

# Q 开关 Nd : YAG 激光器的优化设计

曹三松 徐绍林 王明秋 吴大志 韩 凯

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

**摘要:** 本文根据速率方程, 推导出 Q 开关 Nd : YAG 激光器效率与器件参数的关系式。通过合理选择输出镜的反射率可以提高激光器性能。文中还给出了优化调 Q 激光器效率的简单方法。

## Optimization of Q-switched Nd : YAG laser

Cao Sansong, Xu Shaoling, Wang Mingqiu, Wu Dazhi, Han Kai

(Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract:** Using the rate equations, we derive expression for Q-switched Nd : YAG laser efficiency, which is related to the system parameters. The performance of a Q-switched laser can be optimized through proper choice of output mirror reflectivity. A simple process for Q-switched laser efficiency is presented.

### 一、引 言

为了获得高峰值功率的激光输出, 采用 Q 开关技术是一条有效的途径。在 Q 开关激光脉冲形成之前, 必须使谐振腔维持高损耗以达到尽可能多的反转粒子数, 然后急剧降低腔内损耗, 使反转粒子数远高于阈值条件, 从而可以获得短脉冲高功率激光输出。因此, 腔损耗的控制是获得好的 Q 开关激光性能的关键。

通常采用速率方程来描述 Q 开关激光形成过程, 速率方程的详细分析已有文献给出<sup>[1,2]</sup>, 曾有作者采用数值计算方法分析染料调 Q 激光速率方程<sup>[3]</sup>。本文采用解析方法, 根据速率方程分析 Q 开关 Nd : YAG 激光器的特性。由于谐振腔输出镜的反射率是激光器设计的一个重要参数, 所以本文推导了调 Q 激光器最佳输出反射率公式。这些表达式和相应的数值计算结果对调 Q 激光器的优化设计具有一定的指导意义。

### 二、速率方程

Nd : YAG 晶体属于四能级结构的激光工作物质, 其简化能级图如图 1 所示。在闪光灯激励下, 基态的粒子被泵浦到高能态。而这些高能态的粒子处于非稳定状态, 会迅速向亚稳态  $4F_{3/2}$  能级非辐射跃迁, 跃迁时间非常短, 大约  $10^{-11}$ s, 因此可以认为粒子是由基态抽运到亚稳态上。由于亚稳态粒子寿命较长, 大量粒子得以在该能级上积累。当反转粒子数积累到一定程度, 减小谐振腔的损耗, 就会形成由亚

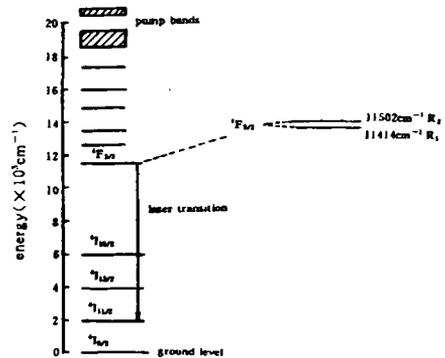


Fig. 1 Energy level diagram of Nd : YAG

稳态  $4F_{3/2}$  向低能态  $4I_{11/2}$  能级的受激跃迁, 产生  $1.06\mu\text{m}$  的激光输出。需要指出的是, Nd:YAG 的亚稳态  $4F_{3/2}$  是由二个简并能级组成, 如图 1 所示, 只有  $R_2$  能级的粒子参与了  $1.06\mu\text{m}$  激光发射。在室温下,  $4F_{3/2}$  能级的粒子数只有 40% 分布在能级  $R_2$  上<sup>[4]</sup>。如果在外界的刺激下, Nd:YAG 亚稳态中参与  $1.06\mu\text{m}$  激光发射的那部分反转粒子数密度为  $N$ , 则晶体的贮能  $E_s$  实际为:

$$E_s = \frac{h\nu \cdot N \cdot V}{k} \quad (1)$$

式中,  $h\nu$  是光子能量;  $k=0.4$  是 Nd:YAG 的能级简并系数;  $V$  是晶体体积。

由激光原理可知, 在激光产生过程中, 除一部分激光能量由谐振腔耦合输出外, 所有的激光能量是以受激反转粒子数或以在谐振腔之间来回振荡的光子的形式贮存在激光介质中。描述谐振腔内光子密度  $\varphi$  和激光工作物质反转粒子数密度  $N$  随时间变化的方程如下<sup>[4]</sup>:

