

连续 Nd·YAG 激光器中 Cr⁴⁺·YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高*

丁彦华 欧阳斌 徐 军 万小珂 林礼煌 邓佩珍
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 Cr⁴⁺·YAG 用于连续 Nd·YAG 激光器被动调 Q, 激光横模结构和纵模结构以及激光泵浦速率起伏等是引起调 Q 不稳定的重要因素, 运用一定的技术可以使调 Q 稳定性得到根本性改善; 此外应考虑 Cr⁴⁺·YAG 热效应及光学薄膜的激光损伤。

关键词 Cr⁴⁺·YAG, 被动调 Q 稳定性, 热稳预补偿, 自锁模亚脉冲

1 引 言

掺四价铬的钇铝石榴石(Cr⁴⁺·YAG)是一种近来引起广泛研究兴趣的新光学晶体。它可以作为 1.34~ 1.58 μm 波长范围内可调谐的激光晶体^[1], 具有与 Ti·Al₂O₃ 相近的激光参数(如上能级寿命、辐射截面), 可以采用克尔透镜自锁模方法获得飞秒超短光脉冲^[2]。同时, Cr⁴⁺·YAG 也是 0.9~ 1.2 μm 范围的可饱和吸收体, 可用作这一波长范围内激光器的被动调 Q 元件^[3]。Cr⁴⁺·YAG 具有饱和光强小, 热导性好等特点, 因而很适合于高功率连续或高重复率激光器被动调 Q^[4]。相对于连续激光器的其它调 Q 方法, 尤其是各种主动式调 Q 方法而言, Cr⁴⁺·YAG 调 Q 具有结构简单、不需要外加驱动电源装置、价格便宜、使用方便等特点, 可以做到“即插即用”(plug & play)。另外, 由于 Cr⁴⁺·YAG 可以有较高的掺杂浓度, Cr⁴⁺·YAG Q 开关尺寸很小(厚度可以小于 1 mm), 这很有利于小型化固体化激光器的调 Q, 比如半导体激光泵浦的固体激光器调 Q^[5] 和微片激光器调 Q^[6] 等。这种小型激光器的短腔长(可达 mm 量级)又有利于降低调 Q 脉冲的脉宽(可得到 ps 脉冲^[7])。然而一般而言, 连续激光器被动调 Q 输出的稳定性较差。但是根据本文的研究, 采用若干措施, 被动调 Q 输出的稳定性可以得到根本性的改善。作者用 Cr⁴⁺·YAG 对连续 Nd·YAG 激光器进行调 Q, 得到了脉冲波形光滑, 脉冲幅度、宽度及脉冲间隔稳定的调 Q 脉冲序列输出。

2 调 Q 输出稳定性的提高

本研究中所采用的基本实验装置相当简单, 如图 1 所示, 只是在普通连续 Nd·YAG 激光器谐振腔中插入用于调 Q 的可饱和吸收体 Cr⁴⁺·YAG 晶体薄片, 用 PIN 管和存储示波器探

* 国家自然科学基金和国家攀登计划资助课题。

收稿日期: 1996—03—19; 收到修改稿日期: 1996—05—02

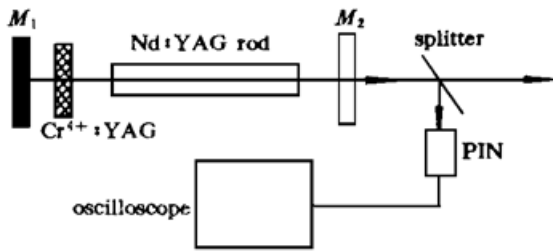


图 1 用 Cr^{3+} :YAG 对连续 Nd:YAG 激光器
被动调 Q

Fig. 1 Passive Q -switching of a cw Nd:YAG
laser using Cr^{3+} :YAG crystal

测激光输出波形。Nd:YAG 激光棒长为 108 mm, 直径为 5 mm, 用连续氪灯泵浦。 Cr^{3+} :YAG 晶片按 [111] 方向切割, 厚度为 1 mm, 两通光面镀有 $1.064 \mu\text{m}$ 波长的增透膜。 Cr^{3+} :YAG 晶片的小信号透过率为 92%。 M_1 是对 $1.064 \mu\text{m}$ 波长的全反射镜, M_2 对 $1.064 \mu\text{m}$ 波长反射率为 96%, M_1 和 M_2 均为平面镜。激光器腔长为 0.48 m。

