

# 增益开关型固体可调谐激光器 的时间特性——理论

张国威

(北京理工大学, 北京, 100081)

**摘要:** 本文从理论上分析研究了调 Q 激光器泵浦的固体可调谐激光器的时间特性, 推导出了这种寿命为  $\mu\text{s}$  量级的固体可调谐激光器, 当用 10ns 量级脉宽激光泵浦时的激光脉冲建立时间公式和输出脉宽公式。这种泵浦时间远小于激光脉冲建立时间的增益开关型激光器的理论分析表明, 其输出激光的时间特性仅取决于泵浦能量(密度)的水平和腔长(以及腔损耗), 而与泵浦脉冲宽度和波形无关。

**关键词:** 增益开关 可调谐激光器 时间特性

## Temporal characteristics of the gain-switched tunable solid-state laser-theory

Zhang Guowei

(Beijing Institute of Technology)

**Abstract:** The temporal characteristics of tunable solid-state laser pumped by a Q-switched laser are studied theoretically. The formulas of the buildup time and the pulse-width of the oscillating mode for vibronic solid-state lasers with lifetime  $\mu\text{m}$ -magtitude, pumped by a laser with 10 ns magtitude pulse-width which are shorter compared to the buildup time of the oscillating mode, have deduced. The theoretical model gain switching model predicts that the temporal characteristics of the laser, the buildup time and the pulse-width are dependent only on the pumping energy level and cavity length.

**Key words:** gain-switch tunable laser temporal characteristics

### 一、引 言

常见的固体脉冲激光器由于具有足够长的荧光寿命(如 Nd:YAG 为  $240\mu\text{s}$ , Nd:YLF 为  $480\mu\text{s}$ , Cr:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则有 3ms), 多采用放电时间为几百微秒的闪光灯泵浦的储能调 Q 工作获得激光巨脉冲。Q 开关的作用实质上是通过控制腔的损耗实现储能和释放能, 即为一种控制损

耗的开关。近年来出现的许多过渡金属离子可调谐固体激光器,往往具有较短的荧光寿命,如  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  仅  $3.2\mu\text{s}$ ,  $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  为  $3.6\mu\text{s}$ , 而  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  只有  $3.1\mu\text{s}$ , 难于进行灯泵浦储能调 Q 工作, 而常用其它脉冲激光器作为泵浦源的方式工作, 如用  $\text{Nd}:\text{YAG}$ , 铜蒸汽激光器等。这些激光器的脉冲宽度在  $10\sim 50\text{ns}$  范围, 远小于激光介质的荧光寿命, 具有极高的泵浦速率, 也能得到窄脉宽的激光巨脉冲。人们把这种用纳秒激光脉冲泵浦的激光器称做以增益开关 (Gain Switching) 方式工作的激光器, 其激光形成的动态特性既不同于调 Q 工作的脉冲固体激光器, 也不同于脉冲染料激光器(其荧光寿命更短, 为 ns 量级)。最近几年有人对脉冲掺钛蓝宝石激光器的时间特性做了一些实验研究<sup>[1~4]</sup>, 表明这种增益开关型的脉冲固体激光器确实具有一定的特点, 例如, 其得到的激光脉冲宽度与泵浦光的脉宽无关, 而主要取决于泵浦能量的水平和腔长。用短腔长和足够的泵浦功率, 即可得到  $\ll 10\text{ns}$  的窄脉冲激光。

本文将从理论上分析这种增益开关工作激光器的动态特性, 并与 Q 开关技术进行了比较。文中导出了其激光脉冲建立时间和激光脉冲宽度的近似理论公式, 结合已有的对  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  激光器的实验结果进行一些讨论。

## 二、理论与分析

假设所研究的激光系统满足以下条件:

- (1) 激光介质具有宽带的二能级结构, 可等效看作是四能级激光系统;
- (2) 激光上能级的寿命虽较短( $\mu\text{s}$  量级), 但远远大于泵浦光脉冲的宽度(至少一个量级以上)。

