

腔倒空染料激光器

邓道群 许祖彦 郭东升

(中国科学院物理研究所)

提要: 本文描述了闪光灯泵浦的若丹明 6G 有机染料激光器的 PTM 模式运转的理论分析和实验研究。探讨了影响 PTM 模式运转效率的因素, 获得 5~25 毫微秒的输出光脉冲, 输出功率比正常型振荡腔提高 22 倍。

Cavity dumped dye laser

Deng Daoqun Xu Zuyan Guo Dongsheng

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract: This paper describes the theoretical analysis and experimental investigation of PTM mode operation of the flash-lamp pumped R-6G dye laser. A discussion of influence on the efficiency of PTM mode operation has been given. As compared to the normal operation, the peak power output has been increased by 22 times with an output pulse-width of 5~25 ns.

一、引言

1963 年 A. A. Vuylsteke 指出激光器的 PTM 模式运转(即腔倒空)可望获得窄脉宽、高功率输出^[1]。1970 年 Huth 等证明了染料激光器 PTM 模式运转的可能性。由于染料分子激发态寿命仅毫微秒级, 采用 PRM 模式运转不大可能实现高功率(兆瓦)、短脉冲(毫微秒)运转(即通常指调 Q 模式), 而 PTM 模式则有可能办到。另外 PTM 模式运转的有机染料激光器的可调谐曲线比正常运转更宽。

本文采用简化的四能级系统速率方程组数值解, 分析了插入损耗对输出激光峰功率的影响, 说明只要将插入损耗降低就可获得高效率的 PTM 模式运转。探讨了晶体开关

的控制精度要求。我们用直管灯泵浦的若丹明 6G 有机染料激光器实验使输出峰功率提高 22 倍。

二、PTM 模式运转的原理

PTM 模式运转原理如图 1 所示。Pockels 盒、偏振棱镜组成可变反射器(这种可变反射器既可用电光器件也可用声光器件)。当激光器开始振荡时, 腔反馈系数为 1, 从而令光能贮存在腔内, 当腔内光子数达到峰值后启动 Pockels 盒, 可变反射器反射率突降至零, 腔内光能几乎全部倒出, 而输出脉宽取决于腔长, 即相当于光在腔内往返一周的时间 $2L/C$ 。但必须注意, Pockels 盒的上升时间要小于脉冲期。

收稿日期: 1980 年 2 月 20 日。

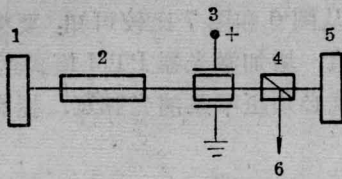


图1 PTM 模式运转原理图

1—全反射镜；2—激光头；3—Pockels 盒；4—偏振棱镜；5—全反射镜；6—输出光束

为了分析影响 PTM 模式运转的因素，我们采用四能级系统的速率方程组^[2]：

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = W(t) - \frac{n}{n_0} \frac{q}{t_c} - \frac{n}{\tau} & (1) \\ \frac{dq}{dt} = \frac{q}{t_c} \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) & (2) \end{cases}$$

其中 n 为反转粒子数 ($n = n_2 - n_1 \sim n_2$)； n_0 为阈值反转粒子数； q 为腔内光子数； t_c 为腔内光子寿命； τ 为染料荧光寿命； $W(t)$ 为灯光脉冲。假设泵浦灯光脉冲为高斯型分布，灯光脉宽为 T_1 ，那么

$$W(t) = W_{\max} \exp \left\{ - \left[\frac{t}{T_1} (\ln 2)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} n' = n/W_{\max} & (4) \\ n'_0 = n_0/W_{\max} & (5) \\ q' = q/W_{\max} & (6) \end{cases}$$