2.1 激光器横模结构对调 Q 稳定性的影响

由于 Nd:YAG 激光器增益较高, 如果不采用相应技术抑制高阶横模, 就会很容易出现多模振荡。由于模式间的竞争, 各个横模的强度此起彼伏, 随机变化。各横模振荡在时域和空域上不相干交叠, 虽然激光输出平均功率没有太大的起伏, 但是调 Q 输出的脉冲序列显得杂乱无章。图 2(a) 所示是多横模振荡情况下 Cr^{3+} :YAG 调 Q 脉冲序列, 调 Q 频率为 7.3 kHz。可以看出, 脉冲间隔和幅度显得十分混乱。图 2(b) 所示是这种情况下的“单脉冲”波形, 其形状极不规则, 且时刻变化。这样的一个脉冲实际上是多个横模脉冲的叠加。

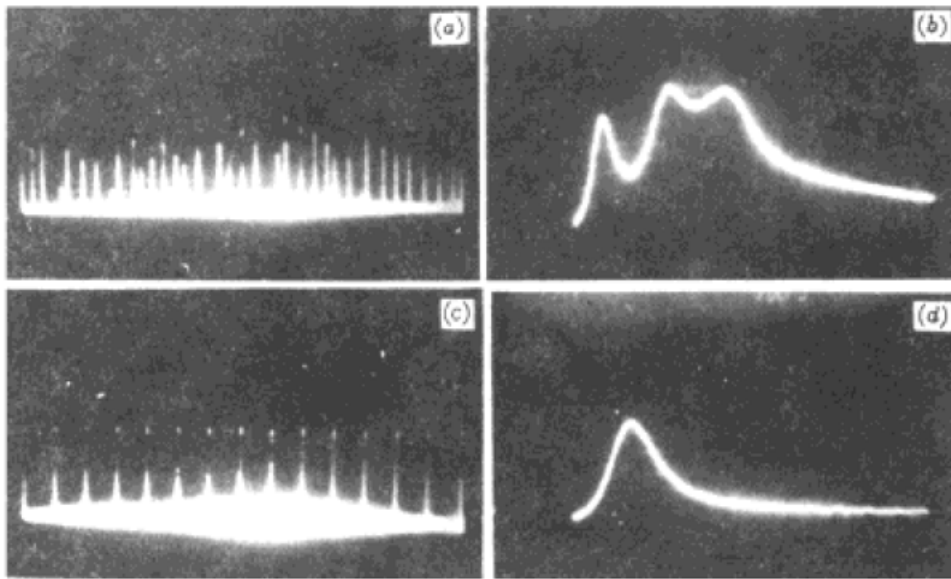


图 2 连续 Nd:YAG 激光器被动调 Q 输出波形

(a) 多横模振荡时的脉冲序列, 水平坐标 $500 \mu\text{s}/\text{div}$; (b) 多横模振荡时的单脉冲波形, 水平坐标 $500 \text{ns}/\text{div}$; (c) 单横模 (TEM_{00}) 振荡时的脉冲序列, 水平坐标 $500 \mu\text{s}/\text{div}$; (d) 单横模 (TEM_{00}) 振荡时的单脉冲波形, 水平坐标 $200 \text{ns}/\text{div}$

Fig. 2 Output waveform of the passively Q -switched cw Nd:YAG laser

(a) pulse train of the multiple transversal mode laser, horizontally $500 \mu\text{s}/\text{div}$; (b) pulse profile of the multiple transversal mode laser, horizontally $500 \text{ns}/\text{div}$; (c) pulse train of the single transversal mode (TEM_{00}) laser, horizontally $500 \mu\text{s}/\text{div}$; (d) pulse profile of the single transversal mode (TEM_{00}) laser, horizontally $200 \text{ns}/\text{div}$

在谐振腔中放一个光阑抑制高阶横模振荡, 使得只剩下 TEM_{00} 模和 TEM_{01} 模振荡。由于这两个模的强度分布在空间上正好互补, 它们因为消耗共同的激光上能级粒子而产生的模式间耦合较小, 模式竞争较弱, 所以这两个模可以比较稳定地同时振荡。图 3 所示是只有 TEM_{00} 模和 TEM_{01} 模同时振荡时的调 Q 脉冲序列, 它由两套稳定的脉冲序列交错而成。