$$\frac{d\varphi}{dt} = c\sigma N\varphi - \frac{\varphi}{t_0} \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = F(t) - c\sigma N\varphi - \frac{N}{t_f} \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  是受激跃迁截面;  $c$  是光速;  $t_0$  是腔内光子寿命;  $F(t)$  为光泵浦速率;  $t_f$  是激光工作物质的荧光寿命。光子寿命  $t_0$  定义为:

$$t_0 = \frac{l}{c \cdot \left( L - \frac{1}{2} \ln R \right)} \quad (4)$$

式中,  $l$  是谐振腔光程长度;  $L$  是腔内损耗;  $R$  是输出镜的反射率。由于 Q 开关脉冲持续时间很短(约为几十毫微秒), 因而可将速率方程(3)中的自发辐射和光泵浦忽略不计, 则调 Q Nd:YAG 激光速率方程简化为:

$$\frac{d\varphi}{dt} = c\sigma(N - N_t)\varphi \quad (5)$$

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot c \cdot \sigma N\varphi \quad (6)$$

$$N_t = \frac{L - \frac{1}{2} \ln R}{\sigma l} \quad (7)$$

式中,  $N_t$  称为阈值反转粒子数密度。将速率方程的时间参数消去, 取(5)式和(6)式的商得:

$$\frac{d\varphi}{dN} = -\frac{(N - N_t)}{kN} \quad (8)$$

假设在 Q 开关打开之前, 腔内的初始光子数可以忽略不计, 则 Q 开关打开之后巨脉冲形成过程中, 腔内的光子数密度  $\varphi$  可由方程(8)经过积分得到:

$$\varphi = \frac{1}{k} \left( N_0 - N - N_t \ln \frac{N_0}{N} \right) \quad (9)$$

式中,  $N_0$  是初始反转粒子数密度。图 2 是根据方程(9)给出的腔内光子  $\varphi$  随反转粒子数  $N$  变化的曲线, 分别对应三种不同的泵浦速率。由该图可以看出, 在 Q 开关打开之前, 腔内损耗很大;  $N_0 < N_t$ , 激光振荡不能形成。不同的泵浦抽运功率, 形成不同的初始反转粒子数  $N_0$ , 当 Q 开关打开以后, 腔内损耗迅速降低, 腔内光子数  $\varphi$  逐渐增加, 导致反转粒子数  $N$  减少, 当减少到  $N = N_t$  时, 光子数  $\varphi$  达到最大值, 出现峰值功率。然后光子数逐渐减少, 直至  $\varphi = 0$ , 激光发射

停止,此时仍有少量的反转粒子数  $N = N_f$ ,它满足如下关系:

$$\ln \frac{N_f}{N_m} = - \left( \frac{N_m - N_f}{N_f} \right) \quad (10)$$

由图2可知,光子密度  $\varphi$  的大小与  $N_m$  有关,只有较高的  $N_m$ ,才会产生较高的光子密度,形成高能量巨脉冲激光输出.由(1)式可得:

$$N_m = k \frac{E_s}{h\nu \cdot V} \quad (11)$$

因此增加  $N_m$  的关键,是提高激光介质的贮能  $E_s$ .

### 三、调Q激光器的效率

脉冲Q开关Nd:YAG激光器包括电源、脉冲成形网络、脉冲灯、聚光腔、Nd:YAG晶体、Q开关光学元件和谐振腔等几个部分.激光器工作过程是电源对脉冲形成网络充电至电压  $V_0$ ,由单节或多节LC电路构成的成形网络将网络贮能  $E_i = \frac{1}{2}CV_0^2$ ,注入到脉冲泵浦灯中,通过聚光腔将灯的辐射能量转移到Nd:YAG棒内,变成晶体的贮能  $E_s$ .在Q开关打开之后,形成激光振荡,通过输出镜产生能量为  $E_0$  的巨脉冲激光输出.因此调Q Nd:YAG激光器的优化设计主要是提高输出能量  $E_0$  和效率  $\eta = E_0/E_i$ .

