

闪光灯泵浦长脉冲染料激光器的实验研究*

张 军 许凤明 邵中兴 顾华东

(中国科学院长春光机所光谱技术公司 长春 130022)

摘 要 从实验的角度出发,研究了分别添加氧气和环辛四烯两种染料三重态猝灭剂后,闪光灯泵浦长脉冲染料激光器的脉冲宽度和输出能量特性,讨论了影响脉宽和输出能量的两个主要因素。

关键词 长脉冲染料激光器 三重态猝灭剂 早期终止

1 前 言

染料激光器是二十世纪七十年代迅速发展起来的一种应用十分广泛的激光器。连续波和短脉冲染料激光器的研究已经做了大量的工作^{[1]-[9]}。长脉冲激光器的研究在连续波染料激光器出现后曾一度中断。但近年来,由于大能量长脉冲染料激光器在治疗表皮血管瘤、面部鲜红痣及静脉曲张等疾患时有特殊功效,人们开始重新研究长脉冲染料激光器。因为这种激光器主要用于医疗,所以要求激光器的输出能量高,激光脉冲宽度宽。目前,长脉冲染料激光器多用闪光灯泵浦^{[11]-[14]}。

众所周知,要得到稳定的染料激光输出,必须解决染料分子的三重态吸收损耗问题。这个问题解决不好,就无法得到长脉宽激光,甚至无法出光。对于激光泵浦的连续波染料激光可以使染料快速流过激励区,就能有效地避免染料三重态能级上的粒子积累,从而解决三重态吸收损耗问题。而闪光灯泵浦的短脉冲染料激光器,由于脉冲宽度窄,只要泵浦脉冲在极短的时间内达到阈值,就能使三重态能级上的粒子数保持在任意小的数值,克服三重态吸收带来的损耗,保证稳定出光。闪光灯泵浦长脉冲染料激光器的脉冲宽度远远大于闪光灯泵浦的短脉冲染料激光,三重态的吸收损耗问题较短脉冲染料激光器更严重且难于解决。对于这种特殊的激光器,不能简单的采用连续波激光和短脉冲激光的方法减少三重态能级上的粒子数。本文研究了染料溶液添加三重态猝灭剂后,长脉冲染料激光器输出激光的脉冲宽度和能量特性,得出了影响脉宽及能量的主要因素是早期终止问题和染料劣化问题。

* 本项目获得了吉林省计委支持

2 理论分析

染料激光器是一种四能级激光器, 它的速率方程为:

$$dN_1/dt = W_p(t)N_0 + (B_a N_0 - B_f N_1)q - N_1/\tau - K_{ST}N_1 - K_{QS}N_1 \quad (1)$$

$$dN_T/dt = K_{ST}N_1 - N_T/\tau_T - K_{QT}N_T \quad (2)$$

$$dq/dt = [V_a(B_f N_1 - B_a N_0 - B_T N_T) - K]q \quad (3)$$

$$N_0 + N_1 + N_T = N_t \quad (4)$$

式中所用符号意义如下:

N_0 : 基态(S_0)上的粒子数; N_1 : 激发态(S_1)上的粒子数; N_T : 三重态(T_1)上的粒子数; N_t : 总粒子数; $W_p(t)$: 泵浦速率; B_a : 粒子从 $S_0 \rightarrow S_1$ 的受激吸收系数; B_f : 粒子从 $S_1 \rightarrow S_0$ 的受激发射系数; B_T : 粒子从 $T_1 \rightarrow T_2$ 的受激吸收系数; σ_a : 粒子从 $S_0 \rightarrow S_1$ 的受激吸收截面; σ_f : 粒子从 $S_1 \rightarrow S_0$ 的受激发射截面; σ_T : 粒子从 $T_1 \rightarrow T_2$ 的受激吸收截面; τ : S_1 能级粒子的寿命; τ_T : T_1 能级粒子的寿命; K_{ST} : 粒子从 $S_1 \rightarrow T_1$ 的系际交叉速率; q : 谐振腔内激光频率上的光子数目; K : 谐振腔的内损耗; V_a : 激活物质的模体积; K_{QS} : 三重态猝灭剂分子对单重态粒子的猝灭常数; K_{QT} : 三重态猝灭剂分子对三重态粒子的猝灭常数^{[1][2][10]}。

