

泵浦调 Q 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器输出特性研究

段存丽¹, 韩 军¹, 张苏娟², 张瑞华¹, 郭荣礼¹

(1. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032; 2. 西北大学光子与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

摘要:对泵浦调 Q $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 固体激光器进行了实验研究。分析了电光调 Q 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的输出特性。当泵浦电压从 500 ~ 950V 逐渐增大时, 激光器单次脉冲能量逐渐变大, 且满足近似线性变化关系; 多次测量中稳定度从 2.9% 提高到 0.5%; 当泵浦电压从 500 ~ 950V 逐渐增大时, 激光器的单次脉冲宽度逐渐变小, 多次测量中稳定度从 21.6% 提高到 10.5%; 激光器的单次脉冲峰值功率近似线性增加。研究表明泵浦电压在 700 ~ 900V 时, 激光器的单次脉冲能量和单次脉冲宽度比较稳定, 稳定度分别近似为 1% 和 13%。

关键词:激光器; 输出特性; 脉冲能量; 脉冲宽度

中图分类号: O437 文献标识码: A

Research on Output Character of Pumped Q -switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ Laser

DUAN Cun-li¹, HAN Jun¹, ZHANG Su-juan², ZHANG Rei-hua¹, GUO Rong-li¹

(1. Department of Opto-electronic Engineering, Xi'an University of Industry, Xi'an 710032, China;

2. Institute of Photonics and Photo-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The experiment on lamp-pumped Q -switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ laser is carried out. The output characters of $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ laser is analyzed. The pumped voltage is changed 500V to 950V, it is find that the output pulse energy linear increased with pumped voltage. The error of measured the pulse energy changes 2.9% to 0.5%. The pumped voltage is changed 500V to 950V, it is find that the pulse width is decreased with pumped voltage. The error of measured the pulse width changes 21.6% to 10.5%. The pulse peak power is increased. The pumped voltage is changed 700V to 900V, the pulse energy and the pulse width are no change. The error of measuring is 1% to 13%.

Key words: laser; output character; pulse energy; pulse width

1 引言

YAG 激光器具有良好的性能: 与金属、光纤的耦合效率高; 其脉冲输出可通过调 Q 和锁模技术获得短脉冲及超短脉冲; YAG 激光器结构紧凑、质量轻、使用简便可靠、维修要求较低, 故其应用前景很好, 广泛用于工业、国防、医疗、科研等领域, 在远距离探测、激光通信和非线性光学等方面都起着重要的作用^[1-2]。在脉冲激光器内采用电光调 Q 和激光放大技术, 则很容易获得时间宽度为 10ns 量级而峰值功率达百兆瓦量级的 TEM_{00} 模激光脉冲, 通过 KTP 等非线性光学晶体对波长

1064nm 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光基波进行二倍频、三倍频和四倍频则可得到四种波长的脉冲激光^[3-4]。以 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器为基础的脉冲激光系统以其高重复频率、高重复频率和宽波长调谐特性等优点而得到了广泛的应用。但是它的输出功率稳定性如不采取特别的措施, 通常情况下其稳定度在 5% ~ 10%^[5-6], 所以大大限制了它在很多领域中的应用。因而研究 YAG 激光器输出特性对于改进

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划 (No. 05JK221) 资助。

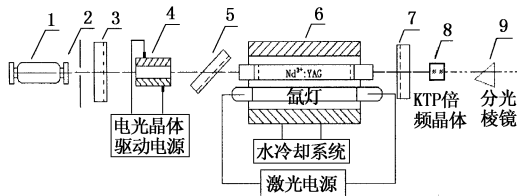
作者简介: 段存丽 (1972 -), 女, 讲师, 主要从事光信息处理, 光学检测。E-mail: duancunli2003@sohu.com

