

# 增益开关型四能级激光器的时间特性分析

吴秋阳 徐 冰 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 从四能级系统的速率方程出发, 结合实际的物理条件, 针对极短脉冲(10 ns) 泵浦下增益开关型激光器的时间特性建立了一个简洁模型, 得到了输出脉冲的建立时间和脉冲宽度与泵浦能量及能量密度之间的解析关系式, 并结合实验分析了模型的合理性。

**关键词** 增益开关, 四能级系统, 建立时间, 脉冲宽度

目前国内外对增益开关型激光系统的时间特性做了不少理论分析和实验研究工作<sup>[1~6]</sup>, 但对于短脉冲泵浦条件下输出脉冲的时间特性尚未作充分的研究和报道。本文对泵浦脉冲宽度远小于原子激发态荧光寿命, 并且小于脉冲建立时间的增益开关型激光系统的时间特性进行了一些理论和实验分析。

## 1 理 论

本文研究的出发点是四能级激光系统的速率方程

$$d\Delta/dt = -k\Phi\Delta - \Delta/\tau_r \quad (1)$$

$$d\Phi/dt = k\Phi\Delta + \Delta/\tau_r - \Phi/\tau_c \quad (2)$$

$$\tau_c = nL/c(l + \ln R)$$

其中,  $\Delta$  代表激发态原子数,  $\Phi$  代表腔内光子数,  $\tau_r$  表示激发态荧光寿命,  $\tau_c$  表示光子在腔内的寿命,  $k = c\sigma/LA$  为腔模光子与激发态原子之间的相互作用系数<sup>[3]</sup>,  $c$  为真空光速,  $L$  为谐振腔长,  $l$  为腔内光强单程损耗,  $R$  为输出耦合镜反射率, 方程中右边各项分别为受激辐射项、自发辐射项和光子损耗项。

考虑泵浦脉冲极短(10 ns), 远小于工作物质激发态寿命(10  $\mu$ s), 在泵浦期间输出脉冲尚未建立起来, 所以可将系统的初始状态看作是在泵浦期间积累大量初始反转粒子数  $\Delta_0$ ,  $\Delta_0$  由下式给出:

$$\Delta_0 = E_p \eta_a \eta_t \eta_q / h\nu_p \quad (3)$$

式中,  $\eta_a$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_q$  分别表示吸收、传输和量子效率,  $E_p$ ,  $\nu_p$  为泵浦光能量和频率。泵浦光脉冲结束时, 输出脉冲仍未明显建立, 此时腔内在要输出的激光模上处于光子数平衡状态, 并且由于无激光输出, 可见主要是自发辐射产生的光子与光子在腔内的损耗平衡, 即

$$\Delta_0 \Omega / 4\pi\tau_r = \Phi_0 / \tau_c \quad (4)$$

$\Phi_0$  为谐振腔内处于将输出的激光模式上的初始光子数, 主要来源于自发辐射荧光噪声和黑体辐射<sup>[1]</sup>。泵浦结束后, 系统按照方程(1), (2) 所描述的规律以初始条件  $\Delta_0, \Phi_0$  开始运动。根据光辐射的量子理论, 激发态原子向某一模式受激辐射的几率  $n$  倍于自发辐射几率,  $n$  为该模式上的光子数, 脉冲建立过程中激光模式上的光子数急剧增长, 所以考虑物理和数学上的简便, 在脉冲形成前沿可忽略自发辐射项和衰减项, 从而得到脉冲建立时间

$$T_b = \ln[4\pi\tau_v(r-1)/\Omega\tau_c]/k\Delta_0 \quad (5)$$

脉冲后沿过程中激光器是低于阈值运转的, 考虑光子损耗项, 得到输出脉冲宽度为

$$T_w = \ln[(r-1)(r+\ln r+1)/(r-\ln r-1)]/k\Delta_0 + \tau_c \ln 2 \quad (6)$$

$$r = \Delta_0/\Delta_t$$

式中,  $r$  定义为泵浦率,  $\Omega$  为输出激光的空间立体角,  $\Delta_t$  为阈值反转粒子数。两式的推导过程中, 用到了一个符合物理实际的假定, 即  $\Delta_0, \Delta_t$  和光子数峰值  $\Phi_t$  是同一数量级的, 而且都远远大于初始光子数  $\Phi_0$ <sup>[3]</sup>。 $\Delta_t$  可由下式得到<sup>[3]</sup>

$$\Delta_t \tau_c k - \ln(\Delta_t \tau_c k) = 1 + \tau_c \ln(\Phi_t/\Phi_0)/\tau_v \quad (7)$$

