

文章编号 1000-5013(2002) 04-0342-04

抗共振环提高调 Q 激光能量

吴逢铁 张文珍 姚关清

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 在带抗共振环 (ARR) 的非稳腔 Nd : YAG 激光器中, 将调 Q 材料 Cr^{4+} : YAG 晶体和 $\text{LiF} : \text{F}_2$ 色心晶体置于 ARR 中心, 获得调 Q 单脉冲能量分别为 86.1 mJ 和 85.3 mJ. 这一输出能量远大于相同实验条件下传统的平-凸非稳腔激光器, 理论分析很好地解释了实验结果.

关键词 抗共振环, 被动调 Q , Cr^{4+} : YAG 晶体, $\text{LiF} : \text{F}_2$ 色心晶体

中图分类号 TN 248.3⁺4

文献标识码 A

调 Q 巨脉冲是探测原子、分子、动植物病毒内部的激发机理和演变, 研究非线性光学, 远程精确测距等应用的重要光源. 提高激光的输出能量, 具有重要的实用价值. 本文在普通的平-凸非稳腔调 Q 激光器中, 引入抗共振环 (Anti-Resonant Ring, ARR) 结构. 理论和实验均指出, 这一结构非常有效地提高了激光输出能量.

1 ARR 的光栅效应

抗共振环 (ARR) 结构由 Siegman 提出, 并首次将其应用于固体激光器中, 实现对撞脉冲锁模 (CPM)^[1], 输出激光参数质量获得飞跃性提高. 我们首次将 ARR 结构应用于被动调 Q 激光器中, 获得了高稳定的大能量调 Q 激光输出^[2]. 分析表明入射 ARR 的光被分成强度相等, 相向传播的两束光. 这两束光, 可分别表示为 $E_R = E_R(t) \exp[-i(\omega - kx)]$ 和 $E_L = E_L(t) \exp[-i(\omega + kx)]$. 当调 Q 材料置于 ARR 中心, 相向传播的两束光在可饱和吸收体处精确对撞形成瞬态光栅, 其包迹耦合方程^[3]为

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE_R}{dt} \right)_{x=-l} &= -(\sigma N_A E_R) / 2 + (\sigma N_B E_L) / 4, \\ \left(\frac{dE_L}{dt} \right)_{x=l} &= -(\sigma N_A E_L) / 2 + (\sigma N_B E_R) / 4, \\ dN_A / dt &= -2^{-1} \sigma N_A (E_R^2 + E_L^2) + 2^{-1} \sigma N_B E_R E_L, \\ dN_B / dt &= -2^{-1} \sigma N_B (E_R^2 + E_L^2) + 2^{-1} \sigma N_A E_R E_L. \end{aligned}$$

在上面诸式中, N_A 和 N_B 分别表示瞬态光栅的平均分量和基波分量的粒子数密度, σ 为可饱和吸收体的吸收截面, 方程导出过程中略去高次谐波的影响. 相比之下, 在 ARR 中心处产生的光栅强度, 远大于普通的平-凸直腔中产生的光栅强度.

收稿日期 2002-08-19

作者简介 吴逢铁(1958-), 男, 教授

基金项目 国务院侨务办公室科研基金资助项目

2 调 Q 材料特性

实验中我们采用新型的可饱和吸收材料 Cr^{4+} YAG 晶体和传统的 $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 色心晶体作为调 Q 材料.

2.1 Cr^{4+} YAG 晶体

Cr^{4+} YAG 晶体是近年来引起人们极大关注和兴趣的新型可饱和吸收材料. 它在 $0.9 \sim 1.06 \mu\text{m}$ 波段范围内, 具有很好的饱和吸收

特性, 已成功实现该波段的被动调 Q 和锁模运转^[5~6]. Cr^{4+} YAG 与 $1.06 \mu\text{m}$ 波长激光吸收有关的能级跃迁, 见图 1 简化的四能级模型. 基态的吸收从能级 1 到能级 3, 并很快驰豫到能级 2, 激发态的吸收从能级 2 到能级 4, 并很快驰豫到能级 2. 其中基态和激发态(ESA)吸收截面分别为^[7] $\sigma_g = 8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_e = 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 第 1 激发态寿命 τ_{21} 约为 $3.4 \mu\text{s}$. 因此, 基态的饱和和恢复时间较长. 第 2 激发态 $3\text{T}_1 \rightarrow 3\text{T}_2$