将(4)、(5)、(6)式代入(1)、(2)式得：

$$\begin{cases} \frac{dn'}{dt} = \exp \left\{ - \left[\frac{t}{T_1} (\ln 2)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right\} - \frac{n'}{n'_0} \frac{q'}{t_c} - \frac{n'}{\tau} & (7) \\ \frac{dq'}{dt} = \frac{q'}{t_c} \left(\frac{n'}{n'_0} - 1 \right) & (8) \end{cases}$$

由于常微分非线性方程组一般没有解析解。我们采用龙格-库塔法计算方程组(7)、(8)的数值解。

图2为荧光寿命5毫微秒的若丹明6G粒子反转数。图3为荧光寿命240微秒的YAG:Nd激活介质的粒子反转数。

从上两图可以看出：反转粒子数在泵浦峰值过后，荧光寿命之前达到峰值；只有5毫微秒荧光寿命的若丹明6G有机染料的反转

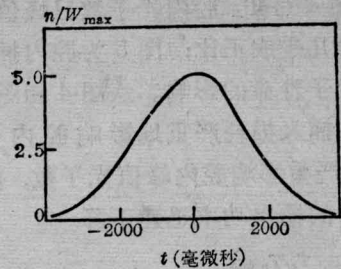


图2 若丹明6G的粒子反转数

取下列值计算： $T_1=1500$ 毫微秒； $\tau=5$ 毫微秒； $W_{\max}=1 \times 10^{14}$ /毫微秒（并取泵浦光脉冲到达峰值时的时间为 $t=0$ ，以下计算也按此规定进行）

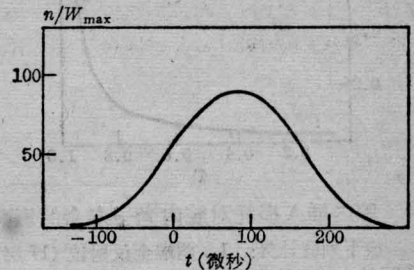


图3 YAG:Nd的粒子反转数

取下列值计算： $T_1=60$ 微秒； $\tau=240$ 微秒； $W_{\max}=1 \times 10^{16}$ /微秒

粒子数峰值约为 $5/W_{\max}$ ，而240微秒荧光寿命的YAG:Nd的反转粒子数约为 $86/W_{\max}$ 。由此可知：具有毫微秒量级荧光寿命的有机染料不可能象YAG:Nd那样采用PRM模式运转，将能量贮存在上激光能级。

图4为改变腔内光子寿命 t_c ，而其他条件不变时的腔内光子数目随时间的分布曲线

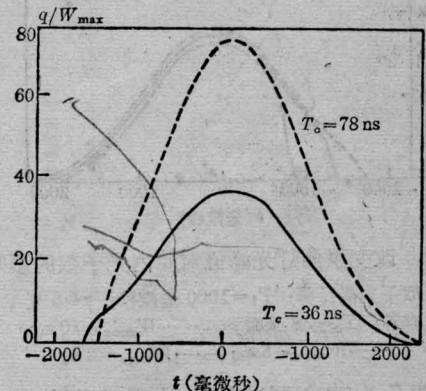


图4 改变腔内光子寿命的光子数目分布曲线

取下列值计算： $T_1=1000$ 毫微秒； $\tau=5$ 毫微秒； $n_0/W_{\max}=0.1$ ； $W_{\max}=1 \times 10^{14}$

线。从图 4 可知：腔内光子数目峰值与腔内光子寿命几乎成正比；图 5 为腔内插入损耗对腔内光子寿命的影响。从图 4 和图 5 可以看到腔内插入损耗严重地影响腔内光子寿命，亦即严重影响腔内峰值光子数，使 PTM 模式运转的输出功率迅速下降。

