

文章编号: 1007-5461(2003)02-0246-04

高重复频率被动调 Q 激光器的教学实验研究

周海, 陈殊殊, 朱长虹, 李正佳

(华中科技大学激光研究院, 武汉 430074)

摘 要 将“高重复率被动调 Q 激光器”引入激光实验教学中, 并针对存在激发态吸收 (ESA) 的被动式调 Q 激光器, 采用绝热近似 (AEA) 和微分方程的 Hopf 分岔理论对实验现象进行了理论分析, 对实验结果进行了解释. 本实验受到了学生的欢迎, 获得了满意的教学效果.

关键词 教学实验; 被动式调 Q; 绝热近似

中图分类号: TN248.1⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

Cr⁴⁺:YAG 晶体饱和吸收 Q 开关由于具有以高重复频率输出脉冲激光等优点, 近年来已获得广泛的应用^[1]. 为了使学生了解最新的激光器件与技术的发展, 将“高重复率被动调 Q 激光器”引入激光实验教学中, 受到学生的欢迎, 获得了满意的教学效果.

首先针对存在激发态吸收 (ESA) 的被动式调 Q 激光器, 采用绝热近似条件, 建立了包含 ESA 的单模激光被动调 Q 速率方程组, 理论上得出了激光脉冲周期的解析表达式. 实验表明: 其脉冲重复频率与外界泵浦强度呈明显的相关性, 泵浦强度越强, 脉冲重复频率越高^[2,3]. 理论推导与实验结果吻合.

2 实验设置

2.1 实验目的

开设本实验的目的是使学生: a) 掌握调 Q 激光器的调试方法和参数测试; b) 运用所学的理论知识, 分析调 Q 激光的工作状态; c) 通过实验加深对 Q 突变理论的认识和理解.

2.2 实验装置

实验装置如图 1. 其中: 1) 为谐振腔反射镜, 反射率为 99.8%; 2) 为 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率 T_0

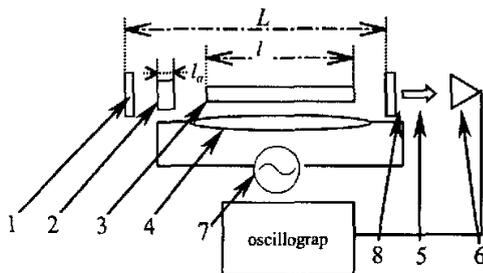


Fig.1 The cw Nd:YAG laser with passive Q-switch using Cr⁴⁺:YAG crystal

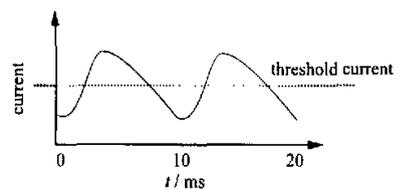


Fig.2 The waveform of pump current

收稿日期: 2002-10-08; 修改日期: 2002-11-19

为 70%；3) 为 Nd:YAG 晶体 ($\phi 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)；4) 为氦灯 ($\phi 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)；5) 为激光输出；6) 为光电二极管；7) 为连续激光电源；8) 为谐振腔反射镜，反射率为 90%。

2.3 实验现象

图 2 为激光电源泵浦电流波形示意图，为周期 10 ms 的脉冲序列。

图 3 为分别在 10A、12A 和 14A 的泵浦电流作用下，激光器的激光输出波形。从图 3 可以看出：a) 激光输出的峰值功率基本上不随泵浦电流强度变化；b) 激光输出的脉冲个数随泵浦电流强度的增加而增加；c) 当泵浦电流处于阈值以下的时候，激光器没有输出，只有泵浦电流高于阈值时才由激光输出，所以激光成“簇”输出，“簇”与“簇”之间的间隔为 10 ms，与泵浦电流的周期相同；d) 随着泵浦电流强度的增加，激光输出的脉冲重复频率也随之增加；e) 在每一“簇”激光输出中，前部的脉冲间隔要比后部的小。

可以发现，重复频率与外界泵浦强度呈明显的相关性，泵浦强度越强，脉冲重复频率越高。因此，从理论上分析重复频率与外界泵浦强度的关系就成为解释这一现象的关键，在理论上解释这一现象，不仅可以加深学生对激光基础理论和自饱和调 Q 理论的理解，还能够培养学生的分析、解决科研工作中实际问题的能力。