当染料溶液中不含有三重态猝灭剂时, $K_{QS} = 0$, $K_{QT} = 0$, 设阈值时 $dq/dt = 0$, $dN_T/dt = 0$, 由(1) - (4)式可得:

$$\tau_T < \sigma_f / (\sigma_T K_{ST}) \quad (5)$$

上式表示受激发射至少能补偿由于三重态-三重态吸收所引起的损耗, 如果不满足上式, 则无法得到长脉冲运转的染料激光。由于普通染料溶液中三重态能级粒子寿命 τ_T ($\approx 2\mu\text{s}$) 很长, 而上式右边 $\sigma_f / (\sigma_T K_{ST})$ ($\approx 0.25\mu\text{s}$, 其中 $\sigma_a = 10^{-16}\text{cm}^2$, $\sigma_T = 5 \times 10^{-17}\text{cm}^2$, $K_{ST} = 0.8 \times 10^7\text{s}^{-1}$) 小于 τ_T , 所以无法得到长脉冲激光振荡。当染料溶液中含有三重态猝灭剂时,

$$\tau_T < \sigma_f (K_{QT} + 1) / (\sigma_T K_{ST}) \quad (6)$$

因为 $K_{QT} > 10^3\text{s}^{-1}$ (氧气作为三重态猝灭剂), (6)式右边的值大于 τ_T , 所以这种染料溶液可以得到长脉冲运转的染料激光。

3 实验装置及实验结果

实验是用直管氙灯泵浦若丹明 6G 乙醇溶液, 溶液中若丹明的浓度是 $5 \times 10^{-5}\text{mol/L}$ 。实验装置如图 1 所示。聚光腔是单椭圆聚光腔。染料池长 100mm, 内径 3-4mm, 滤紫外玻璃制成。闪光灯极间距 100mm, 内径 3mm。全反镜曲率 200mm- ∞ , 当 $\lambda = 585\mu\text{m}$ 时, 反射率大于 0.99。输出镜是平镜, 透过率 0.005-0.2。应用多网孔电容电感放电回路激励闪光灯, 注入电能 100J-300J。

采用添加三重态猝灭剂的方法解决染料三重态吸收损耗问题。三重态猝灭剂有饱和氧气和环辛四烯(COT)溶液, 饱和氧气是把氧气吹入染料溶液中, 使染料溶液与氧气充分结合, 并

把染料溶液放置氧气中一段时间。COT 溶液是按 $5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 的浓度将 COT 直接加入染料溶液。

应用氧气作为三重态猝灭剂时,激光波形如图 2 所示(光电二极管作为接收器,示波器示意图),图中绘有相应的闪光灯波形。从图可以看出泵浦光脉冲在 $65 \mu\text{s}$ 时达到最大值,激光在泵浦开始 $30 \mu\text{s}$ 时开始振荡。图 3 说明泵浦光脉冲在不同时间内达到最大时,上升沿越陡,越容易出激光,图中只有 a 型泵浦光脉冲有激光。实验还表明只要泵浦电压超过阈值电压,就可以得到激光,电压的高低只影响输出激光的能量和宽度。

应用 COT 作为三重态猝灭剂时,激光脉冲波形及相应的闪光灯波形如图 4 所示,从图可以看出激光脉冲的最大全宽度为 $270 \mu\text{s}$ 。图 5 是当泵浦脉冲的能量及形状一定时,分别用氧气和 COT 作为猝灭剂时的激光脉冲形状与宽度。从图可以看出,用 COT 作为三重态猝灭剂时的激光脉冲宽度要宽于用氧气作为猝灭剂时的情况。这说明虽然用氧气作为三重态猝灭剂可以有效地减少三重态吸收损耗,但氧气在染料循环过程中会释放气泡造成损耗,并使溶液中氧气浓度降低,减小猝灭作用。而 COT 是可溶于乙醇的溶液,克服了氧气作为三重态猝灭剂时的缺点,从而有效地改善染料激光器的性能。