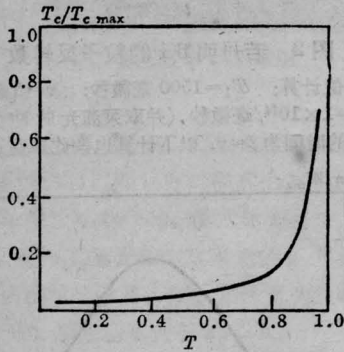


图 5 腔内插入损耗对腔内光子寿命的影响

$T_{c,max}$ 按下列值计算：1. 两端全反射镜（17 层）99.985%；2. 腔内光学元件表面镀增透膜，透过率为 99.5%（ T 为插入元件的透过率）

图 6 为改变泵浦灯光峰值对腔内光子数的影响。从图中可以看到随着光泵的增强腔内光子数增加。从图 4 和图 6 可以看到：腔内光子寿命对腔内光子数的影响比泵浦强度对腔内光子数的影响更为灵敏。即是说，提高激光器 PTM 模式运转输出功率的主要因素是减少腔内插入损耗。

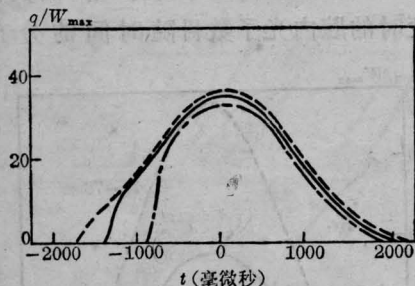


图 6 改变泵浦灯光峰值对腔内光子数的影响

取下列值计算： $T_1=1000$ 毫微秒； $\tau=5$ 毫微秒； $T_0=38$ 毫微秒； $\dots\dots W_{max}=10n_0$ ； $\text{---} W_{max}=5n_0$ ； $\text{-}\cdot\text{-}\cdot W_{max}=2n_0$

图 7 为改变泵浦灯光脉宽对腔内光子数目分布的影响。从图可以知道：腔内光子分布随泵浦光脉宽的加宽而加宽，而光子峰值

不变。从图 6 和图 7 比较可知：要提高腔内光子峰值，增加激光器 PTM 模式运转的输出功率就必须压窄泵浦光脉宽，提高泵浦光峰值。

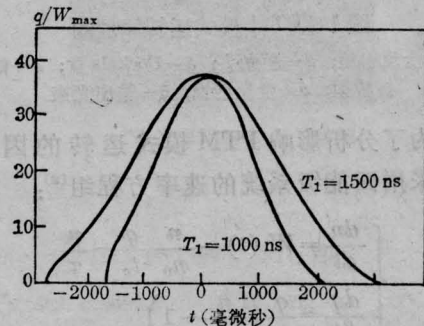


图 7 改变泵浦灯光脉宽对腔内光子数目分布的影响

取下列值计算： $T_0=38$ 毫微秒； $\tau=5$ 毫微秒； $n_0/W_{max}=0.1$ ； $W_{max}=1 \times 10^{14}$

图 8 是由腔内光子数目分布曲线估算晶体开关启动时刻对激光器 PTM 模式运转输出功率的影响曲线。从图可知：对于 1000 毫微秒的泵浦光脉宽，激光器的 PTM 模式运转对 Pockels 盒的开启时刻的控制精度只要小于 0.2 微秒，那么输出功率的降低就小于 5%；而且泵浦灯光脉宽，越宽控制精度要求越低。