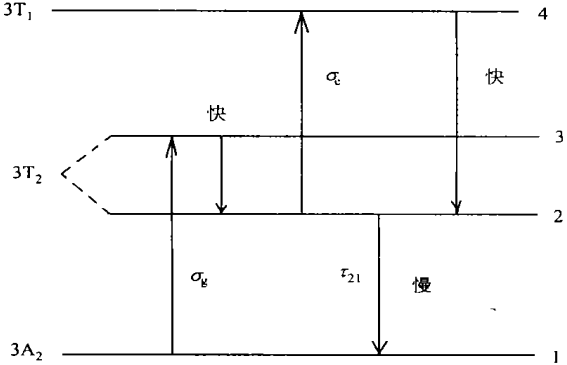


图 1 Cr^{4+} YAG 有关能级简图

的快速驰豫时间约为 50 ps . 实现激光调 Q 主要是由于第 1 激发态的饱和吸收. 当作用在 Cr^{4+} YAG 上的激光功率密度足够大时, 不仅可实现 3A_2 到 3T_2 的吸收饱和, 同时也可实现 3T_2 到 3T_1 的激发态吸收.

2.2 $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 色心晶体

$\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 色心晶体是优质的光学材料, 具有高的导热率($0.104 \text{ W} \cdot (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)和高的破坏阈值. $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 色心晶体作为调 Q 元件, 已有近 20 年的历史. F_2 心具有四能级结构, 它在 $0.96 \mu\text{m}$ 处有一强吸收峰, 非常适合作为 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的饱和吸收材料. 在强光泵浦下可以出现饱和吸收. $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 心对 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的吸收截面约为 $2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, 驰豫时间 $\tau_{21} = 10^{-10} \text{ s}$ ^[8]. 上面分析的两种调 Q 晶体, 除了通常的基态吸收以外, 在强光泵浦下都具有激发态的饱和吸收.

3 实验装置和结果

实验装置如图 2 所示. 采用凸-ARR 非稳腔, 其有效腔长 $L = 700 \text{ mm}$. 凸面全反镜的曲率半径 $R_1 = -2000 \text{ mm}$. M_4 为 50/50 分光镜. 平面镜 M_2, M_3, M_4 , 构成抗共振环(ARR), 其等效为一平面全反镜. M_0 为 50/50 输出耦合镜. Nd YAG 棒尺为 $\varnothing 4.5 \text{ mm} \times 99 \text{ mm}$. 由双脉冲氙灯抽运, 工作重复频率为 1.0 Hz . 所用的调 Q 材料被置于 ARR 中心, 材料特性参数的晶体尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 4.75 \text{ mm}$, 通光长度为 4.75 mm , 对 $1.06 \mu\text{m}$ 小信号透过率 T_0 为 33%, $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 色心晶体尺寸为 $10.4 \text{ mm} \times 10.4 \text{ mm} \times 30.2 \text{ mm}$, 通光长度 30.2 mm , 对 $1.06 \mu\text{m}$ 小信号透过率 T_0 为 11%. 激光输出采用腔内侧面耦合输出, 输出能量由 PT-1 型激光能量计测定. 同时由 400 MHz 数字式存储示波器, 观察调 Q 脉冲波型和测定脉宽.

实验时, 尽可能将调 Q 材料置于 ARR 中心 A 处, 以增强光栅效应. 控制输入泵浦电压,

并由示波器观察输出激光波形. 图 3 为典型的调 Q 脉冲示波器照片. 当输出为单个调 Q 脉冲时, 测定输出能量(每个数值均为 10 次以上测定的平均值). 对上述两种不同调 Q 材料, 保持

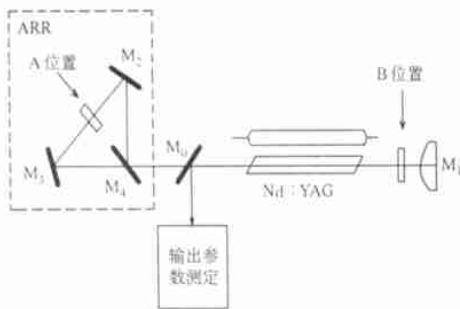


图 2 实验装置简图

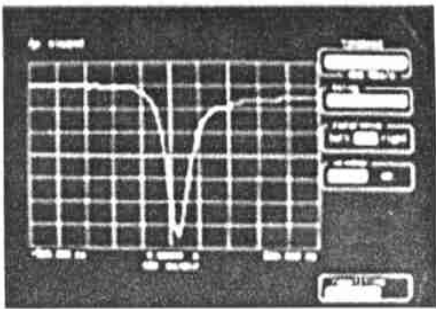


图 3 调 Q 脉冲示波器照片

相同的泵浦能量. 作为比较实验, 本文将两种调 Q 材料分别置于凸平面全反镜 M_1 前 B 处, 此时谐振腔等效为一个普通的平-凸非稳腔(当 ARR 的分光镜 M_4 对光能的反射/透射比为 50/50, ARR 等效为一个平面全反镜), 在保持与上述的凸-ARR 腔相同的泵浦条件下, 测定输出调 Q 单脉冲的能量. 实验数据归纳于表 1. 其中输出能量起伏由相对误差公式 $\Delta E/E = [\sum_{i=1}^n |E_i - E|] / nE$ 求得. 公式中的 E_i 为单次测量的能量值, E 为所测能量的平均值, n 为测量次数.