### 1. 速率方程式

脉冲激光泵浦的激光器的激光形成过程, 可用粒子数反转密度(以下简称粒子数反转)  $N(t)$  和腔内光子密度  $n(t)$  的速率方程来表示

$$\frac{dN(t)}{dt} = W(t)N_0 - N/\tau_f - c\sigma_e nN \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = c\sigma_a Nn - n/\tau_c \quad (2)$$

式中,  $c$  为光速,  $\sigma_e$  为受激发射截面,  $\tau_f$  为激光上能级寿命,  $\tau_c = T/\delta_c$  为腔的光子寿命 ( $T = 2L/c$ ,  $L$  为腔长,  $T$  则是光在腔内往返一次的时间,  $\delta_c$  是腔损耗)

$$\delta_c = \ln(1/R) + 2\alpha_{ml} + L_0 \quad (3)$$

式中, 第一项为耦合损耗 ( $R = R_1 \cdot R_2$ ), 第二项为晶体的吸收, 第三项为腔内的反射、衍射、散射等其它损耗。因有关系

$$N_T = N_0 + N_1 + N_2 \quad (4)$$

式中,  $N_T$  为所掺离子的浓度(对  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  约为  $10^{18}\sim 10^{19}$  离子/ $\text{cm}^3$ ),  $N_0$ 、 $N_1$  和  $N_2$  分别为基态、激光下能级和上能级的粒子数。对宽带二能级,  $N_1 \approx 0$ , 则粒子数反转  $N(t) = N_2(t) - N_1(t) \approx N_2(t)$ 。

而泵浦速率有关系

$$W(t) = P(t)\sigma_a(\nu_p)/A \cdot h\nu_p = c\sigma_a(\nu_p)n_p \quad (5)$$

式中,  $P(t)$  为泵浦功率,  $\sigma_a(\nu_p)$  是激光介质对泵浦光的吸收截面,  $h\nu_p$  为泵浦光的光子能量,  $A$  是泵浦光斑截面的面积,  $n_p$  是泵浦光的光子密度。例如, 对  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\sigma_a(\lambda = 532\text{nm}) \approx 4.9$

$\times 10^{-20} \text{cm}^2$ , 而  $h\nu_p \approx 3.7 \times 10^{-19} \text{J}$ , 如果  $A = 0.03 \text{cm}^2$ , 则对脉宽为 10ns 的泵浦光, 脉冲能量 10 ~ 100mJ, 即有泵浦速率  $5 \times 10^6 \sim 10^7/\text{s}$ 。

2. 纳秒(ns)脉冲泵浦的粒子数反转特性

在 Q 开关技术中, 高粒子数反转, 高储能是在低 Q 值(高损耗)条件下是通过低泵浦速率的时间积累(长脉冲泵浦)来实现的, 然后进行 Q 值突变而获得激光巨脉冲。而在增益开关技术中, 腔的损耗(Q 值)始终不变, 它的高储能(高粒子数反转)则是由极高泵浦速率的纳秒短脉冲激光泵浦来实现的, 即依靠在极短的时间内获得高增益而获得激光巨脉冲。

在 Q 开关技术中, 泵浦的作用贯穿于激光形成过程的始终, 即激光系统开始振荡后仍同时存在着储能和释能, 并有一个稳态解。而在增益开关技术中, 当激光起始振荡时, 泵浦作用却中止了, 即存在有泵浦作用的储能阶段和无泵浦作用的释能阶段。图 1 描述了增益开关型激光器的激光形成过程, 设泵浦光的脉宽为  $t_p$ , 则  $t = 0 \sim t_p$  为储能阶段,  $t > t_p$  则为释能阶段, 即激光建立形成阶段。

