

文章编号: 0258-7025(2004)04-0399-04

双调 Q 复合腔 Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG 激光器的研究

王加贤, 吕凤萍, 苏娅菲

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

摘要 报道一种有实用价值的、构思新颖的双调 Q, 双波长输出的 Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG 激光器。在由两个平凹腔耦合而成的复合腔中, Cr⁴⁺:YAG 晶体既作为可饱和吸收体对 Nd:YAG 发射的 1.06 μm 激光被动调 Q, 又作为增益介质在 1.06 μm 激光脉冲作用下发射中心波长 1.44 μm 的激光脉冲。该激光器实现了 1.06 μm 激光被动调 Q 和 1.44 μm 激光增益调 Q 的双波长激光振荡, 输出的 1.06 μm 和 1.44 μm 激光脉冲的能量和脉冲宽度分别为 18 mJ, 52 ns 和 0.25 mJ, 19 ns; 后者的脉冲宽度约为前者的三分之一。理论上, 根据 Cr⁴⁺:YAG 的能级结构和复合腔特点, 分析了双调 Q 的工作机理; 从速率方程出发导出双调 Q 复合腔激光器输出的 1.44 μm 激光脉冲宽度和腔内 1.06 μm 激光功率的关系。1.44 μm 激光脉冲时间宽度的理论计算值(21.7 ns)与实验结果(19 ns)基本相符。

关键词 激光技术; 双调 Q; 复合腔; Cr⁴⁺:YAG; 脉冲宽度

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Investigation on a Compound Resonator Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG Laser with Dual Q-Switching Operation

WANG Jia-xian, LÜ Feng-ping, SU Ya-fei

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362011, China)

Abstract A practical and novel Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG laser with dual Q-switching and dual-wavelength output is reported. In the compound resonator coupled with two plano-concave cavities, a single Cr⁴⁺:YAG is both a saturable-absorber of Q-switch at 1.06 μm laser from Nd:YAG and a laser gain medium at 1.44 μm with 1.06 μm laser as its intra-cavity pump source. the dual-wavelength laser oscillation with passively Q-switched 1.06 μm laser and gain-switched 1.44 μm laser is realized in the laser. The output energy and pulse duration of 1.06 μm and 1.44 μm laser are 18 mJ, 52 ns and 0.2 mJ, 19 ns respectively, and the pulse duration of the latter is about one of third of the former. The working mechanism of the dual Q-switching is analyzed in theory according to energy levels of the Cr⁴⁺:YAG and the feature of the compound resonator. Based on the rate equations, the relationship between pulse duration of 1.44 μm laser and the intra-cavity power of 1.06 μm laser is derived. The theoretical data (21.7 ns) of pulse duration of 1.44 μm laser is roughly consistent with the experimental result (19 ns).

Key words laser technique; dual Q-switching; compound resonator; Cr⁴⁺:YAG; pulse duration

1 引 言

Cr⁴⁺:YAG 是近年来引起广泛重视的新型固体激光材料, 它在 0.9~1.1 μm 波长范围内具有饱和

吸收特性, 作为各种 Nd³⁺ 激光器的被动 Q 开关, 具有吸收截面大、饱和光强低、热导性能好、损伤阈值高、使用方便及使用寿命长等优点^[1,2]。同时, Cr⁴⁺:YAG 的发射谱处于 1.3~1.59 μm 范围, 接近人眼

收稿日期: 2003-08-14; 收到修改稿日期: 2003-09-18

基金项目: 福建省自然科学基金(编号: A0310022)和国务院侨办科研基金(编号: 02QZR04)资助项目。

作者简介: 王加贤(1955—), 男, 福建泉州市人, 华侨大学信息科学与工程学院教授, 工学博士, 主要从事固体激光器件和超短光脉冲技术的研究。E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

安全工作区和光纤的零损耗、零色散区,所以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为激光增益介质同样有很好的发展前景和重要的应用,国外已先后实现 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器的连续或自锁模运转^[3,4]。本文研究采用复合腔结构,把 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 既作为 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器的调 Q 器件,又作为增益介质,实现被动调 Q 和增益调 Q 同时进行的双调 Q 运转,得到 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.44\ \mu\text{m}$ 双波长输出的短脉冲。

