

闪光灯泵浦染料激光脉冲压缩的 理论和实验研究

潘安培 汤星里

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文根据闪光灯泵浦染料激光器的实验参数用计算机求解 PRM、PTM 和正常运转三种情况下的速率方程, 分析比较了计算结果, 研究了影响 PTM 运转腔内光子密度的主要因素。实验验证了理论研究的主要结果。通过 PTM 运转, 使脉冲宽度从微秒压缩到了毫微秒, 脉冲功率从几十千瓦提高到兆瓦。

一、引 言

闪光灯泵浦染料激光器(简称 FLPL)激励方式简单, 易于实现高重复率, 高平均功率和大脉冲能量, 具有较大的实用价值。但是通常这类器件输出脉冲宽度在微秒量级, 脉冲功率也比较低, 尽管有的器件平均功率达到 114 W, 但脉冲峰值功率仅为 165 kW^[1]。这样的脉冲宽度和峰值功率难以满足激光遥测, 喇曼光谱, 短能级寿命测量等需要。PRM(Pulsed Reflected Mode)运转和 PTM(Pulsed Transmission Mode)运转是压缩激光脉冲宽度的常用方法, 许多作者报导过一些实验结果^[2~5]。本文根据直管闪光灯泵浦染料激光器的实验条件, 以 Rh6G 为典型染料, 考虑了染料激光的各种参数, 用计算机求解了 PTM、PRM 和正常运转情况下的速率方程, 分析比较了三种情况下的计算结果。从理论和实验两方面证实了 PRM 运转不适用于 FLPL, 而 PTM 运转则比较有效, 又着重研究了 PTM 运转。

二、基本方程组

激光染料的典型能级如图 1 所示。图中 αS_1 、 βS_1 分别代表基态高低振动能级, α 、 β 是两能级粒子数的比例因子, 热平衡时它们由玻耳兹曼分布律确定。 S_3 、 S_2 分别代表激发态的高低振动能级, T_1 代表三重态。激励过程中, 因为粒子在 S_3 、 βS_1 上停留时间很短 ($\sim 10^{-12}$ 秒), 可以认为 S_3 上粒子数 $N_3 \approx 0$, 基态高低振动能级上粒子数的比例关系与热平衡时相同。描述染料激光的速率方程如下:

$$\left. \begin{aligned} dN_2/dt &= W(t) - C\sigma_L q(N_2 - \beta N_1) - N_2/\tau_f, \\ dN_T/dt &= K_{ST}N_2 - N_T/\tau_T, \\ dq/dt &= C\sigma_L q F(N_2 - \beta N_1) - q/\tau_c - C\sigma_{TT} q F N_T, \\ N_1 + N_2 + N_T &= N, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 1981年9月28日

式中 $W(t)$ 为泵浦速率, N 为染料浓度, q 为腔内光子密度, N_1 、 N_2 、 N_T 分别代表 S_1 、 S_2 、 T_1 能级的粒子密度, σ_L 为受激发射截面, $\sigma_{TT'}$ 为三重态吸收截面, τ_f 为荧光寿命, τ_T 为三重态寿命, K_{ST} 为系际交叉速率, $\tau_c = L_0/C\gamma$ 是腔内光子平均寿命, γ 是单程平均损耗。 $F = L_D/L_C$, L_D 是激活介质长, L_C 是腔长。泵浦速率取为高斯形 $W(t) = W_0 \exp[-(\sqrt{\ln 2} t/T)]$, 其中 T 为泵浦脉冲半宽度, W_0 为峰值泵浦速率。

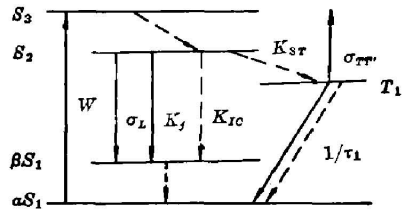


图 1 染料分子能级图

Fig. 1 Energy levels of a dye molecule

正常运转时, 平均单程损耗 $\gamma_N \approx (1 - \sqrt{R_1 R_2}) \times (R_1 R_2)^{-1/4}$, 输出功率 $P(t) \approx h\nu \cdot C \cdot \gamma_N \cdot q(t) \cdot A$, PRM 运转时输出功率相似。PTM 运转时平均单程损耗 $\gamma_T = 1 - T'$, 输出能量为 $E_T \approx h\nu \cdot A L_C q_P$, 输出脉冲宽度为 $\Delta\tau \approx 2L_C/C$, 其中 R_1 , R_2 是谐振腔两反射镜的反射率, T' 是腔内元件的总透过率, A 为腔模截面积, h 为普朗克常数, ν 为激光频率, q_P 为 PTM 运转时腔内光子密度峰值。