将(3)代入(5), (6) 两式中得到

$$T_b = \frac{h\nu_p \ln[4\tau_v(r-1)/\Omega\tau_c]}{\sigma_c \eta_a \eta_l \eta_q} \cdot \frac{LA}{E_p} \quad (8)$$

$$T_w = \frac{h\nu_p \ln[(r-1)(r+\ln r+1)/(r-\ln r-1)]}{\sigma_c \eta_a \eta_l \eta_q} \cdot \frac{LA}{E_p} + \tau_c \ln 2 \quad (9)$$

## 2 理论结果与实验结果的对照和分析

- 1) 在(8), (9) 两式中, 与泵浦光有关的项不仅出现在分母中, 而且出现在分子中的对数符号下, 由  $r$  的定义和简单的分析可知, 泵浦项对  $T_b, T_w$  的影响主要来自分母中的  $E_p$ , 而对泵浦率  $r$  的影响非常不敏感;
- 2) 由(8), (9) 两式可知,  $T_b, T_w$  与泵浦能量几乎成反比变化, 泵浦能量越高脉冲建立时间越短, 脉冲宽度越窄;
- 3) 乘积  $LA$  可以看作有效的腔模体积, 简单的数学变换可以发现, 脉冲建立时间和脉冲宽度与泵浦能量密度有着同样的近似反比关系。

在实验中构造了一台增益开关型 Ti:Sapphire 激光器, 利用 Nd:YAG 的输出光经过 KTP 倍频之后再经过调  $Q$  的 532 nm 短脉冲(22 ns) 光泵浦 Ti:Sapphire, 泵浦光和输出光能量用 PT-1 型能量计测量, 精度为 0.01 mJ, 泵浦光脉冲和输出光脉冲由同一个光电二极管接收, 用存储示波器观测脉冲形状、宽度和建立时间, 从而得到如图 1 和图 2 所示的实验数据(图中用  $\Delta$  表示的各点), 图中曲线表示公式(8), (9) 的计算结果, 其中有关参数根据实验确定如下:  $L = 60$  mm,  $\lambda_p = 532$  nm,  $\Omega = 10^{-6}$  mrad<sup>2</sup>,  $\tau_v = 3.2 \times 10^{-6}$  s,  $\sigma = 3.15 \times 10^{-9}$  cm<sup>2</sup>,  $l = 20\%$ ,  $R = 50\%$ ,  $A = 12 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>,  $\eta_a = \eta_l = \eta_q = 95\%$ 。

## 3 讨 论

- 1) 由图 1 和图 2 的结果可以看出, 理论曲线与实验结果基本相符, 两者的趋势一致。这说明上面讨论的物理过程和考虑的实际物理条件基本合理, 建立的物理模型包括了主要的物理因素。

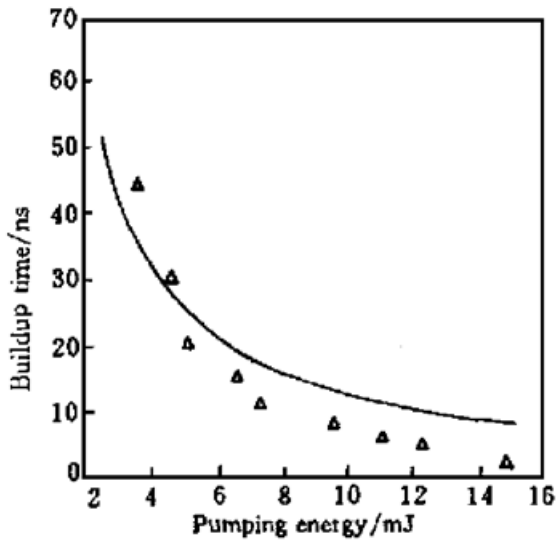


图 1 脉冲建立时间与泵浦能量(脉宽 22 ns)的关系  
△表示实验数据点, 曲线由式(8)给出

Fig. 1 Pulse build-up time vs pumping energy (pulse width is 22 ns).  $\triangle$  represents the experimental data and the curve represents the result of (8)