2 实验装置与实验结果

双调 Q 复合腔 $\text{Nd}:\text{YAG}-\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器如图 1 所示。其中 M_1 是曲率半径 $300\ \text{cm}$,对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光高反的凹面镜; M_2 是曲率半径 $200\ \text{cm}$,对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光高透、对中心波长 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光高反的凹面镜;平面镜 M_3 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光透过率为 15% ,对 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光高透;平面镜 M_4 对 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光的透过率为 3% ,对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光高透; M_5 是对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光高透、对 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光高反的分光器。在 M_3 和 M_4 之间若插入调谐元件,将获得可调谐激光输出。 F 是 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的滤光片,用光谱仪测量该滤光片对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的透过率为 0 ,对 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光的透过率为 80% 。 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光分别由 Si PIN 和 InGaAs PIN 光电二极管构成的探测器 D_1 和 D_2 接收,并输入到 $300\ \text{MHz}$ 数字存储示波器上显示和存储。

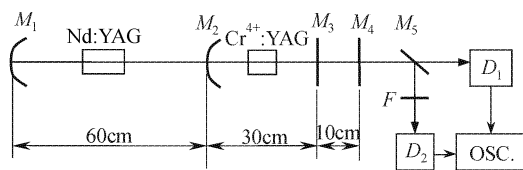


图 1 双调 Q 复合腔激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of a compound resonator laser with dual-switching

在由 M_1 和 M_3 镜构成的腔长 $90\ \text{cm}$ 的谐振腔(第一谐振腔)内, $\text{Nd}:\text{YAG}$ 作为增益介质用单根脉冲氙灯抽运,工作重复率为 $1\ \text{Hz}$, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光被动调 Q。在 M_2 和 M_4 构成的腔长 $40\ \text{cm}$ 的谐振腔(第二谐振腔)内, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 又是增益介质,在 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光脉冲抽运下产生 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光振荡。

实验中,调整 M_1, M_2, M_3, M_4 4 个镜共轴成腔,使输出的激光能量最大。用 PT-1 型激光能量计测得 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光能量分别为 $18\ \text{mJ}$ 和

$0.25\ \text{mJ}$ 。示波器上观察到的 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光脉冲如图 2 所示,测得脉冲宽度分别为 $52\ \text{ns}$ ($1.06\ \mu\text{m}$ 激光)和 $19\ \text{ns}$ ($1.44\ \mu\text{m}$ 激光)。

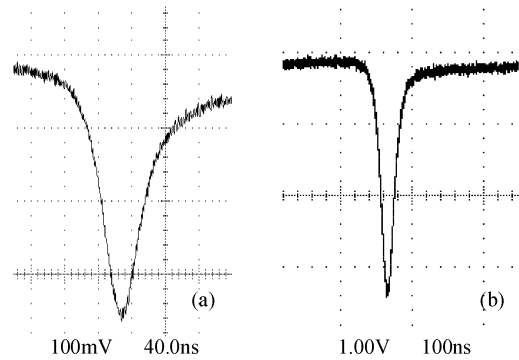


图 2 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光脉冲(a)和 $1.44\ \mu\text{m}$ 激光脉冲(b)

Fig. 2 Laser pulses at $1.06\ \mu\text{m}$ (a) and $1.44\ \mu\text{m}$ (b)

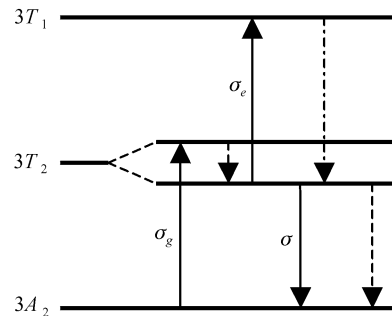


图 3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的能级结构图

Fig. 3 Energy level diagram of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

3 理论分析

3.1 双调 Q 的工作机理

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的能级结构与主要跃迁过程如图 3 所示,第一激发态包括二个能态。对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光入射存在着 $3A_2$ 到 $3T_2$ 的基态吸收和 $3T_2$ 到 $3T_1$ 的激发态吸收,其吸收截面分别为 $\sigma_g = 8.7 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$ 和 $\sigma_e = 2.2 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$;从 $3T_2$ 到 $3A_2$ 的辐射跃迁,其发射截面 $\sigma = 4 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$ 。室温下 $3T_1$ 和 $3T_2$ 的能级寿命分别为 $50\ \text{ps}$ 和 $3.4\ \mu\text{s}$ ^[5]。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体大的吸收截面和较长的第一激发态寿命决定了其可作为 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器的可饱和吸收体,它在第一谐振腔内起到被动 Q 开关的作用,产生脉宽 $52\ \text{ns}$ 的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光脉冲。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 同时又是第二谐振腔内的增益介质,在 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光脉冲抽运下, Cr^{4+} 跃迁到 $3T_2$,造成 $3T_2$ 与 $3A_2$ 能级之间的 Cr^{4+} 粒子数反转。虽然激发态吸收使得一部分 Cr^{4+} 在 $3T_2$ 与 $3T_1$ 之间来回跃迁,但因为 $3T_1$ 能级寿命极短($50\ \text{ps}$),所以可认为在激光脉

