

声光调 Q 激光器所需最小衍射效率的研究*

王 刚 李武军 王石语 蔡德芳 文建国 过 振

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘 要 以四能级系统为例,研究了在输出脉冲能量一定的情况下,声光调 Q 激光器所需要的最小衍射效率如何确定的问题.通过对调 Q 反转粒子数密度的求解,获得了调 Q 激光器输出的一定脉冲能量与腔内损耗、所需最小 Q 开关的衍射效率和输出镜的反射率等的关系公式.这一结果为声光调 Q 激光器 Q 开关衍射效率的设计提供了简便的估算方法.

关键词 衍射效率;脉冲能量;腔内损耗;反转粒子数密度

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

在调 Q 激光器中,单个脉冲的输出能量是由激光工作物质中积累的反转粒子数 Δn_i , 和 Q 开关无衍射时的阈值反转粒子数 Δn_t 共同决定的^[1]. 对于一个给定的腔, Δn_t 的值是恒定的, Δn_i 所允许达到的最大值主要由 Q 开关的衍射效率决定的^[2]. 衍射效率的值愈大, Δn_i 所允许达到的值也就越大. 因此,调 Q 激光器在确定的谐振腔中要得到一定的单脉冲能量, Q 开关所提供的衍射效率必须大于某一临界值,这个临界值是能使调 Q 正常工作的衍射效率的最小值. 实际应用中只需要选取略大于该值的衍射效率即可. 一般来讲, Q 开关提供的损耗越大,其设计和制作的难度也就越大,成本也越高^[3]. 所以采用该临界值设计衍射效率,有利于降低激光器的成本.

设计一个输出脉冲能量确定的激光器,其 Q 开关所需要的衍射效率的最小值,通常用数值解法求解速率方程获得,其过程比较复杂. 本文通过对谐振腔内损耗的分析,调 Q 最终反转粒子数密度解的近似,得到了脉冲能量和衍射效率以及腔的其它损耗的关系式,利用该关系式可以方便地确定调 Q 激光器 Q 开关所需要的最小损耗. 该方法所获得的结果和速率方程数值解法的结果非常接近.

1 公式推导

以一个输出脉冲能量为 E 声光调 Q 的 Nd : YAG 激光器为例进行分析,推导输出脉冲能量与衍射效率和腔内其它损耗的关系^[4].

四能级系统的速率方程如下

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \phi(t) \left(c\sigma_{21} \Delta n(t) \frac{L}{l} - \frac{\gamma(R_2, \eta)}{\tau_R} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt} = -\Delta n(t) \phi(t) \sigma_{21} c \quad (2)$$

式中 $\phi(t)$ 为腔内光子数密度, c 为光速, σ_{21} 为受激发射截面, $\Delta n(t)$ 为反转粒子数密度, $\tau_R = 2l/c$ 为往返时间, L, l 分别为工作物质长度和腔长, t 表示时间,腔内总损耗^[1]可以表示为 $\gamma(R_2, \eta) = -2\ln(1 - \gamma_0) - \ln R_1 R_2 - 2\ln(1 - \eta)$. 其中 R_2 为输出镜反射率, R_1 为另一腔镜反射率, η 为 Q 开关的衍射效率, γ_0 为腔内其他单程损耗百分比. 令式(1)中 $d\phi(t)/dt = 0$ 可以得到阈值反转粒子数密度

$$\Delta n(R_2, \eta) = \frac{\gamma(R_2, \eta)}{2L\sigma_{21}} \quad (3)$$

由式(3)得到激光器在 Q 开关无衍射时 ($\eta = 0$) 的阈值反转粒子数密度 Δn_t .

$$\Delta n_t = \frac{\gamma(R_2, 0)}{2L\sigma_{21}} = \frac{-2\ln(1 - \gamma_0) - \ln R_1 R_2}{2L\sigma_{21}} \quad (4)$$

和在 Q 开关有衍射时,阈值反转粒子数密度 ΔN_t

$$\Delta N_t = \frac{\gamma(R_2, \eta)}{2L\sigma_{21}} = \frac{-2\ln(1 - \gamma_0) - \ln R_1 R_2 - 2\ln(1 - \eta)}{2L\sigma_{21}} \quad (5)$$