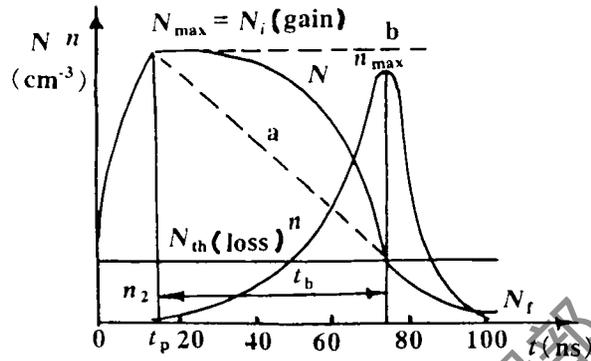


Fig. 1 Development of a gain-switched laser pulse

对  $t \leq t_p$ , 可忽略自发辐射和受激辐射, 这时(2)式简化为

$$dN/dt = W(t)N_0(t) = W(t)[N_T - N(t)] \tag{6}$$

它的解为

$$N(t) = N_T[1 - \exp(-W(t) \cdot t)] \tag{7}$$

在  $t = t_p$  时达到最大值  $N_{max} = N_T[1 - \exp(-W \cdot t_p)]$  (8)

如果  $t_p = 10\text{ns}$ , 当  $W = 5 \times 10^7/\text{s}$  时,  $N_{max} \approx 0.5N_T$ 。若有  $W = 3 \times 10^8/\text{s}$ , 则  $N_{max} \approx 0.95N_T$ 。

对  $t > t_p$  阶段, 这时  $W(t) = 0$ , 若忽略自发辐射, (1)式则有

$$dN/dt = -c\sigma_e n N \tag{9}$$

它的解则为

$$N(t) = N_{max} \cdot \exp[-c\sigma_e n(t) \cdot (t - t_p)] \tag{10}$$

即增益将随着激光脉冲的形成而指数地下降。光子密度  $n(t)$  由初始的  $n_2$ , 而它由于受激放大作用而不断地加快增长速率, 当粒子数反转  $N$  下降到阈值  $N_{th}$  时, 光子密度达到最大值(峰值)  $n_{max}$ 。

3. 宽带二能级系统的阈值

阈值粒子数反转  $N_{th}$  可由(2)式取  $dn/dt = 0$  求得

$$N_{th} = 1/c\sigma_e \tau_c = \delta_c/2\sigma_e L \tag{11}$$

即与腔损耗成正比, 而与受激辐射截面和腔长成反比。对  $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\sigma_e(800\text{nm}) = 3.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 若  $\delta_c = 0.5$ ,  $L = 30\text{cm}$ , 则  $N_{th} = 2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。通常  $N_{th}$  在  $10^{16} \sim 10^{17}/\text{cm}^3$  范围。并可由(5)式或(7)式得到阈值泵浦速率

$$W_{th} = (1/t_p) \ln[N_T/(N_T - N_{th})] \tag{12}$$

而阈值泵浦功率则有

$$P_{th} = A \cdot h\nu_p \cdot W_{th}/\sigma_a(\nu_p) \tag{13}$$

4. 最大光子密度与激光峰值功率

在公式(2)中利用关系式(11),可写成

$$dn/dt = c\sigma_e(N - N_{th})n \tag{14}$$

对(1)式来说,这时  $W(t)=0$ ,且忽略自发辐射,则有

$$dN/dt = -c\sigma_e nN \tag{15}$$

两式相除后积分,得到

$$n - n_i = N_i - N - N_{th}\ln(N_i/N_{th}) \tag{16}$$

$n_i$  相对于  $n$  可以忽略,则近似有

$$n \simeq N_i - N - N_{th}\ln(N_i/N_{th}) \tag{17}$$

而当  $N = N_{th}$ 时,光子密度即达到最大值。并设  $N_i/N_{th} = r$ ,它是起始振荡时的粒子数反转与阈值粒子数反之比,是一个表示泵浦水平的重要参数。这样,最大光子数密度可表示为

$$n_{max} \simeq [(r - 1 - \ln r)/r] \cdot N_i = \varphi(r) \cdot N_i \tag{18}$$

(18)式表明,最大光子数密度不仅比例于  $N_i(N_i \simeq N_{max})$ ,且取决于泵浦的水平  $r$ 。 $\varphi(r)$ 的物理意义是峰值激光由总储能中提取的粒子数(光子数)的比值  $\varphi(r) = n_{max}/N_{max}$ 。显然,是一个无量纲的函数。图2为  $\varphi(r)$ 的图解,在  $r=3$ 时,约有30%左右的  $N_i$ 转变为峰值处的光子。而当  $r=5$ 时,则有50%左右的  $N_i$ 转变为  $n_{max}$ 。其它的反转粒子数则被激光脉冲的前沿和后沿所消耗。峰值处光子消耗的反转粒子数的比值越大,则激光的脉宽将越窄。