冲抽运期间激发态吸收对 $3T_2$ 上的 Cr^{4+} 粒子数密度没有影响。由于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲的宽度 (52 ns) 远小于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的荧光寿命 ($3.4 \mu\text{s}$), 而且 $1.06 \mu\text{m}$ 激光光强又很大, 因此在抽运脉冲持续时间内, 可迅速实现 Cr^{4+} 粒子数反转; 抽运脉冲终止时, 反转粒子数达到最大值。第二谐振腔的损耗在激光器运转过程中保持不变, 即阈值反转粒子数不变, 当反转粒子数超过阈值时, 可获得增益, 建立 $1.44 \mu\text{m}$ 激光巨脉冲。由此可见, 在复合腔 Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG 激光器中, 依靠被动调 Q 获得 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲; 通过增益调 Q (损耗不变, 增益变化, 也称为增益开关) 获得 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲, 这就是双调 Q 的工作机理。

3.2 1.44 μm 激光脉冲宽度的估算

实验中观察到 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲的宽度明显小于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲。估算复合腔输出的 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲, 可以引用文献[6]推导出的外腔抽运下增益开关产生的激光脉冲宽度的近似计算式

$$\delta t = \frac{a}{\varepsilon} F(\gamma) \tau_c \quad (1)$$

式中 a 取值一般为 1.5; $\varepsilon = \frac{\sigma^- \sigma_e}{\sigma + \sigma_e}$ 是介质的激发态吸收因子; $\tau_c = \frac{2L}{c \cdot \delta_c}$ 为腔内光子寿命 (L 为腔长, c 为光速, δ_c 为包括腔的耦合损耗、晶体的吸收损耗和散射损耗等在内的激光器的总损耗); $F(\gamma) = \eta(\gamma)/\varphi(\gamma)$ 为 $1.44 \mu\text{m}$ 脉冲总的提取效率与峰值提取效率之比, 这里 $\gamma, \varphi(\gamma), \eta(\gamma)$ 的定义分别为

$$\gamma = \frac{N_{\max}}{N_{\text{th}}}, \quad \varphi(\gamma) = \frac{\gamma - 1 - \ln \gamma}{\gamma} \quad (2)$$

$$\eta(\gamma) = \frac{N_{\max} - N_f}{N_{\max}} \quad (3)$$

式中 $N_{\max}, N_{\text{th}}, N_f$ 分别为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 中的最大反转粒子数密度、阈值反转粒子数密度和脉冲结束时的剩余反转粒子数密度。

对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体, 考虑到激发态吸收, 采用速率方程组可以得到 N_{\max} (对应 $1.06 \mu\text{m}$ 抽运脉冲的峰值时刻) 和 N_{th} (对应 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲峰值时刻) 分别为

$$N_{\max} = \frac{\sigma_g}{\sigma_g + \sigma_e} N_c \left\{ 1 - \exp \left[-(\sigma_g + \sigma_e) \frac{I_p t_p}{h\nu_p} \right] \right\} \quad (4)$$

$$N_{\text{th}} = \frac{1}{c\tau_c(\sigma - \sigma_e)} \quad (5)$$

式中的 N_c 为晶体中的 Cr^{4+} 粒子数密度, I_p 为晶体

中抽运光的功率密度, $h\nu_p$ 为 $1.06 \mu\text{m}$ 抽运光子能量, t_p 为抽运光脉冲宽度。

利用调 Q 的速率方程组可以得到 $N_{\max}, N_{\text{th}}, N_f$ 三者的关系为^[7]

$$\frac{N_f}{N_{\max}} = \exp \left(\frac{N_f - N_{\max}}{N_{\text{th}}} \right) \quad (6)$$

把(6)式代入(3)式并整理后有

$$\eta(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \eta} \right) \quad (7)$$