取 η_0 为临界的衍射效率即是最小的衍射效率,则 ΔN_t 在衍射效率为 η_0 时最小

$$(\Delta N_t)_{\min} = \frac{\gamma(R_2, \eta_0)}{2L\sigma_{21}} = \frac{-2\ln(1 - \gamma_0) - \ln R_1 R_2 - 2\ln(1 - \eta_0)}{2L\sigma_{21}} \quad (6)$$

调 Q 激光器的输出脉冲的能量为^[5]

$$E = V(\Delta n_i - \Delta n_f) h\nu_L \beta \quad (7)$$

式中 Δn_i 为声光衍射关闭瞬间的反转粒子数密度. 为保证激光器在 Q 开关有衍射时无激光输出,要求 $\Delta N_t \geq \Delta n_i$, 即 $(\Delta N_t)_{\min} = \Delta n_i$. 所以令

$$\Delta n_i = (\Delta N_t)_{\min} = \frac{\gamma(R_2, \eta_0)}{2L\sigma_{21}} = \frac{-2\ln(1 - \gamma_0) - \ln R_1 R_2 - 2\ln(1 - \eta_0)}{2L\sigma_{21}} \quad (8)$$

* 国防重点实验室基金(编号:51456050104DZ0101)资助
Tel: 029-88202574 Email: wwgang@sohu.com
收稿日期: 2004-07-26

Δn_f 为脉冲输出结束时剩余反转粒子数密度, $h\nu_L$ 为输出激光的单个光子能量, V 为谐振腔内振荡光所占的体积, β 为输出镜的透射率与腔内往返损耗百分比之比

$$\beta = \frac{1-R_2}{2-R_1-R_2+2\gamma_0} \quad (9)$$

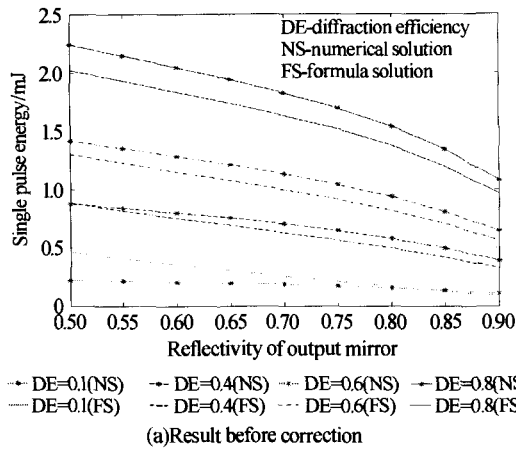
文献[5]中 $\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i} = \frac{-\ln R_1 - 2\ln(1-\gamma_0)}{2\Delta n_i \sigma_{21} L}$

即

$$\Delta n_f = \frac{-\ln R_1 - 2\ln(1-\gamma_0)}{2L\sigma_{21}} \quad (10)$$

把式(8),(9),(10)代入式(7)得到输出脉冲能量

$$E = V \frac{-2\ln(1-\eta_0) - \ln R_2}{2L\sigma_{21}}$$



$$\left(\frac{1-R_2}{2-R_1-R_2+2\gamma_0} \right) h\nu_L \quad (11)$$

利用式(1),(2)进行数值计算,由瞬时功率 $P(t) = h\nu_L V \ln(1/R_2) \phi(t) / \tau_R$ [5],得到输出的单脉冲能量[6]

$$E' = \int_0^T P(t) dt \quad (12)$$

式中 T 为一个脉冲周期.数值计算采用参数为: $L = 100$ mm,激光晶体中有效的增益长度为 2 mm.激光在输出镜上的光束半径为 0.25 mm, $R_1 = 0.99$, $\gamma_0 = 0.05$.数值模拟的结果和式(11)进行计算的结果如图 1(a),可以看出公式计算的结果和数值解法的结果差别较大,这是因为被代入式(11)中的 Δn_f 仅与