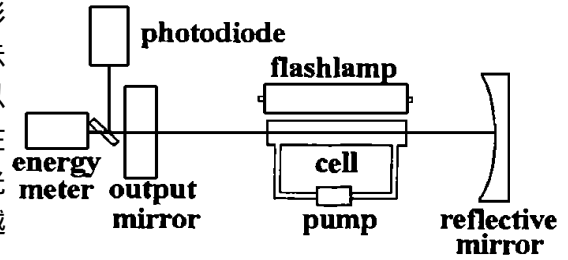


Fig. 1 Block diagram of the dye laser

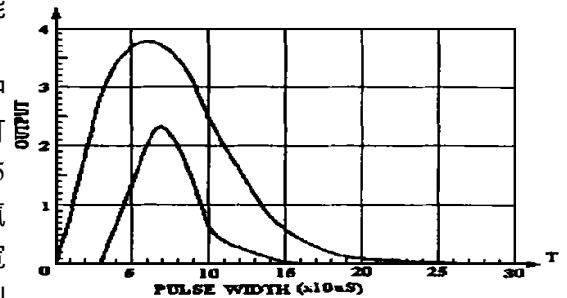


Fig. 2 Laser emission of dye laser using oxygen gas as triplet state quencher: upper, flashlamp pulse; lower, laser pulse

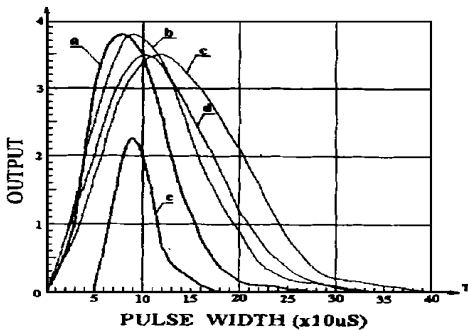


Fig. 3 Laser emission of dye laser using oxygen gas as triplet state quencher: a, b, c, d, flashlamp pulse; e is the laser pulse of a and b, c, d have no laser.

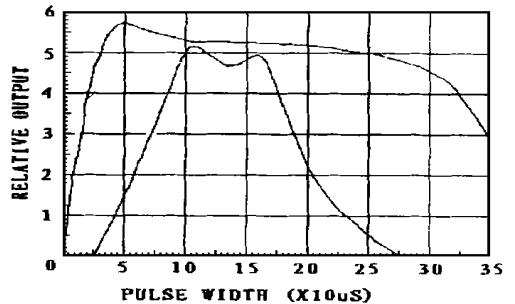
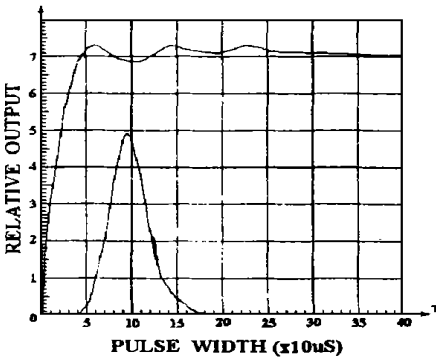
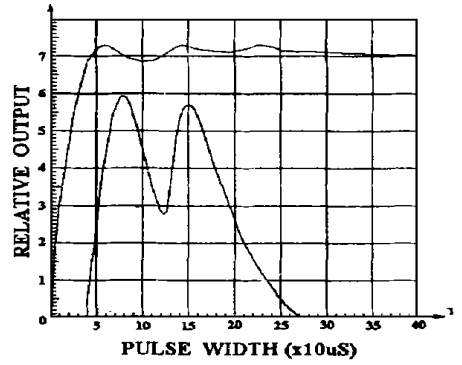


Fig. 4 Long laser emission of dye laser using COT as triplet state quencher: upper, flashlamp pulse; lower, laser pulse



(a) dye laser using oxygen gas as quencher



(b) dye laser using COT as quencher

Fig. 5 Laser emission when the same flashlamp pulse pumped: upper, flashlamp pulse; lower, laser pulse

输入电能与输出激光能量关系如图 6 所示, 输入能量增加时输出能量也增加, 当输入能量为 289J 时, 输出激光能量为 32mJ, 出光效率最高可达 0.11 %。

4 问题讨论

在实验中主要存在两个问题: 第一个问题是激光早期终止问题, 如图 4 和图 5 所示。泵浦脉冲宽度窄时, 不出现这种问题, 如图 2 所示, 但泵浦脉冲宽度变宽时, 当泵浦脉冲的能量仍高于阈值, 激光就终止了, 这必然影响激光脉冲的宽度和能量。激光脉冲早期终止的原因可能是由于染料三重态吸收损耗消除不完全。虽然使用了三重态猝灭剂, 但是无法完全使粒子不跃迁到三重态能级上, 并且由于三重态能级上的粒子寿命较长, 粒子从三重态能级到基态能级是禁戒跃迁, 从而影响激光振荡。再者闪光灯泵浦染料池时, 会产生热透镜效应, 随着泵浦脉冲时间的延长, 热透镜效应越来越严重, 而且乙醇的热膨胀系数较大, 染料溶液的折射率不均匀, 最终破坏出光。