表 1 主要实验结果

调 Q 晶体	晶体位置	平均能量/mJ	能量起伏/(%)
Cr^{4+} YAG	ARR 环中	86.1	0.82
	M_1 镜前	47.6	1.70
LiF F_2	ARR 环中	85.3	0.59
	M_1 镜前	42.5	5.98

4 结果分析

结果表明, 采用凸-ARR 非稳腔, 并将调 Q 材料置于 ARR 中心. 获得的调 Q 激光输出能量远大于将调 Q 材料置于 B 处的普通平-凸非稳腔. 当 Cr^{4+} YAG 晶体和 LiF F_2 色心晶体置于 ARR 中心时, 输出调 Q 单脉冲能量分别为 86.1 mJ 和 85.3 mJ. 而在相同的实验条件下, 当调 Q 材料置于凸透镜 M_1 前, 输出能量分别降至 47.6 mJ 和 42.5 mJ. 这是由于当调 Q 材料置于 ARR 中心, 等值相向传播的两光脉冲在可饱和吸收体处精确对撞, 获得极强的光栅效应. 当调 Q 材料置于 B 处, 激光束纵模在调 Q 材料中的吸收光栅相互错开, 光栅效应减弱. 光栅效应使可饱和吸收体内光强出现明显的强弱分布, 在强度最高处容易导致材料的激发态吸收饱和. 如 Cr^{4+} YAG 晶体激发态有着明显的吸收, 其吸收截面 $\sigma_e = 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. 随着激发态吸收减少, 腔内损耗变小, 激光介质粒子反转数得于更大程度的倒空, 腔内光强增强, 则又引起饱和吸收体激发态吸收, 继续减少直至饱和. 这种调 Q 过程与只发生基态吸收饱和的调 Q 过程不同, 得到激光输出能量也不同. 由于 ARR 中心光栅效应强, 使得可饱和吸收体的饱和过程明显加剧, 因此可获得更大的能量输出. 显然, 引入 ARR 极大提高了调 Q 激光的输

出能量. 实验数据还表明, 当调 Q 晶体置于ARR中心, 输出调 Q 激光的稳定性大大提高, 其主要机理已在文献[9]中讨论.

参 考 文 献

- 1 Siegman A E. Passive mode-locking using an antiresonant ring laser cavity[J]. Opt. Lett., 1981, 6(7): 334~335
- 2 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. High energy and high stability Cr^{4+} YAG passively Q -switched laser with convex-ARR unstable resonator[J]. Optics & Laser Technology, 2000, 32(2): 107~110
- 3 Stix M S, Ippen E P. Pulse shaping in passively mode locked ring dye laser[J]. IEEE J. Quantum. Electron., 1983, QE-19(4): 520~526
- 4 Yankor P. Cr^{4+} YAG Q -switching of Nd host laser oscillators[J]. J. Phys. (D): Appl. Phys., 1994, 27(12): 1118~1120
- 5 吴逢铁, 张文珍. 凸-ARR非稳腔中 Cr^{4+} YAG调 Q 激光器的研究[J]. 中国激光, 2001, A28(1): 1~3
- 6 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Xing Qirong, et al. Investigation of Cr^{4+} YAG passive mode-locking in a pulse Nd YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30(5): 303~305
- 7 Shimony Y, Burshtein Z, Kalisky Y. Cr^{4+} YAG as passive Q -switch and brewster plate in a pulsed Nd YAG laser[J]. IEEE J. Quantum. Electron., 1995, 31(10): 1738~1741
- 8 张光荣, 穆荣平, 任建平等. $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ 晶体调 Q 特性的研究[J]. 激光杂志, 1987, 8(6): 358~361
- 9 吴逢铁, 张文珍, 王加贤等. 不同材料在平-ARR腔的被动调 Q [J]. 中国激光, 2002, A29(增刊): 239~240

The Use of Antiresonant Ring for Enhancing Output Energy of Q -Switched Laser

Wu Fengtie Zhang Wenzhen Yao Guanqing

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract The unsteady resonator Nd YAG laser is equipped with an antiresonant ring(ARR). Cr^{4+} YAG crystal and $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ color center crystal as Q -switched materials were placed in the center of the ARR. They obtained the single pulse Q -switched output energy of 86.1 mJ and 85.3 mJ respectively, which are much greater than that from conventional plane-convex unsteady resonator laser under the same experimental condition. These experimental results are satisfactorily explained by theoretical analysis

Keywords antiresonant ring, passively Q -switched, Cr^{4+} YAG crystal, $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ color center crystal