表明, 随着 τ_c 增长, 三重态吸收损耗与有效吸收的比例 $E_{TT'}/E_0$ 仍表现为单调上升趋势, 但腔损耗与有效吸收的比例 E_{CL}/E_0 则呈现为抛物线形

中实线表示在腔损耗不变条件下,只在一定范围内改变腔长的计算结果。虚线表示腔长不变,只改变腔损耗的计算结果。可以看出,如果腔长改变并不引起腔损耗变化(这意味着谐振腔的非涅尔数足够大),那么,光子密度将基本上不受腔长影响。在此前提下,增加腔长会使输出能量增加(见式(1))。另一方面腔损耗的微小改变也会引起光子密度显著变化。由此可知,如果设法减小腔损耗(从而使光子寿命增长),光子密度将比正常运转大得多,从而使输出功率大大提高。这与图4结果是一致的。

四、讨 论

(1) 在受激发射过程中,如果荧光寿命较长(如 Nd:YAG),受激发射转移的能量占绝对优势,非受激发射转移能量可以忽略。但在染料激光器中,荧光寿命仅毫微秒级,非受激辐射能量是不能忽略的。计算表明,染料吸收的光泵能量主要消耗在自发辐射、腔损耗(包括输出耦合)和三重态吸收损耗方面,经系际交叉转移到三重态的能量和单态无辐射弛豫所转移的能量都不是主要因素。

(2) PTM 运转和正常运转的主要区别之一是 PTM 运转时腔内光子寿命较长。由此而导致受激辐射速率的差别,这种差别对

能量转移特性有重要影响。正常运转时自发辐射转移的能量相当可观,PTM 运转时,这部分能量明显减少。随着光子寿命增长,效果更加明显。

(3) 闪光灯泵浦染料激光器泵浦脉冲宽度一般在微秒量级,而腔内光子寿命远远低于此值,PTM 运转中受激辐射能量大部分消耗在腔损耗和三重态吸收损耗方面,因而能量转换效率一般不高。但是可以预计,如果泵浦脉冲宽度较窄,腔内光子寿命又比较长,再适当增加腔长,PTM 运转有可能达到较高的转换效率。文献[1]报导的实验结果就是在以上条件下进行的,其效率达正常运转的85%以上。但该文作者认为导致光子密度较高的能量来自减少了腔损耗以及储存在阈值反转和三重态粒子中的能量。这一解释看来是欠妥的。

(4) 在通常实验条件下,染料三重态的吸收损耗并不显著,因而它还不是影响 PTM 运转的主要因素。但如果设法进一步减小腔损耗,三重态吸收就成为不可忽视的因素。这时如果采取必要措施淬灭三重态,将会有一定效果。

参 考 文 献

- [1] R. R. Morton *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 20, 3268.
- [2] 邓道群等;《激光》,1981, **8**, No. 1, 14.

(上接第 644 页)

结构可以减少电极溅射物的吸附;③对电极及管壁进行彻底除气及老化处理;④为防止油蒸气逸入器件,在放电管前置液氮冷阱。为排除水蒸气,在系统的低真空部分加 P_2O_5 吸水剂;⑤密封胶要选择真空密封性能好,可塑性大,易挥发的材料。在密封技术上如果采用钢封或其它更为有效的封结技术,对提

高器件寿命将更为有利。

参 考 文 献

- [1] A. L. S. Smith; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, 59.
- [2] P. G. Browne *et al.*; *Scient. Inst.*, 1975, **8**, 870.
- [3] А. И. Максимов и др.; *Физика Плазмы*, 1978, **4**, 352.