3 理论分析

Nd:YAG 激光器属于 B 类激光器，其横向弛豫时间 $\tau_l \ll$ 腔内光子寿命 τ_c 和纵向弛豫时间 τ_u ，采用绝热近似 AEA^[4]，有两个速率方程就可给出令人满意的描述。但对于被动调 Q 激光器，必须建立饱和吸收介质的速率方程。考虑到 Cr^{3+} :YAG 饱和吸收晶体的激发态吸收 (ESA) 的准四能级模型，对于调 Q 状态，可以忽略 3, 4 能级的粒子数，认为饱和吸收粒子主要集中在 1, 2 能级^[5]。这样，可以采用文献 [7] 提供的 Statz-De Mars 速率方程组来描述光强 I 、反转粒子数 Δn 以及共振吸收系数 χ_a 随时间的变化。

$$dI/dt = (\mu\nu\sigma\Delta n - \mu\nu l_a \chi_a / l - 1/\tau_c)I, \tag{1a}$$

$$d\Delta n/dt = -\beta\sigma\Delta n I / (h\nu) + (\Delta n_i - \Delta n) / \tau_u, \tag{1b}$$

$$d\chi_a/dt = -2\sigma_a \chi_a I / (h\nu) + (\chi_{a0} - \chi_a) / \tau_a. \tag{1c}$$

如果我们令 (1c) 式的左端为零，则可以求出定态饱和和共振吸收系数：

$$\chi_a(I) = \chi_{a0} / \{1 + I / [h\nu / (2\sigma_g \tau_g) + \sigma_e I / (2\sigma_g)]\}. \tag{2}$$

考虑方程组 (1) 式的稳定性，由文献 [12] 给出系统的静态阈值为

$$\Delta n_{tm} = \chi_{a0} l_a / (l\sigma) + 1 / (\mu\nu\tau_c\sigma). \tag{3}$$

对于被动调 Q 激光器，除了要求激活介质的上能级弛豫时间较长，以便获得足够多的反转粒子数积累之外，还要求饱和吸收体的上能级弛豫时间较短，以便得到足够快的开关时间，获得好的调 Q 效果，一

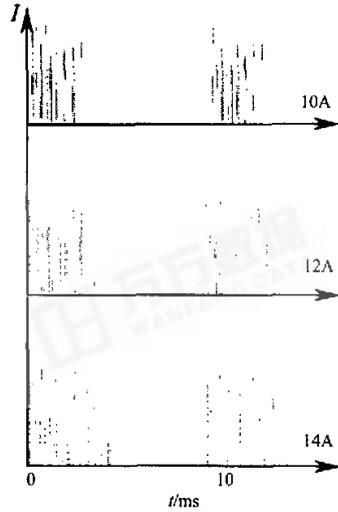


Fig.3 The output waveform of the laser in different pump current

般要求 τ_g 比 τ_u 至少小两个数量级, 即有 $\tau_g \ll \tau_u$ 成立. 因此, 与 τ_g 相关的共振吸收系数 χ_a 为快弛豫参量, 其动力学性能“绝热”地跟随光强变化, 可对 (1c) 式采用 AEA^[9], 将其定态形式 (2) 式代入 (1) 式, 得出反映光强和反转粒子数密度变化的二维自治系统的耦合速率方程组:

$$dI/dt = [\mu\nu\sigma\Delta n - \mu\nu l_a \chi_{a0}(I)^{-1} / \{1 + I[I_{b0} + \sigma_e I / (2\sigma_g)]^{-1}\} - 1/\tau_c]I, \quad (4a)$$

$$d\Delta n/dt = -\beta\sigma\Delta n I / (h\nu) + (\Delta n_i - \Delta n) / \tau_u, \quad (4b)$$

式中, μ 为填充因子, l, l_a 和 n, n_a 分别为激活介质与饱和吸收体的几何长度和折射率, L 为光强的几何长度. ν 为介质中的光速, β 因子取 1 或 2 与激光下能级寿命和 Q 脉冲宽度有关, τ_c 为腔内光子寿命, σ 为激活介质的受激跃迁截面, τ_u 与 τ_a 分别为激活粒子与饱和吸收粒子上能级的纵向弛豫时间, Δn_i 为泵浦作用下的反转粒子数密度, τ 为激活粒子的上能级自发辐射寿命, $\chi_a = \sigma_g(n_{a1} - n_{a2})$ 为单位长度上的共振吸收系数, I 为腔内激光的空间平均光强, $\chi_{a0} = \sigma_g n_{a0}$ 为饱和吸收体的 (初始) 小信号吸收系数, σ_g 为饱和吸收体基态受激吸收截面, σ_e 为激发态吸收截面, τ_g 为饱和吸收体能级 2 的自发辐射寿命, W_p 为泵浦作用下的受激跃迁几率, $\tau_u = \tau / (1 + W_p \tau)$, $\tau_a = \tau_g / [1 + \sigma_e I \tau_g / (h\nu)]^{[12]}$.