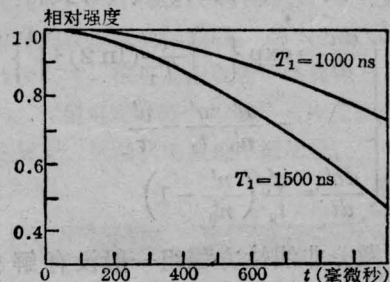


图 8 晶体开关启动时刻对激光器 PTM 模式运转输出功率的影响曲线

三、实验装置和结果

实验装置如图 9 所示。Pockels 盒是采用纵向切割的 KDP 晶体，偏振棱镜置于晶体加上半波电压后腔反馈为 1 的位置。当腔

内光能达到峰值的某一时刻 t 时, 由主放电电流脉冲前沿控制可变延迟线使闸流管导通, 腔内光能从偏振棱镜倒出。由能量计和 OK-19 示波器检测输出特性。

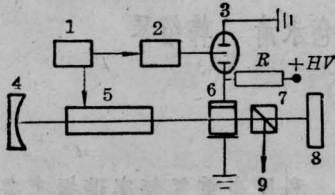


图 9 激光器 PTM 模式运转示意图

- 1—主放电电路; 2—可变延迟线; 3—氢闸流管;
4—全反射镜; 5—激光头; 6—KDP 晶体;
7—偏振棱镜; 8—全反射镜; 9—输出光束

图 10 为 Pockels 盒开启时刻相对于主放电电流脉冲前沿延迟时间 Δt 对输出特性的影响曲线。显然有一最佳时刻 t 能使输出达到极大。从图 10 还可以看到即使偏离最佳时刻 0.2 微秒, 输出下降仍小于 5%, 这与理论估计符合。

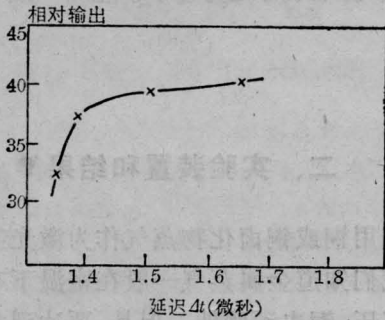


图 10 Pockels 盒开启时刻对输出的影响

图 11、图 12 和图 13 分别为腔长 1 米、2.13 米和 3.16 米的直管灯泵浦的若丹明 6G 染料激光器 PTM 模式运转的输出光脉冲, 从图可以看出脉宽分别为 6.5 毫微秒、14 毫微秒和 23.5 毫微秒。显然光脉宽几乎由腔长所定。

表 1 是直管灯泵浦的若丹明 6G 染料激光器的通常型运转和 PTM 模式运转的输出特性。从表可知: PTM 模式运转输出功率

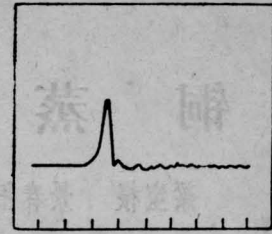


图 11 1 米腔长, 脉宽 6.5 毫微秒
(每格 16.6 毫微秒)

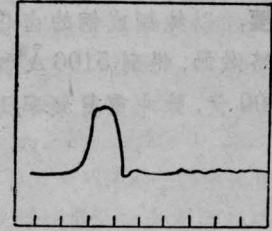


图 12 2.13 米腔长, 脉宽 14 毫微秒
(每格 11.6 毫微秒)

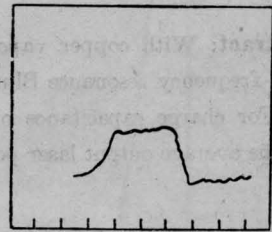


图 13 3.16 米腔长, 脉宽 23.5 毫微秒
(每格 8 毫微秒)

比正常型提高 22 倍; 比正常型有插入损耗提高 73 倍; 正常型有插入损耗时输出减少 70%。

表 1 1 米腔长的直管灯泵浦的若丹明 6G 染料激光器输出特性

| 运转方式 | 输出能量 (毫焦耳) | 输出功率 (瓦) |
|-----------------|---------------|-------------------|
| 正常型(腔内没插入晶体、棱镜) | 32 | 2.2×10^4 |
| 正常型(腔内插入晶体、棱镜) | 9.7 | 6.7×10^3 |
| PTM 模式运转 | 3.16 | 4.9×10^5 |

参 考 文 献

- [1] A. A. Vuylsteke; *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**, 1615.
[2] P. P. Sorokin; *IBM J. Res. Dev.*, 1967, **11**, 130.