第二个问题是染料溶液劣化问题。新配制的染料溶液使用一段时间之后, 输出激光能量越来越小, 脉冲宽度越来越窄, 直至不出光。实验还得出染料的寿命明显低于连续波激光器染料的寿命。染料溶液劣化的原因是因为闪光灯作为泵浦光源, 即使灯管和染料池都是滤紫外玻璃制成的, 仍有少量紫外光照射到染料上, 使染料分子分解。再加上每个泵浦光脉冲都有较大的能量注入染料池, 除一部分能量转化为激光外, 剩余一部分能量转化为热, 在热的情况下, 造成染料分子性能劣化, 分解变性。

长脉冲染料激光器必须解决激光早期终止问题和染料溶液劣化问题, 这两个问题不解决, 就无法得到长脉冲大能量的染料激光。如果找到更好的染料溶剂和三重态猝灭法, 腔型结构进一步优化, 加大注入能量, 可望获得更高的激光输出能量和效率。

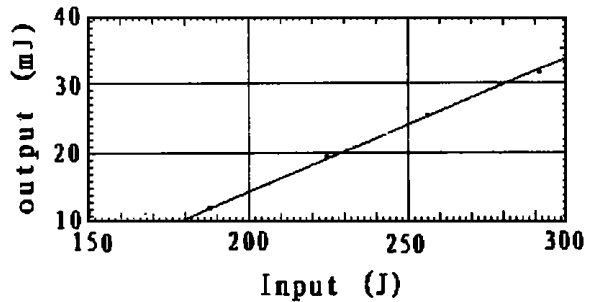


Fig. 6 Efficiency curves of dye laser using COT as triplet state quencher

参 考 文 献

- 1 舍费尔 F P. 染料激光器. 北京: 科学出版社, 1978
- 2 斯韦尔托. 激光原理. 北京: 科学出版社, 1983
- 3 Duarte F J, et al. Single mode flashlamp pumped dye laser oscillators. Appl Opt, 1986, 25(5), 663665
- 4 Fort J, et al. High power high energy linear flashlamp pumped dye laser. Appl Opt, 1987, 26(7), 12461249
- 5 Chen C H, et al. Solvent effects in oscillator/amplifier configured dye lasers. Appl Opt, 1984, 23(4), 526527
- 6 Lusty M E. et al. Refractive indices and thermooptical properties of dye laser solvents. Appl Phys B, 1987, 44(3), 193198
- 7 Zhou C S. Design of a pulsed single mode dye laser. Appl Opt, 1984, 23(17), 28792885
- 8 Littman M G. Single mode pulse tunable dye laser. Appl Opt, 1984, 23(24), 44654468
- 9 Hnilo A A, et al. Amplification of nanosecond pulses in dye laser amplifiers. J Opt Soc Am B, 1987, 4(5), 629-634
- 10 Keller R A. Effect of quenching of molecular triplet states in organic dye lasers. IEEE J Quantum Electron. QE-6, 1970, (7): 411416
- 11 Pappalardo R, et al. Long pulse laser emission from rhodamine 6G. IEEE J Quantum Electron QE-6, 1970, (11): 719725
- 12 Fitzpatrick Richard E. Lasers in dermatology and plastic surgery. Optics & Photonics News, 1995, (11): 2331
- 13 Koster P H L, et al. Histology of overlapping and nonoverlapping pulsed dye laser pulses on normal human skin. Medical Applications of Laser II. Proc SPIE, 2327: 3236
- 14 十文字正宪, 内山晴夫. Development of long pulse dye laser. レ-ザ-研究, 1994, 22(9), 762767

Experimental Investigation of Long Pulse Dye Laser with Flashlamp Pumping

ZHANG Jun, XU Feng-Ming, SHAO Zhong-Xing, GU Hua-Dong
 (Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
 Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The properties of the long pulse dye laser pumped by flashlamp with cyclooctatetraene and oxygen gas as triplet-state quenchers are described. Particular attention is given to the pulse duration and the output energy. Two primary factors, which influence the pulse duration and the output energy, are discussed.

Key Words Long pulse dye laser, Triplet-state quenchers, Early termination

张 军 女, 1968 年 10 月出生, 1993 毕业于长春光机所研究生部, 获硕士学位, 现在光机所光谱技术公司从事激光器研制等工作。