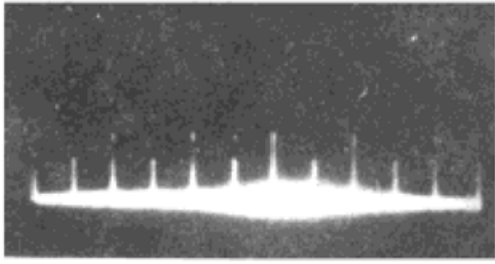


图 3 TEM₀₀和 TEM₀₁两模同时振荡时的两套脉冲序列

Fig. 3 Two sets of pulse trains when both TEM₀₀ and TEM₀₁ modes are oscillating, horizontally 500 μs/div

进一步缩小光阑孔径,使得只剩下 TEM₀₀模振荡,则调 Q 输出的脉冲序列如图 2(c) 所示。图 2(c) 所示的调 Q 脉冲序列基本上是等幅度、等间隔的,调 Q 频率为 2.8 kHz。图 2(d) 是其中的单脉冲波形,呈光滑的钟形。对比选单横模前后的调 Q 输出波形可以看出,采用选模技术后,调 Q 输出的脉冲幅度与间隔的稳定性以及脉冲波形均得到了根本性的改善。

在 Zayhowski 等人报道的半导体激光泵浦的被动调 Q 微片激光器研究中^[7],当激光器以低频率运转时,脉冲幅度和间隔抖动小于 0.5%,但是脉冲频率高于 10 kHz 时,脉冲序列中强脉冲和弱脉冲交替出现;在更高的重复频率(泵浦功率增大)下,脉冲序列会分为三套或更多套;在高于 70 kHz 的重复频率,会出现脉冲幅度包络,但是包络没有明显的周期性;虽然随着频率的增加,脉冲幅度变化数目越来越多,但这一趋势并非总是如此,它与泵浦条件紧密相关。在此报道中,Zayhowski 等没有分析高泵浦功率下脉冲抖动产生的原因。根据这一节的研究,当半导体激光泵浦功率较低时,即重复频率较低时,激光以 TEM₀₀模振荡,输出脉冲序列稳定,随着泵浦功率的提高,激光横模数增加,从而输出脉冲序列出现两套、三套或更多套;当模式竞争的影响较大时,脉冲序列就会变得不规则;由于半导体激光泵浦的微片激光器固有的稳定性,所以能够实现三个或更多横模的较稳定的同时振荡。

2.2 纵模结构对调 Q 稳定性的影响

实验发现当泵浦功率较高时,可以有超过 50% 的调 Q 脉冲不再如图 2(d) 所示那样光滑,而是如图 4 所示出现部分调制。这种脉冲波形调制深度一般低于 50%,很不完全。包络中的小脉冲间隔相应于两倍激光腔光学长度,约为 3.8 ns,其宽度约为 1.9 ns。

樊立明等人曾分析了脉冲式 Nd·YAG 激光器中类似的脉冲调制现象^[8],认为这是 Nd·YAG 激光晶体自相位调制引起的自锁模,并发现激光器谐振腔内加入 F-P 标准具会产生更强的自锁模,因为 F-P 标准具减少了振荡的纵模数,所以更容易实现锁定。根据这种分析,用 Cr⁴⁺·YAG 调 Q 的连续 Nd·YAG 激光脉冲峰值功率较高时,Nd·YAG 激光晶体的自相位调制也是存在的。

由于自锁模是以一定的概率出现的,调制波形重复性很差,所以它会影响被动调 Q 的稳定性,应该予以避免。根据以上的分析和所述的实验现象,谐振腔内应该尽量减少具有抑制部分纵模作用的平行平板结构,宜用劈形元件代替或者对平行平板结构的各通光面镀激光波长的增透膜。从以上分析也可以看出,Cr⁴⁺·YAG 晶片两通光表面镀 1.06 μm 的增透膜不仅可以减少损耗,降低激光阈值,还可防止在较低功率下也出现图 4 所示的亚脉冲结构。