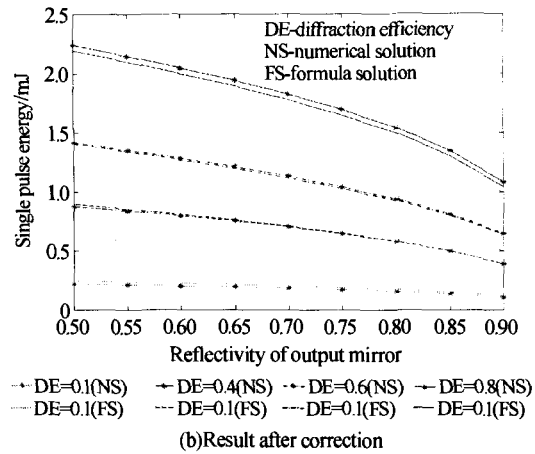


图 1 公式计算结果与数值解法结果的比较
Fig. 1 Comparison of formula result and numerical result

R_1, γ_0 有关,而与 R_2, η 无关.因此必须对 Δn_f 的结果进行修正.

2 进一步修正

从 $\Delta n_i - \Delta n_f = \Delta n_i \ln(\Delta n_i / \Delta n_f)$ [1] 中可知: $\Delta n_f(\Delta n_i, \Delta n_i)$ 是由 Δn_i 和 Δn_i 共同决定的.并且,当 $\Delta n_i / \Delta n_i$ 略小于 1 时, $\Delta n_f(\Delta n_i, \Delta n_i)$ 则略小于 Δn_i ; $\Delta n_i / \Delta n_i$ 远小于 1 时, $\Delta n_f(\Delta n_i, \Delta n_i)$ 也远小于 Δn_i .依据数值计算的结果对 Δn_f 进一步修正,得到

$$\Delta n_f(\Delta n_i, \Delta n_i) = \Delta n_i \frac{\Delta n_i}{\Delta n_i} + \frac{\Delta n_f - \Delta n_i}{2} \left(1 - \frac{\Delta n_i}{\Delta n_i} \right) \quad (13)$$

把式(4),(8),(10)代入式(13),得到

$$\Delta n_f(\Delta n_i, \Delta n_i) = \frac{\ln R_2}{4L\sigma_{21}} - \frac{\ln[R_1 R_2 (1-\gamma_0)^2]}{\ln[(1-\gamma_0)^2 R_1 R_2 (1-\eta_0)^2]} \frac{\ln[(1-\gamma_0)^4 R_1^2 R_2^2]}{4L\sigma_{21}} \quad (14)$$

把式(8),(9),(14)代入式(7)得到的输出脉冲能量

$$E = \left\{ \frac{\ln[R_1 R_2 (1-\gamma_0)^2] \ln[(1-\gamma_0)^4 R_1^2 R_2^2]}{4L\sigma_{21} \ln[(1-\gamma_0)^2 R_1 R_2 (1-\eta_0)^2]} - \frac{\ln[R_1^2 R_2^2 (1-\eta_0)^4 (1-\gamma_0)^4]}{4L\sigma_{21}} \right\} \frac{1-R_2}{2-R_1-R_2+2\gamma_0} h\nu_L V \quad (15)$$

用式(15)进行计算得到的结果与数值解法的结果比较如图 1(b),可以看出在本文给出的近似下,公式计算的结果与数值计算的结果对于中小功率激光器的差异小于 3%.

式(15)计算的结果如图 2.在一定的 Q 开关衍射效率下,采用高透射率的输出镜,能够输出更高的脉冲能量.

通常激光器的腔镜 R_1 都用全反镜,并且腔内的损耗也非常小,可令 $R_1 = 1, \gamma_0 = 0$ 得到简化的实用形式

$$E = V \left[\frac{\ln R_2 \ln R_2^3}{4L\sigma_{21} \ln(R_2 (1-\eta_0)^2)} - \frac{\ln(R_2^3 (1-\eta_0)^4)}{4L\sigma_{21}} \right] \cdot \frac{1-R_2}{2-R_1-R_2+2\gamma_0} h\nu_L \quad (16)$$