激光的峰值功率则有<sup>[5]</sup>

$$P_p \simeq n_{max} \cdot Vh\nu_e/\tau_c \tag{19}$$

式中,模体积  $V \simeq AL$ ,  $h\nu_e$  为激光的光子能量。

而输出腔外的为  $\ln(1/R)/\delta_c$  部分,即有

$$P_{out} \simeq \frac{1}{2} n_{max} \cdot cAh\nu_e \cdot \ln(1/R) \tag{20}$$

5. 激光脉冲建立时间

设振荡起始时的粒子数反转  $N_i = N_{max}$ ,并设

$t' = t - t_p$ ,则(10)式可写成

$$N(t') = N_i \exp(-c\sigma_e n t') \tag{21}$$

若把(21)式直接代入(2)式,这种超越函数无法求解。但如果我们用直线(见图1中虚线a)

$$N(t) = N_i - [(N_i - N_{th})/t_b']t \tag{22}$$

来代替曲线(21)式,将(22)式代入方程(2),并考虑到关系式(11),则有

$$dn/n = [(r - 1)/\tau_c][(1 - t')/t_b']dt' \tag{23}$$

对  $n$  由  $n_i$  至  $n_{max}$  积分,对  $t'$  由 0 至  $t_b'$  积分,解出

$$t_b' = 2\tau_c/(r - 1)\ln(n_{max}/n_i) \tag{24}$$

但如果设  $N = N_i$  等于常数(见图1中虚线b),则(23)式变成

$$dn/n = [(r - 1)/\tau_c]dt' \tag{25}$$

它的解为

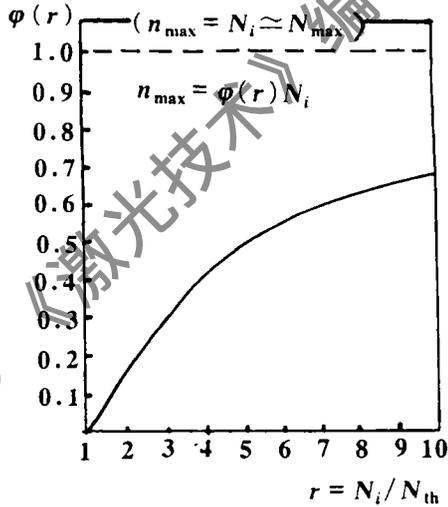


Fig 2 Maximum photon density vers  $r = N_i/N_{th}$

$$t_b' = \tau_c / (r - 1) \cdot \ln(n_{\max} / n_i) \tag{26}$$

(24)式和(26)式可共同表示为

$$t_b' = \beta \tau_c / (r - 1) \cdot \ln(n_{\max} / n_i) \tag{27}$$

显然,对于粒子数反转按(21)式规律变化时,(27)式中  $\beta$  值应有  $1 < \beta < 2$ 。实验表明,通常  $\beta = 1.1 \sim 1.3$ 。式中因  $n_i \ll n_{\max}$ ,则可近似有

$$t_b' \simeq \beta \tau_c / (r - 1) \cdot \ln n_{\max} \tag{28}$$

再代入(18)式,可写成

$$t_b' \simeq \beta f(r \cdot N_{th}) \tau_c \tag{29}$$

式中,  $f(r \cdot N_{th}) = 1 / (r - 1)$

$$\cdot \ln[r \cdot \varphi(r) \cdot N_{th}] \tag{30}$$

这是一个以  $N_{th}$  为参量、以  $r = N_i / N_{th}$  为变量的函数,也是一个无量纲的函数。它的图解请见图 3,两曲线的参量  $N_{th}$  分别为  $10^{16} / \text{cm}^3$  和  $10^{17} / \text{cm}^3$ 。可以看出,  $f(r \cdot N_{th})$  主要取决于泵浦水平  $r$ ,而阈值大小的直接影响较小,在  $r > 3$  后完全可以忽略(在  $N_{th} = 10^{14} \sim 10^{18}$  范围内)。而当  $r > 7$  时即与  $N_{th}$  无关。