当谐振腔关闭时 (PTM 和 PRM 运转都有这种情况), 各能级粒子数可由以下方程组决定

$$\left. \begin{aligned} dN_2/dt &= W(t) - N_2/\tau_f, \\ dN_T/dt &= K_{ST}N_2 - N_T/\tau_T, \\ N_1 + N_2 + N_T &= N. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

利用方程组 (1) 和 (2) 可以描写 PTM, PRM 和正常运转。

三、计算过程和结果

1. 正常、PRM 和 PTM 运转的比较

图 2(a) 为泵浦速率 $W(t)$ 与时间关系, 图 2(b)、图 2(c) 分别为 PRM 和 PTM 运转的开关函数 f_{PRM} 和 f_{PTM} 与时间的关系, 泵浦峰值取为时间零点。1 表示谐振腔接通, 0 表示谐振腔关闭。PRM 运转时谐振腔首先关闭, 当 $t=t_1$ 时才接通, $t=t_2$ 时谐振腔又关闭。PTM 运转时, 谐振腔首先处于接通状态, 当腔内光子密度达到峰值时, 光开关将腔内光子“倒”出腔外, 谐振腔也被关闭。

计算中, 以 Rh6G 为标准染料, 其参数见表 1, 其它参数如下: $L_0 = 65 \text{ cm}$, $L_D = 10 \text{ cm}$, $A = 0.07 \text{ cm}^2$, $R_1 = 1$, $R_2 = 1$ (PTM) 或 0.4 (PRM 和正常运转), $T' = 0.85$, $2T = 1.8 \mu\text{s}$, $N = 2 \times 10^{-4} \text{ M/l}$, $\nu = 5.1 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $W_0 = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ ns}^{-1}$ 。计算方法采用能根据给定误差自动调整步长的 Runge-Kutta 法, 计算初始值取 $N_2(t_0) = N_T(t_0) = q(t_0) = 0$, 控制误差为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。

图 3 是根据以上数据及图 2 所示开关函数, 用 TQ-16 计算机解得的结果。横坐标代表时间, 并与图 2(a) 对应。纵坐标分别是 N_2/N , N_T/N , N_1/N 和 q 。图中虚线表示正常运转 (其中 $R_1 = 100\%$, $R_2 = 40\%$), 点划线表示 PRM 运转 (其中 $R_1 = 100\%$, $R_2 = 40\%$), 实线表示 PTM 运转 ($\tau_1 \approx 0.15$, $R_1 = R_2 = 100\%$)。PRM 运转时 $t_1 = 0.2 \mu\text{s}$, $t_2 = 0.2 \mu\text{s}$ 。当 $t < t_1$ 时, N_2/N 的值比正常运转时高, 但当谐振腔接通后 ($t > t_1$), N_2 和 N_T 都逐渐下降到

正常运转水平。计算表明,光子密度从0上升到极大值的90%所用时间约30ns,从极大值的10%上升到90%所用时间约10ns,这两个时间都比荧光寿命5.5ns长得多,因而 t_1 以前 N_2 的积累对受激发射的贡献很小。比较正常运转和PRM运转可以看出,后者的光子密度并不比前者高,其脉冲宽度大致与光开关打开时间(~ 400 ns)相当,由此可以预计,PRM调制不可能提高输出功率,也不能真正压缩脉冲宽度。比较PTM运转和正常运转可以看出,PTM运转有以下特点:达到阈值时间比较早;激发态和三重态粒子密度比较低;腔内光子密度比正常运转高得多,由此可知,输出峰值功率将比正常运转高,光子密度达到峰值时间比泵浦峰值略有滞后。当腔内光子被“倒”出腔外后,谐振腔被关闭, N_2 、 N_T 迅速上升,并随着泵浦脉冲形状而变化。