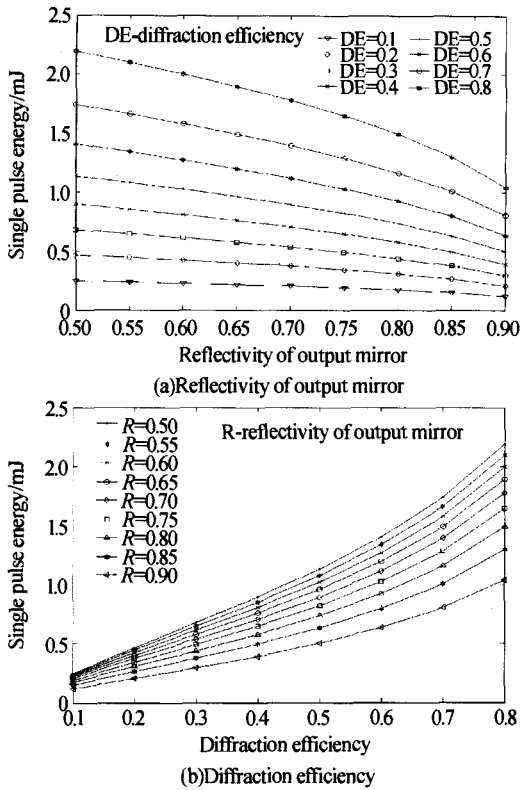


图 2 修正公式的输出脉冲能量与输出镜反射率和衍射效率的关系

Fig. 2 Relationship between pulse energy and diffraction efficiency and reflectivity of output mirror from the corrected formula

3 结论

本文以声光调 Q 的 Nd : YAG 激光器为例进

行分析,通过对脉冲输出后剩余的反转粒子数的近似,得出了调 Q 激光器能够输出的最大脉冲能量与输出镜反射率和 Q 开关的衍射效率的关系式.并与数值计算的结果进行比较,两者符合得比较好.利用这一结果,进行简单的计算,便可以得到设计输出一定脉冲能量的中小功率声光调 Q 激光器所必需的最小的衍射损耗.

参考文献

- 1 Walter Keochner. Solid-state Laser Engineering. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 469~479, 501~507
- 2 王石语,过振,文建国,等.连续激光二极管抽运的调 Q 高重复率 Nd : YAG 激光器研究.光学学报,2000,20(11):1467~1472
Wang S Y, Guo Z, Wen J G, et al. Acta Optica Sinica, 2000,20(11):1467~1472
- 3 巨养峰,阮双琛,龙井华.连续端泵浦激光晶体长度的确定.光子学报,2002,31(7):894~896
Ju Y F, Ruan S C, Long J H. Acta Photonica Sinica, 2002,31(7):894~896
- 4 Wang Shiyu, Guo Zheng, Fu Junmei, et al. A diode pumped solid-state laser with low thermal noise. Acta Photonica Sinica, 2003,32(8):904~906
- 5 Degnan J J. Theory of optimally coupled Q-switched laser. IEEE J Quantum Electron, 1989,25(5):214~220
- 6 任承,张行愚,王青圃,等.调 Q 激光器速率方程的普适表达式.光电子·激光,2002,13(3):294~296
Ren C, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Optoelectronics · Laser, 2002,13(3):294~296

Study on the Necessary Minimum Diffraction Efficiency of Acoustooptical Q-switched Laser

Wang Gang, Li Wujun, Wang Shiyu, Cai Defang, Wen Jianguo, Guo Zhen

School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2004-07-26

Abstract A four-level system is analyzed as an example, and the necessary minimum diffraction efficiency of acoustooptical Q-switched laser in a certain output pulse energy is studied. Through solving the population inversion density, the relationship between a certain output pulse energy and cavity loss, the necessary minimum diffraction efficiency of Q-switch, the reflectivity of output mirror and so on, are acquired. The result can be used to design the diffraction efficiency of acoustooptical Q-switched laser.

Keywords Diffraction efficiency; Pulse energy; Cavity loss; Population inversion density

Wang Gang a graduate student, was born in 1979 in Henan Province. He received his B. S. degree in photoelectronics from Zhengzhou University. His major is Q-switch of diode pumped solid-state lasers.