考虑方程组 (4) 式的 Hopf 分岔条件, 当满足条件 (5) 时, 系统将在定态点 (平衡点) $(I_2, \Delta n_{tm})$ 失稳, 而产生周期性的振荡, 数学上对应为在相平面 $(I, \Delta n)$ 上产生极限环, 物理上即为周期性的 Q 脉冲输出.

$$0 < T_0 < \exp[-II_{b0} / (\mu\nu I_s \tau_u)], \quad (5a)$$

$$\sigma\Delta n_{tm} > (B_0 + 1)^2 / (\mu\nu\tau_u B_0), \quad (5b)$$

式中, $I_s = h\nu / (\beta\sigma\tau_u)$, $B_0 = [\mu\nu l_a l^{-1} I_s I_{b0}^{-1} \chi_{a0} \tau_u - 1]^{-1}$. 频率 $f(B)$ 为:

$$f(B) = 1 / (2\pi\tau_u) \sqrt{\mu\nu\sigma\Delta n_{tm}\tau_u B - 1/4[B(1 + \mu\nu l_a l^{-1} \chi_{a0} I_{b0}^{-1} \tau_u) + 1]^2}, \quad (6)$$

$$B = \Delta n_i / \Delta n_{tm} - 1. \quad (7)$$

4 讨论

从 (6) 式可以看出, 脉冲重复频率 $f(B)$ 与 Δn_i 正相关, 而根据文献 [14] 可以发现其实验数据与 (6) 式吻合.

针对我们的实验, 因为激光电源的输出有很大的纹波成分, 所以当泵浦电流低于阈值电流时, $\Delta n_i < \Delta n_{tm}$, 激光器没有输出; 当泵浦电流大于阈值电流时, $\Delta n_i > \Delta n_{tm}$, 才会有激光输出, 因此激光器的输出时成“簇”输出的. 随着泵浦电流的增加, B 会随着增加, 由以上分析可以知道, f 会随着 B 的增加而增加, 因此, 随着泵浦电流的增加, 激光脉冲重复频率也会随之增加. 又因为泵浦电流波形的特点, 在每一“簇”激光输出期间, 泵浦电流前部的电流强度高于后部的电流强度, 因为 f 与 B 有近似的正比关系, 所以, 可以发现在每一“簇”激光输出中, 前部的脉冲间隔要比后部的小.

以上的分析在一定的范围内确定了 Q 脉冲周期与各参量之间的关系, 给出了“多脉冲”现象定量的解释和脉冲周期的解析表达式, 使学生加深了对“自饱和调 Q 激光器”理论的理解, 而且对这类激光器主要组成部分的参数及它们之间的关系有一定的了解, 受到学生的欢迎, 获得了满意的教学效果.

参 考 文 献

- 1 丁育明等. Cr⁴⁺: YAG 被动 Q 开关的 Nd: YAG 激光器 [J]. 激光杂志, 1997, 18 (6): 1
- 2 Eicher H J, Haose A, Kokta M R *et al.* Cr⁴⁺: YAG as passive Q-switch for a Nd: YALO oscillator with an average repetition rate of 2.7 kHz, TEM₀₀ mode and 13 W output [J]. *Appl Phys*, 1994, B58 (5): 409
- 3 朱长虹, 李正佳, 刘安平等. 激光与红外 [J]. 1993, 23 (5): 42
- 4 李福利. 高等激光物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992: 85
- 5 王加贤, 张文珍, 王清月等. Cr⁴⁺: YAG 在对撞脉冲锁模的 Nd: YAG 激光器中实现被动锁模的研究 [J]. 光学学报, 1998, 18 (8): 984
- 6 欧阳斌, 丁彦华, 万少珂等. Cr⁴⁺: YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究 [J]. 光学学报, 1996, 16 (12): 1666
- 7 Tarasov L V. *Laser Physics* [M]. Moscow: MIR, 1983: 287
- 8 陆启韶. 分岔与奇异性 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1995: 109
- 9 Narducci L M, Abrabarm N B. *Laser Physics and Laser Instabilities* [M]. Singapore: World Scientific, 1998: 268
- 10 丁彦华, 欧阳斌, 徐军等. 连续 Nd: YAG 激光器中 Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高 [J]. 中国激光, 1997: A24 (3): 197
- 11 Verdeyen J T. *Laser Electronics* [M]. (2nd Edition), New Jersey: Prentice Hall, 1989: 318
- 12 朱长虹等. 被动调 Q 激光脉冲周期的研究 [J]. 激光技术, 2000, 24 (2): 85
- 13 朱长虹等. Theoretical and experimental researches on repetition rate of pulses with passive or self-Q-switched laser [J]. 光电子·激光, 2001, 12 (8): 803
- 14 Shimony Y, *et al.* Repetitive Q-switching of a CW Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers [J]. *IEEE. J. Quantum Electron*, 1996, 32 (2): 18

Teaching and Experimental Researches on High Repetition Rate Passive Q-switched Laser

Zhou Hai, Chen Shushu, Zhu Changhong, Li Zhengjia

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074 China)

Abstract Application of high repetition rate passive Q-switched laser to teaching and experiment is described. For passive Q-switched laser including excited state absorption (ESA), analytical solution for repetitive frequency is obtained by means of the adiabatic elimination approximation (AEA) and the Hopf bifurcation condition. The calculated results accord with the experiment. This experiment is enjoyed by students.

Key words experiment; passive Q-switching; adiabatic elimination approximation(AEA)

周 海 (1973 -), 华中科技大学激光研究院讲师, 从事固体激光教学与研究工。