(28)式和(29)式即为增益开关型激光器的激光脉冲建立时间的近似理论公式,它比例于光子寿命(腔长),而取决于  $f(r \cdot N_{th})$ 。如果定义激光脉冲建立时间为泵浦光脉冲峰值与激光脉冲峰值之间的时间延迟,则应为  $t_b = t_b' + t_p / 2$ 。

### 6. 激光脉冲的宽度

如果定义激光脉冲的宽度为

$$\Delta t = E / P_p \tag{31}$$

而激光能量有<sup>[6]</sup>

$$E = \alpha (N_i - N_f) V h \nu_e \tag{32}$$

这里,  $1 < \alpha < 2$ 。将(19)式和(32)式代入(31)式得到

$$\Delta t = \alpha \cdot F(r) \cdot \tau_c \tag{33}$$

式中,  $F(r) = \eta(r) / \varphi(r)$   $\tag{34}$

式中,  $\eta(r) = (N_i - N_f) / N_i$   $\tag{35}$

$N_f$  表示剩余粒子数反转(参见图 1),因此  $\eta(r)$  的意义乃是储能( $N_i$ )的提取效率。因而  $F(r)$  也是一个无量纲的函

数。 $\eta(r)$  可由对(17)式取  $n = 0$  解出,文献[6]数值地解得了  $\eta(r)$  与  $r, \frac{N_i}{N_f}$  的关系,可知  $\eta(r = 3) \simeq 0.95$ , 而  $\eta(r = 5) \simeq 1$ , 由此我们可以得到  $F(r)$  的解如图 4 所表示。(33)式表明,激光脉冲的密度与泵浦光脉冲的宽度无关,而与腔长成正比。