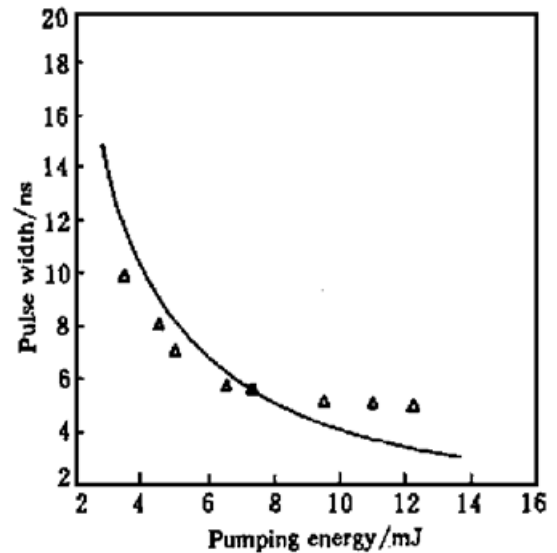


图 2 脉冲宽度与泵浦能量(脉宽 22 ns)的关系  
△表示实验数据点, 曲线由式(9)给出

Fig. 2 Pulse width vs pumping energy (pulse width is 22 ns).  $\triangle$  represents the experimental data and the curve represents the result of (9)

2) 由图 1 看出, 理论和实验还是存在一些差距, 分析主要原因在于: 由于泵浦光束在空间上的高斯分布, 工作物质中的反转粒子数和增益在空间上也有一个相应的分布, 本文中对这种效应未加考虑。(3) 将对这一因素造成的影响加以分析; 另外一个重要原因是在泵浦能量很高的情况下, 虽然泵浦脉冲宽度极短, 只有 20 ns 左右, 远小于工作物质的荧光寿命, 但是此时超阈值较高, 脉冲容易建立起来, 事实上在泵浦过程中就已经开始建立, 所以测得的实验结果要短于相应理论值, 约几个纳秒。

3) 由于泵浦光束的高斯分布, 工作物质在泵浦光束轴线附近积累了主要的激发态原子, 相应增益也要大, 离开轴线较远的部分, 激发态原子较少, 增益也小; 并且泵浦能量越大, 这种效应越明显, 泵浦能量越大的集中在轴线附近, 而由上面的分析可知, 泵浦能量密度越高, 脉冲建立时间越短, 这与图中的情况是一致的。

4) 从图 2 中的实验点可以看出随着泵浦能量的增加脉冲宽度有一个逐渐“饱和”的趋势, 对此解释是: 由激光的产生机理可知, 要得到激光输出, 光强在腔内必须得到足够的增益, 而要得到足够的增益, 统计平均起来, 每个光子在腔内要往返很多次。根据本文实验, 若设光子在腔内平均往返 10 次再输出, 则对应的脉冲宽度“饱和值”约为 4 ns。在采用速率方程进行的分析中不能包括这种因素。

## 4 结 论

本文针对短脉冲泵浦条件下增益开关型四能级激光系统的时间特性建立了一个简洁模型, 所得到的结果对选择适当的泵浦光, 以获得合适的、稳定的输出脉冲, 以及装置之间的时间同步问题上, 有着重要的现实意义。

对于激发态原子和增益的空间分布带来的影响, 正在进行进一步的研究, 拟采用数值计

算以期获得更加符合实际的结果。但数值计算只能获得针对某一具体激光系统的关系曲线,所以本文对于给出一般的设计参数仍具有很大的指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. An investigation of the Co·MgF<sub>2</sub> laser system. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(10) : 1582~ 1595
- 2 P. F. Moulton. Spectroscopic, and laser characteristics of Ti·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 1986, **3**(1) : 125~ 133
- 3 J. M. Eggleston, L. G. Deshazer, K. W. Kangas. Characteristics and kinetics of laser-pumped Ti·sapphire oscillators. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6) : 1009~ 1015
- 4 G. A. Rines, P. F. Moulton. Performance of gain-switched Ti·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unstable resonator laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8) : 434~ 436
- 5 T. R. Steele, D. C. Gerstenberger, A. Drobshoff. Broadly tunable high-power operation of an all-solid-state titanium-doped sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6) : 399~ 401
- 6 Xu Bing, Lin Lihuang, Ouyang Bin *et al.*. Temporal characteristics of a gain-switched Ti<sup>3+</sup>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1993, **13**(5) : 425~ 430 (in Chinese)

## Analysis of the Temporal Performance of a Gain-switched Four-level Laser

Wu Qiuyang Xu Bing Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** This article reports a simple theoretical model developed for the temporal performance of a short laser pulse pumped, gain-switched, four-level laser system. The model is based on the rate-equations of four-level systems and some practical physics conditions. From the model, we obtain some analytical relationships between the build-up time, pulse width of the output laser pulse and the pumping energy and energy density. The rationality of the model is analyzed according to the experimental results.

**Key words** gain-switched, four-level system, build-up time, pulse width