从Q开关激光器的工作原理可知,激光器的效率  $\eta$  可以分解成泵浦效率和提取效率两个部分:

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_e \quad (12)$$

泵浦效率  $\eta_p$  是指由贮能网络的输入能量  $E_i$  转化激光工作物质的贮能  $E_s$  的效率:

$$\eta_p = \frac{E_s}{E_i} \quad (13)$$

$\eta_p$  包括灯的发光效率、聚光腔的耦合效率以及电源效率等,曾有一些学者对Q开关Nd:YAG激光器的泵浦效率进行了研究<sup>[6]</sup>.提取效率  $\eta_e$  是指由激光工作物质的贮能  $E_s$  转化为激光输出能量  $E_0$  的效率,

$$\eta_e = \frac{E_0}{E_s} = \eta_o \cdot \eta_m \quad (14)$$

$\eta_e$  包括Q开关能量利用率  $\eta_o$  和输出耦合效率  $\eta_m$  两个部分.

对调Q脉冲产生的过程分析可以发现,只有  $N_m - N_f$  的反转粒子数参与了光子的产生,形成受激发射,而剩余的反转粒子数  $N_f$  作为荧光或热弛豫等其他形式而损失掉.因此Q开关能量利用率  $\eta_o$  就表达为:

$$\eta_o = \frac{N_m - N_f}{N_m} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{N_m - N_f}{N_f} \right) \right] \quad (15)$$

上式又可写成:

$$\frac{N_m}{N_f} = \frac{1}{\eta_o} \ln \left( \frac{1}{1 - \eta_o} \right) \quad (16)$$

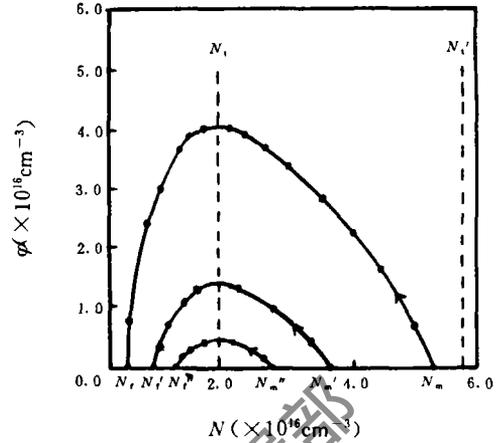


Fig. 2 The photon density  $\varphi$  as a function of the population inversion density  $N$

根据(16)式,图3给出了能量利用率  $\eta_e$  随反转粒子数比值  $N_m/N_i$  的关系曲线。由该图看出,只有当  $N_m > 2N_i$ , 调 Q 激光器的能量利用率  $\eta_e$  才较高。因此应当提高激光介质的贮能,增加泵浦速率,使初始反转粒子数  $N_m$  提高,激光效率才会增加。

激光器的耦合效率  $\eta_m$  通常表示为<sup>[6]</sup>:

$$\eta_m = \frac{\ln \frac{1}{R}}{\left(2L - \ln \frac{1}{R}\right)} \quad (17)$$

式中,  $R$  为输出镜反射率;  $L$  是包括激光介质的吸收、散射等各种损耗。  $L$  可表示为:

$$L = \alpha l' + \alpha' \quad (18)$$

式中,  $\alpha$  为损耗系数;  $l'$  为激光工作物质长度;  $\alpha'$  为其它损耗。用(11)式与(7)式相除,得:

$$\frac{N_m}{N_i} = \frac{E_s}{\beta \left( L - \frac{1}{2} \ln R \right)} \quad (19)$$

式中,

$$\beta = \frac{h\nu \cdot V}{k\sigma l} \quad (20)$$

将(14)式代入(19)式就得到它与输出能量  $E_0$  的关系:

$$\frac{N_m}{N_i} = \frac{2E_0}{\eta_e \cdot \beta \cdot \ln R} \quad (21)$$

将(16)式代入上式之中,得

$$\eta_e = 1 - \exp\left(\frac{2E_0}{\beta \ln R}\right) \quad (22)$$

最后求得:

$$\frac{N_m}{N_i} = \frac{2E_0}{\beta \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{2E_0}{\beta \ln R}\right)\right] \cdot \ln R} \quad (23)$$

所以 Q 开关 Nd:YAG 激光器设计的程序是,首先根据所要求获得的激光脉冲输出能量  $E_0$ , 合理选择器件参数  $\beta, L$  和  $R$ 。对 Nd:YAG 激光器而言,就是要合理选择晶体长度  $l'$ , 谐振腔长  $l$  以及谐振腔输出镜反射率。通过(23)式得出反转粒子数值  $N_m/N_i$ , 再由(21)式计算出相应的激光介质贮能  $E_s$ , 最后由(13)式估计所要求的泵浦能量  $E_i$ 。