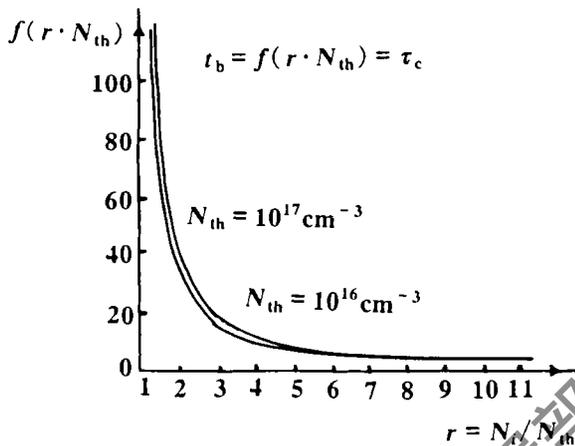


Fig. 3 Laser pulse buildup time vers  $r = N_i / N_{th}$

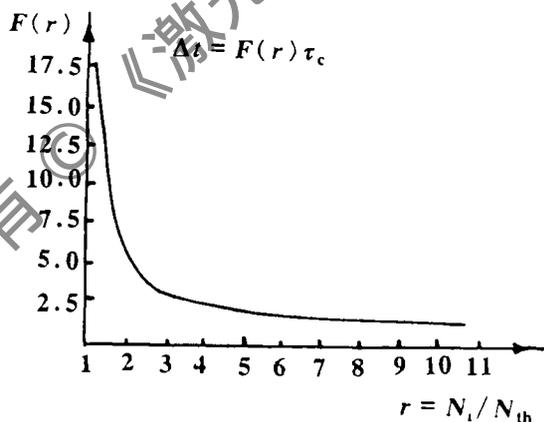


Fig. 4 Laser pulse-width vers  $r = N_i / N_{th}$

### 三、结论与讨论

1. 增益开关技术实为弛豫振荡的特例。对通常的脉冲固体激光器,由于泵浦光是一种低泵浦速率的长脉冲(ms量级),势必出现粒子数反转在阈值上下的振荡和光子密度相对于稳态的振荡。但对于高泵浦速率的短脉冲,在达到高增益后即停止了泵浦作用,第一个激光脉冲即几乎提取走了全部的储能。由于不再有泵浦储能作用,因此也不会有弛豫振荡。这种通过快速实现高增益而起到光开关作用的技术,人们称它为“增益开关技术”。相对而言,Q突变技术则是通过控制腔损耗而实现光开关作用,它是一种“损耗开关技术”。增益开关技术一般不会出现双脉冲,除非当泵浦光的脉宽过宽(即必要条件不满足),如大大长于激光脉冲建立时间,且泵浦能量又较高时,才有可能。

2. 增益开关技术的激光脉冲建立时间和激光脉冲的宽度,都与泵浦光的脉冲宽度无关,而主要取决于泵浦水平  $r = N_i/N_{th}$ ,与腔长  $L$  成正比,且与腔损耗  $\delta_c$  有关。由(29)式或图3可知,泵浦光的脉宽应以  $10 \sim 10^2$  ns 为宜。原则上,泵浦脉冲宽度越窄,泵浦速率越高,越有利于获得高峰值的巨激光脉冲。泵浦水平  $r < 3$  的区域是敏感区,在这个范围内,泵浦能量的波动对激光脉冲的建立和脉冲的形成影响较大。而当  $r > 3$  时,无论是激光脉冲建立时间,还是激光脉冲的宽度都大大缩小,并趋向缓慢地变化,即具有相对稳定的时间特性。当  $r > 7$  后,则几乎趋为常数,  $t_b' \simeq 5\tau_c$ ,  $\Delta t \simeq 1.5\tau_c$ 。因此,这种增益开关型激光器最好工作于  $r > 3$  的泵浦水平,但过高的泵浦必须考虑到饱和问题和材料的损伤阈值。

3. 用同样的脉冲激光泵浦染料激光时,不具有增益开关的上述特性,这是因为染料激光不仅上能级寿命短( $1 \sim 10$  ns,比过渡金属离子小  $10^3$  左右),而且受激发射截面大得多,阈值低得多,因此激光脉冲建立早,形成快。结果,其脉冲宽度与泵浦光脉冲宽度基本相同。

4. 增益开关技术的这种时间特性,有可能利用它来获得几~几十纳秒、脉冲宽度可调谐激光。

5. 对增益开关工作的激光器,泵浦水平  $r = N_i/N_{th}$  不仅对激光脉冲形成的时间特性起着重要的作用,而且对能量的提取效率也起着重要的作用。如在  $r = 2$  时,能量的提取效率仅80%左右,而当  $r = 3$  时,即达95%,但这时峰值处光子仅占25%左右。但如果  $r = 5$ ,则提取效率几乎达100%,而峰值处光子比例可达50%以上,即有利于获得高功率,高转换效率工作的器件。

关于结合掺钛蓝宝石激光器对增益开关特性的实验研究,请参阅论文[7]。

#### 参 考 文 献

- 1 Eggleston J M, Deshazer L G, Kangas K W. IEEE J Q E., 1988;QE-24:1009
- 2 Rines G A, Moulton P F. Opt Lett, 1990;15:434
- 3 Steele T R, Gerstenberger D C, Drobshoff A *et al.* Opt Lett, 1991;16:399
- 4 徐 冰,林礼焯,欧阳斌 *et al.* 光学学报, 1993;13:425
- 5 Koechner W. Solid-State Laser Engineering. Springer-Verlag; 1988
- 6 Wagner W G, Lengyel B A. J A P, 1963;34:2040
- 7 杨 杨,刘宏发,张国威.激光技术, 1995;19:(待发表)

\*

\*

版权所有 © 《激光技术》编辑部