2.3 泵浦速率起伏等对输出稳定性的影响

为了考察泵浦速率起伏对输出稳定性的影响,从实验上研究了调 Q 脉冲幅度和频率以及

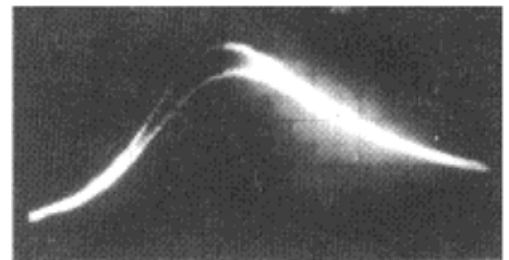


图 4 调 Q 脉冲自调制,水平坐标 50 ns/div
Fig. 4 Self-modulation of the Q-switched pulse, horizontally 50 ns/div

激光输出平均功率随氦灯电流的变化情况, 测量结果如图 5 所示。图中电流变化范围是从 12.8 A 到 14.0 A。曲线 A 是频率的变化情况, 它随电流的增加而迅速地从 3.0 kHz 上升到 6.7 kHz。曲线 B 是脉冲峰值的变化情况, 除了部分区域外, 它随电流的变化也非常大。由此可见, 泵浦灯电流的起伏将会急剧地影响调 Q 输出的频率和脉冲峰值稳定性。在基模运转的连续 Nd·YAG 激光器中, 这种影响往往是主要的。曲线 C 是激光平均功率的变化情况, 它的稳定性也主要决定于激光泵浦电流稳定性。实验中激光器电源电流稳定度为 1%。测量得到单 TEM₀₀ 模振荡时调 Q 脉冲序列的幅度和频率起伏在 3~ 5% 以内。

事实上其它可以引起激光振荡不稳定的因素, 如激光器机械结构的振动, 激光棒与 Cr⁴⁺·YAG 晶片受热不均匀及温度涨落等也会引起输出的起伏。

2.4 调 Q 脉冲的宽度

实验发现, 对于确定的 Nd·YAG 激光器(腔长和损耗一定)与 Cr⁴⁺·YAG 调 Q 晶体(初始透过率一定), 只要输出脉冲波形光滑, 则其宽度将很稳定, 它不随泵浦电流而变化。其原因有待分析与研究。图 2(d) 所示调 Q 脉冲半宽度约为 0.3 μs。

3 调 Q 输出功率的提高

实验发现, 由于 Cr⁴⁺·YAG 晶体对 1.06 μm 激光吸收很强, 提高激光功率会使 Cr⁴⁺·YAG 温度迅速上升, 反而导致调 Q 输出激光功率在数秒钟之内出现显著下降。不过 YAG 晶体具有很好的热导性, 使得 Cr⁴⁺·YAG 容易冷却。在一个铜块上钻一个适当大小的孔, 以此作为选择单横模(TEM₀₀)的光阑, 然后将用于调 Q 的 Cr⁴⁺·YAG 晶片贴在铜块上便能获得很好的冷却效果。如果进一步提高激光功率, Cr⁴⁺·YAG 晶片会产生与 Nd·YAG 激光棒类似的热透镜效应, 从而会使激光谐振腔结构发生变化, 有可能会使原来的热稳腔变得不再稳定。为此应该测量 Cr⁴⁺·YAG 晶片和 Nd·YAG 激光棒的热透镜焦距, 重新设计腔结构, 设计时预先考虑 Cr⁴⁺·YAG 晶片的热透镜作用。

作者在此还不能给出上述热稳预补偿的实验结果。因为这种调 Q 输出脉冲峰值功率和重复频率都较高, 只要激光功率超过 1 W, 在短时间内就会损伤激光腔镜光学薄膜, 故只能作粗略的实验。另外, 当激光功率太高时, 调 Q 输出脉冲会包含图 4 所示的自锁模亚脉冲。

4 结论与讨论

Cr⁴⁺·YAG 适合于 0.9~ 1.2 μm 波长范围内的高功率连续或高重复频率激光器的被动调 Q, 尤其适合于小型化固体化激光器调 Q。但是其稳定性一般较差。多横模竞争以及能引