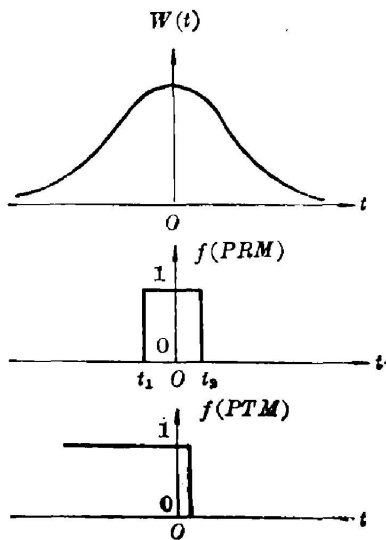


图 2

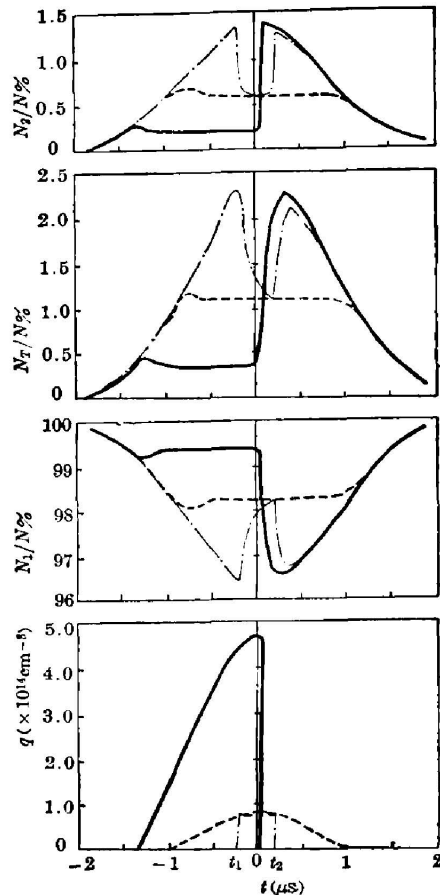


图 3 正常、PTM 和 PRM 运转的计算机解
Fig. 3 The computer solutions of normal, PTM, PRM operation

表 1 Rh6G 参数^[4,7]
Table 1 Rh6G parameters

参 数 名 称	符 号	值
受激发射截面	σ_L	$1.07 \times 10^{-16} \text{cm}^2$
三重态吸收截面	$\sigma_{TT'}$	$\sigma_L/19$
系际交叉速率	K_{ST}	$1.8 \times 10^7 \text{sec}^{-1}$
荧光寿命	τ_f	5.5 ns
三重态寿命	τ_T	100 ns
能级比例因子	β	0.7×10^{-3}

2. 影响 PTM 运转光子密度的几个因素

PTM 运转时, 输出功率正比于腔内光子密度。因此光子密度是我们极为关切的问题。

图 4 是峰值光子密度 q_p 与腔内光子寿命 τ_0 的关系。因为光子寿命分别与腔长和腔损耗有关(见(1)式说明), 所以图中分别表示了这两个量对光子密度的影响。实线表示腔损耗不变, 只改变腔长的计算结果, 虚线表示腔长固定, 只改变腔损耗的计算结果。可知如果腔长变化, 光子密度几乎不受影响, 而腔损耗的微小改变会导致光子密度的显著变化。因此减小腔损耗是提高光子密度的关键因素。

图 5 是峰值光子密度 q_p 与输入能量 E_{in} 的关系。当其它参数(包括泵浦脉冲宽度)固定时, 光子密度近似地随输入能量线性增长。

三重态寿命 τ_T 是可以设法改变的染料参数(如施加三重态猝灭剂)。图 6 是峰值光子密度 q_p 与 τ_T 的关系。图中三条曲线分别对应于腔内光子寿命 τ_0 为 464 ns、93 ns、15 ns。可见当 τ_0 较短时 τ_T 的变化对光子密度影响较小, 当 τ_0 较长时 τ_T 对光子密度有显著影响, 这时如果采取措施猝灭三重态将会获得明显的效果。