#### 四、最佳输出反射率

由上节的分析中提到 Q 开关激光器的提取效率  $\eta_e$  为:

$$\eta_e = \frac{\ln \frac{1}{R} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{2E_0}{\beta \ln R}\right)\right]}{2L - \ln \frac{1}{R}} \quad (24)$$

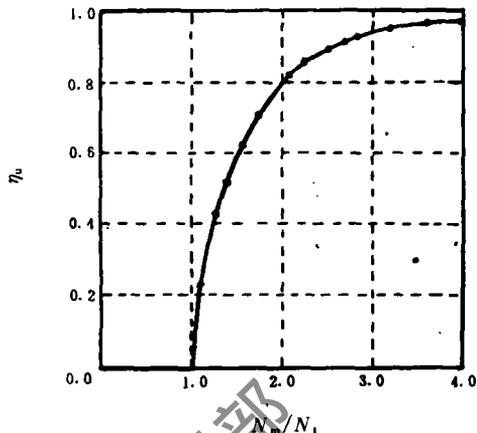


Fig. 3 Energy utilization efficiency  $\eta_e$  as a function of the factor  $N_m/N_i$ .

当激光器的泵浦系统确定之后,激光器的效率就取决于提取效率 $\eta_e$ 。为了最有效地利用泵浦所获得的贮能 $E_s$ ,提高器件效率,应当使 $\eta_e$ 达到极大值。对(24)式取导数,就求得使 $\eta_e$ 为极大值时,输出镜的反射率 $R_{opt}$ 满足的关系式:

$$\exp\left(-\frac{2E_0}{\beta \cdot \ln R_{opt}}\right) + \frac{2E_0}{\beta \cdot \ln R_{opt}} = \frac{E_0}{\beta L} + 1 \quad (25)$$

由(25)式可求出在输出能量为 $E_0$ 时所对应的输出镜最佳反射率 $R_{opt}$ 。图4就是根据(24)式给出Q开关Nd:YAG激光器在不同的输出能量下,提取效率 $\eta_e$ 随输出镜反射率 $R$ 而变化的曲线。由该图可见,在不同的输出能量 $E_0$ 下,最佳输出反射率 $R_{opt}$ 不同,当 $E_0$ 增加时, $R_{opt}$ 减少,图中虚线就是对应于不同输出能量的最佳反射率 $R_{opt}$ 值的连线。在实际最佳反射率 $R_{opt}$ 选择上,还要考虑腔内功率密度的大小,使之低于腔内光学元件的损伤阈值,以免损坏器件。

## 五、结 语

本文就调Q激光器的最佳输出能量效率进行了分析,所得到的公式和计算曲线是由Nd:YAG激光系统导出的。虽然理论模型上作了简化处理,但这种设计方法在低重复频率Q开关Nd:YAG激光器应用中取得了较好的结果。在这一方法指导下,我们研制的电光Q开关Nd:YAG激光器输出单脉冲能量达到350mJ,动态总效率达到1.2%。

对李俊书、于淑范、唐军及本所302组其他同志在实验工作中的协助表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Wagner W G, Lengyel B A. J A P, 1963, 34:2040~2046
- [2] Degnap J J. IEEE J Q E, 1989, QE-25(2):214~220
- [3] 杨齐民. 激光技术, 1991, 15(1):25~32
- [4] Koechner W. Solid-state laser engineering, New York, Springer-Verlag, 1988; Ch. 1, Ch. 2
- [5] 李一平, 古鸿仁, 王明秋 *et al.* 兵器激光, 1983, 7(3):13~18
- [6] Yariv A. Quantum Electronics. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975; Ch. 9

\* \* \*

· 作者简介:曹三松,男,1959年7月出生。副研究员。现从事激光器件与技术的研究工作。

· 收稿日期:1993年4月10日。

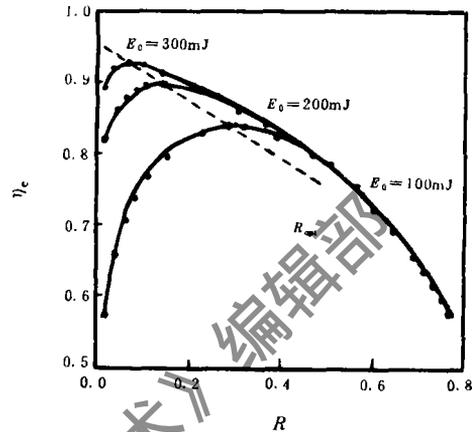


Fig. 4 Optimum R curves