本实验装置采用的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的小信号透过率 $T_0 = 63\%$, 通过长度 $d = 5 \text{ mm}$, 由 $T_0 = \exp(-N_c \cdot \sigma_g \cdot d)$ 得到晶体中的掺杂浓度 $N_c = 1.06 \times 10^{18}/\text{cm}^3$; 第二谐振腔的损耗主要是晶体的吸收损耗和输出镜的透射损耗, 总的往返损耗估计约为 0.8, 由此得到腔内光子寿命 $\tau_c = 3.3 \text{ ns}$; 根据腔内 $1.06 \mu\text{m}$ 激光能量 ($E = 18 \text{ mJ}/15\%$), 抽运脉冲宽度 ($t_p = 52 \text{ ns}$) 以及晶体中抽运光的光束面积 (约为 0.02 cm^2), 可得到 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体中抽运光的功率密度 $I_p = E/t_p \cdot A = 6.9 \times 10^7/\text{cm}^2$; 抽运光的光子能量 $h\nu_p = 1.87 \times 10^{-16} \text{ mJ}$ 。把上述由实验参数得到的数据代入(4), (5), (2)式可得到 $N_{\max} = 1.05 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, $N_{\text{th}} = 5.61 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, $\gamma = 18.7$, $\varphi(\gamma) = 0.79$ 。对(7)式超越方程进行数值求解, 可知 $\gamma = 18.7$ 时, $\eta(\gamma) \approx 100\%$, 由此得到 $F(\gamma) = 1.27$ 。把 $F(\gamma) = 1.27, a = 1.5, \varepsilon = 0.29$ 代入(1)式, 可得到 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲的宽度为 21.7 ns , 理论值与实验值基本相符。

4 结 论

从双调 Q 复合腔 Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG 激光器中同时输出能量和脉宽分别是 $18 \text{ mJ}, 52 \text{ ns}$ 的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲和 $0.25 \text{ mJ}, 19 \text{ ns}$ 的 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲。采用增益开关理论估算出的 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲宽度的理论值与实验值基本相符。如果采用通光长度较大的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体和进一步优化激光器运转条件, 可望提高 $1.44 \mu\text{m}$ 激光脉冲能量, 在此基础上可能实现可调谐输出。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所邓佩珍、乔景文教授为本实验提供了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体。

参 考 文 献

- 1 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr⁴⁺:YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser [J].

- IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10):1738~1741
- 2 Yung-Fu Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang. High-power diode-pumped Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser with a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19):1442~1444
- 3 A. Sennaroglu, C. R. Pollock, H. Nathel. Continuous-wave self-mode-locked operation of a femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6):390~392
- 4 Yuzo Ishida, Kazunori Naganuma. Compact diode-pumped all-solid-state femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1):51~53
- 5 A. Sennaroglu, C. R. Pollock, H. Nathel. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(5):930~937
- 6 Zhang Guowei. Tunable Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2002
- 7 Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 1999
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京:科学出版社, 1999

• 征订启事

《中国激光》增刊

由中国电子学会和中国光学学会联合主办,中国科学院上海光学精密机械研究所承办的第十六届全国激光学术会议于2003年10月19~22日在上海举行,会议论文集将由本编辑部以增刊形式出版。

本期增刊共收录了170多篇论文,约600多页,除以纸质媒体出版外,还将出版光盘版,出版时间为2004年3月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家863计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。增刊定价为每册100元,光盘版为每张50元。如需订阅的单位或个人请将款项由邮局汇至上海市800-211信箱《中国激光》编辑部,邮编:201800。

《光学手册》简介

顾问 龚祖同 主编 李景镇

陕西科学技术出版社 16开 1541页 定价:100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有2700多个公式,1400余幅插图和400多个数据表格,230万字。手册包括25个光学分科,如量子光学、非线性光学、信息光学、纤维光学和变折射率光学、集成光学、统计光学、成像光学、薄膜光学、光谱学、大气光学、海洋光学、色度学、视觉光学、高速摄影和光子学、光学材料、光学元器件、光学仪器仪表、光电探测器、光学测量仪器等;5个附录,2个索引。资料丰富,表达方式详略得当,是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

手册由20多位光学专家编撰完成,在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助,保证了该手册的编写质量和权威性。

如需购买,请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话:021-69918428,021-69918011,请从邮局汇款

地址:上海800-211信箱,光学期刊联合编辑部

邮编:201800

光学期刊联合编辑部

2004年4月