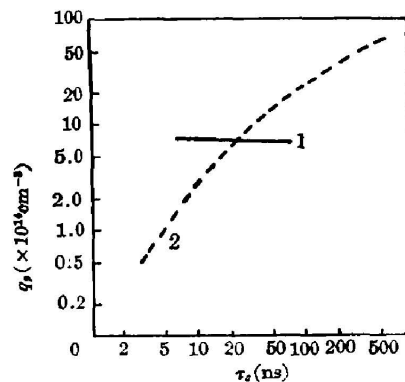


图 4 光子密度与光子寿命关系

Fig. 4 Photon density as a function of photon life time

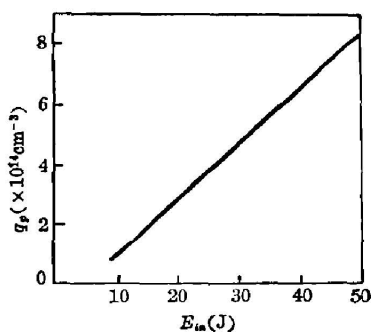


图 5 光子密度与输入能量关系

Fig. 5 Photon density as a function of input energy

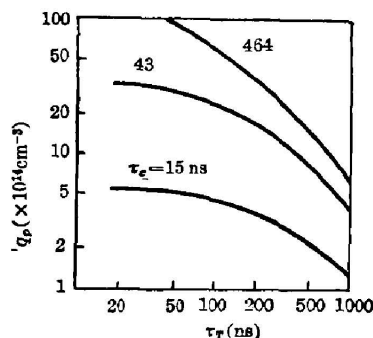


图 6 光子密度与三重态寿命 τ_T 的关系

Fig. 6 Photon density as a function of τ_T

四、实验结果

实验是在本所研制的 FLPL 型直管闪光灯泵浦染料激光器上进行, 用 Rh6G 作典型染料, 乙醇作溶剂。图 7 分别表示正常、PRM、PTM 运转的实验装置。图中染料管由一支 $\phi 3 \times 100$ mm 的石英管作成, 两端窗口与光轴成布儒斯特角, 光开关由普克尔盒和 O、E 双输出格兰棱镜组成, 普克尔盒通过加矩形脉冲电压工作, 该矩形波前沿约 2 ns。其幅度和宽度均可调节, 并由专门制作的可调延时电路驱动。

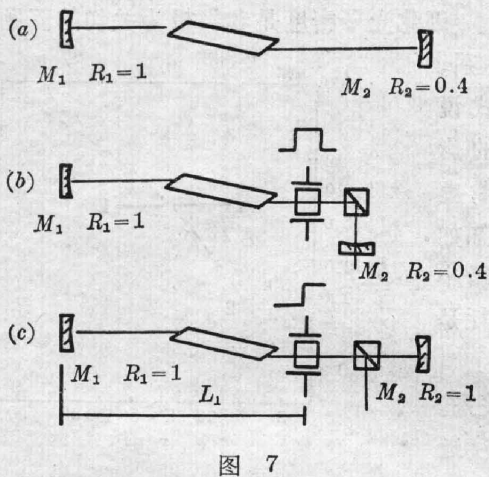


图 7

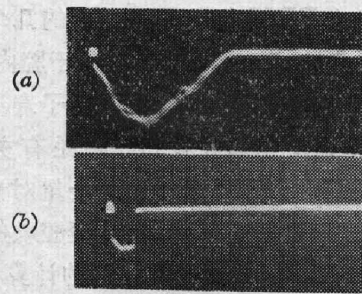


图 8

(a) 正常振荡波形;
(b) PRM 运转波形(时标: $0.5 \mu\text{s}/\text{div}$)

Fig. 8

(a) The oscillogram of normal operation;
(b) The oscillogram of PRM operation (time scale: $0.5 \mu\text{s}/\text{div}$)

图 8 是在腔长和输入能量等条件都相同的情况下, 摄得的正常振荡和 PRM 运转的输出波形。PRM 实验中普克尔盒上矩形波电压脉宽约为 $0.2 \mu\text{s}$ 。比较 (a), (b) 波形可知, PRM 运转输出脉冲实质上是被光开关从正常运转波形上“裁剪”下来的一部分, 脉宽本质上没有被压缩, 脉冲幅度也没有增加。实验与理论计算结果一致(图 3)。

图 9 是用快速强流光电管作接收元件, 用 7904 示波器摄得的 PTM 运转输出波形。图 9(a) 对应于腔长为 65 cm , 而 L_1 (见图 7(c)) 为 45 cm , 该脉冲宽度为 3 ns 。图 9(b) 是腔长等于 1.35 m 时输出波形, 脉冲宽度为 8 ns 。图 9(a)、图 9(b) 波形前沿约为 2 ns 。



(a)

(b)

图 9 PTM 运转输出波形(时标: $5 \text{ ns}/\text{div}$)

Fig. 9 The oscillogram of PTM operation (time scale: $5 \text{ ns}/\text{div}$)

我们在腔长 65 cm 条件下, 测量了正常运转(腔内无光开关)和 PTM 运转宽带输出能量、脉冲宽度, 比较了二者功率。可见 PTM 运转使输出脉冲宽度压缩了数百倍, 脉冲功率提高了 23 倍。

实验中, 腔内损耗增加 10% 时, 输出功率从 820 kW 下降到 250 kW , 这表明, 腔内损耗对输出功率的影响是相当敏感的。

图 10 是腔内插入损耗固定, PTM 运转输出功率随腔长的变化。结果表明, 腔长对输出功率影响很大, 这与图 4 的理论计算似乎矛盾, 但是考虑到实验是在菲涅耳数较小的条件下进行, 当腔长增加时, 尽管选用较大曲率半径的反射镜能很好满足共振腔的共焦结构, 但较高阶次模的衍射损耗已相当显著^[6], 这就限制了实验中腔长的选择。另外, 在短腔长的情况下变化腔长, 偏离共焦状态及光腰位置的变化都会引起损耗, 图 10 中用虚线表示了正常运转时输出能量和腔长的关系, 在实线表示的 PTM 运转时更为明显, 在我们的实验条件下, 要提高 PTM 运转的输出功率, 较短的腔长更合适。如果实验在菲涅耳数较大的条件下, 进