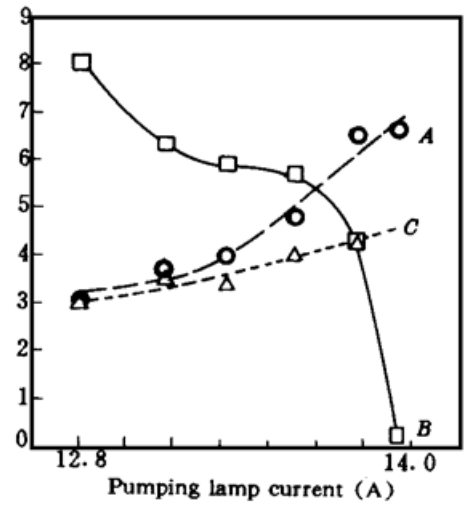


图 5 调 Q 输出随泵浦灯电流变化关系
 重复频率(1 kHz/div); B: 脉冲峰值功率(相对单位);
 C: 平均输出功率(0.1 W/div)

Fig. 5 Output characteristics as a function of the pumping lamp current
 : repetition rate (1 kHz/div); B: pulse peak power (arbitrary units); C: average power (0.1 W/div)

起激光振荡不稳定的其它因素会影响调 Q 输出的稳定性, Nd·YAG 激光晶体的自相位调制所引起的自锁模过程也会影响调 Q 输出的稳定性。采用一定的技术可以得到稳定的高功率调 Q 输出。将 Cr⁴⁺·YAG 用于连续 Nd·YAG 激光器被动调 Q 得到了频率和脉冲峰值稳定度优于 5%, 脉冲波形光滑的 TEM₀₀ 单基模脉冲序列输出, 输出功率因受到激光腔镜光学薄膜损伤的限制而未能得到很大的提高。

参 考 文 献

- 1 N. I. Borodin, V. A. Zhitnyuk, A. G. Okhrimchuk *et al.*. Oscillation of a Y₃Al₅O₁₂·Cr⁴⁺ laser in wave length region of 1.3~ 1.6 μm. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Fizicheskaya*, 1990, **54**(8) : 1500 ~ 1506
- 2 P. J. Conlon, Y. P. Tong, P. M. French *et al.*. Passive mode locking and dispersion measurement of a sub-100-fs Cr⁴⁺·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18) : 1468~ 1470
- 3 Yehoshua Shimony, Yehoshua Kalisky, Bruce H. T. Chai. Quantitative studies of Cr⁴⁺·YAG as a saturable absorber for Nd·YAG laser. *Opt. Material*, 1995, **4** : 547~ 551
- 4 H. J. Eichler, A. Haase, M. R. Kokta *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. *Appl. Phys. B*, 1994, **58** : 409~ 411
- 5 J. Bartschke, I. V. Klimov, K.-J. Boller *et al.*. Passive Q-switching of diode end-pumped Nd³⁺·GdVO₄ and Nd³⁺·YAG lasers by using Cr⁴⁺·YAG and Cr⁴⁺·YSGG as saturable absorbers. CLEO '95, 1995, Vol. 15, 1995 Technical Digest Series Conference Edition, Optical Society of America, Washington DC, CTu165, p. 126
- 6 J. J. Zayhowski, J. Ochoa, C. Dill III. UV generation with passively Q-switched picosecond microchip lasers. CLEO '95, 1995, Vol. 15, 1995 Technical Digest Series Conference Edition, Optical Society of America, Washington DC, CTuM2, p. 139
- 7 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18) : 1427~ 1429
- 8 樊立明, 朱国英, 陈时胜 等. Nd·YAG 激光器中的自锁模. *光学学报*, 1992, **12**(1) : 16~ 20

Stability and Power Improvement in Passive Q-switching of CW Nd·YAG Laser Using Cr⁴⁺·YAG

Ding Yanhua Ouyang Bin Xu Jun Wan Xiaoke Lin Lihuang Deng Peizhen
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract It is reported that laser transversal and longitudinal mode structure as well as other factors such as pumping rate disturbance, causes instability of the output of a cw Nd·YAG laser passively Q-switched with Cr⁴⁺·YAG. Effectual methods of improving stability are given and a stability better than 5% is gotten. It is suggested that the thermal effect of Cr⁴⁺·YAG and damage to optical coating should be taken into account when increasing the output power of the Q-switched cw laser.

Key words Cr⁴⁺·YAG, stability of passive Q-switching, thermal stability pre-compensation, self-mode-locked sub-pulse