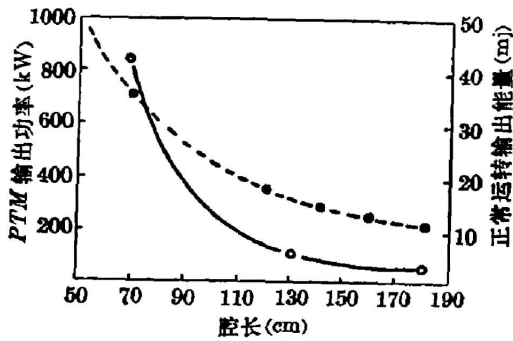


图 10 PTM 运转输出功率随腔长的变化
Fig. 10 PTM operation output power as a function of variation of cavity length

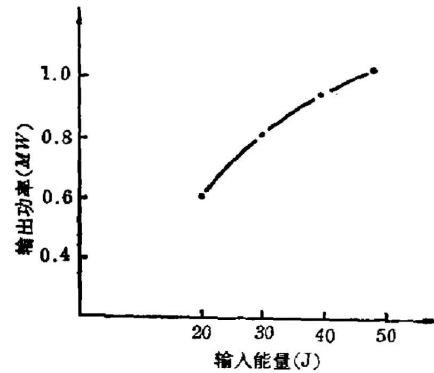


图 11 PTM 运转输出功率与输入能量的关系
Fig. 11 Output power as a function of input energy for PTM operation

行,腔长增加并不导致明显的附加损耗,犹如计算所表明输出功率将不会有显著变化。文献[4]中运用在同轴灯泵浦器件上(染料通光孔径较大)进行的实验证实,用10m曲率半径的反射镜和平板组成的半共焦腔,腔长可以拉长到3~4m,获得较高的能量效率。

图 11 是测得的输出功率与输入能量的关系。实验是在腔长为65cm的条件下进行的。在一定范围内,输出功率随输入能量线性增长,与理论计算(图5)基本一致。当输入能量增加到50J时,输出功率达1.1MW。

五、小 结

本文从理论和实验两方面研究了闪光灯泵浦染料激光的脉冲宽度压缩问题,得到以下主要结论:

(1) 在 FLPL 中, PRM 运转不能达到压缩脉宽提高峰值功率的目的,只能“裁剪”脉冲。

(2) PTM 运转时腔内光子密度强烈地依赖于腔损耗,与输入能量近似为线性关系,如腔长增加并不导致明显的附加损耗,则它与腔长无关,当腔内光子寿命较长时,三重态的吸收也对光子密度有显著影响。

(3) 菲涅耳数较小的 FLPL 中,腔长增加,腔损耗明显变大。

在理论和实验研究基础上,使 FLPL 输出脉冲宽度从微秒压缩到3ns,输出功率从几十千瓦增加到兆瓦。

感谢王之江同志对本工作的关心并提出宝贵意见,在实验工作中得到了许世忠同志的帮助,谨表致谢。

参 考 文 献

- [1] W. W. Morey, W. H. Glenn; *Opt. Acta*, 1976, **23**, No. 11 (Nov), 873.
- [2] 王福贵,张新因;《激光》,1980, **7**, No. 11 (Nov), 41.
- [3] L. W. Braverman; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**, No. 11 (1 Dec), 602.

- [4] E. R. Morton *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 20 (15 Oct), 3268.
[5] 邓道群, 许祖彦等; 《激光》, 1981, **8**, No. 1 (Jan), 14.
[6] D. E. McCumber; *Bell Syst. Tech. J.*, 1965, **44**, No. 2 (Feb), 333.
[7] J. P. Webb *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1970, **53**, No. 11 (1 Dec), 4227.

Theoretical and experimental investigation of pulse compression in flashlamp pumped dye laser (FLPL)

PAN ANPEI AND TANG XINLI

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

(Received 28 September 1981)

Abstract

Numerical solutions of the rate equations for pulsed reflected mode (PRM), pulsed transmission mode (PTM) and normal operation have been performed by computer in terms of FLPL operating parameters. The results are analyzed and compared. Some primary factors effecting on photon density in the cavity for PTM operation are investigated. The principle results of theoretical investigation have been confirmed by experiments. The pulse duration compression from μs to 3 ns has been obtained. The peak power was raised from decades kW to MW by PTM operation.