收稿日期: 2008-07-16

YAG 固体激光器以及利用 YAG 激光器检测具有实际意义^[7-8]。本文以 Nd:YAG 激光器为基础,主要研究了泵浦电压对单次脉冲能量、对脉冲宽度以及脉冲的峰值功率的影响。

2 YAG 激光器原理

实验采用灯泵 YAG 激光器内部结构如图 1 所示^[9]。利用 He - Ne 激光器作为准直光源,调节 YAG 激光器各个器件同光轴。全反镜 3、Nd³⁺:YAG 激光棒 6 与输出镜 7 形成激光器的基本结构“两模一棒”输出 1064nm 激光,在全反镜 3 和 Nd³⁺:YAG 激光棒 6 之间加入 KTP 调 Q 开关^[10]晶体 4 和偏振片 5,实现退压式电光调 Q 输出 1064nm 激光。在输出端加入 KTP 倍频晶体 8,输出二倍频 532nm 激光。通过分光棱镜 9,可以完成基频光和倍频光分光,输出不同波长的光脉冲。



1 - He - Ne 激光器准直光源(632.8nm); 2 - 小孔光阑; 3 - 全反镜(对 1064nm 反射率 R=99.8%); 4 - KTP Q 开关晶体(φ12×40); 5 - 偏振片; 6 - 聚光腔(Nd³⁺:YAG 激光棒 φ6×100mm); 7 - 输出镜(K9 玻璃材质, T=80%); 8 - KTP 倍频晶体(8×8×7); 9 - 分光棱镜(60°, 一面磨砂, 边长 40mm, 厚度 25mm)

图 1 YAG 激光器原理图

3 测试 YAG 激光器调 Q 输出脉冲能量

3.1 测试实验结果

实验选用硅光二极管能量探测器(响应时间 ≤ 1ms); LE - 3 型激光能量计(分辨率 10μJ)。在室温

表 1 输出脉冲能量和泵浦电压的变化实验数据

U/V	E/mJ										均值	稳定性/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
500	17.0	17.0	16.7	16.1	17.3	17.3	16.6	16.8	16.6	16.8	16.8	2.9
550	36.3	36.3	36.4	36.6	37.0	36.0	36.9	36.5	35.7	36.6	36.4	1.9
600	57.5	58.2	58.0	57.9	56.7	57.9	58.1	58.2	56.9	58.2	57.8	1.9
650	75.4	73.5	75.5	74.7	73.6	74.7	75.3	73.1	73.6	74.2	74.4	1.7
700	91.5	90.3	90.2	90.4	90.7	90.1	90.5	89.6	90.4	91.0	90.5	1.1
750	107.2	107.0	106.9	106.9	107.4	108.7	107.6	108.6	106.8	107.0	107.4	1.2
800	125.3	126.0	125.1	125.0	126.8	126.0	125.6	124.9	124.4	125.0	125.4	1.1
850	143.3	143.9	143.5	143.3	144.5	144.1	143.8	142.2	143.1	144.2	143.6	0.6
900	160.3	160.8	160.6	160.2	160.1	160.6	161.1	159.7	159.9	160.0	160.3	0.5
950	173.2	173.8	172.9	171.5	171.6	170.8	172.9	171.2	171.3	173.5	172.3	0.8

为 19℃、全暗光、脉冲氙灯泵浦重复频率 1 次/s 的条件下,对调 Q 灯泵 GCS - YAG 型激光器进行泵浦电压变化对脉冲能量影响的测试。测试数据如表 1 所示。

实验结果:①泵浦电压的域值电压为 460V; ②当泵浦电压从 500 ~ 950V 逐渐增大时,激光器的单次脉冲能量从 16.8 ~ 172.3mJ 逐渐变大,且满足近似线性变化关系(如图 2 所示);③泵浦电压在 500 ~ 950V 逐渐增大时,激光器的单次脉冲能量在多次测量中稳定性从 2.9% 提高到 0.5%;相比较泵浦电压在 700 ~ 900V 变化时,激光器的单次脉冲能量较稳定。

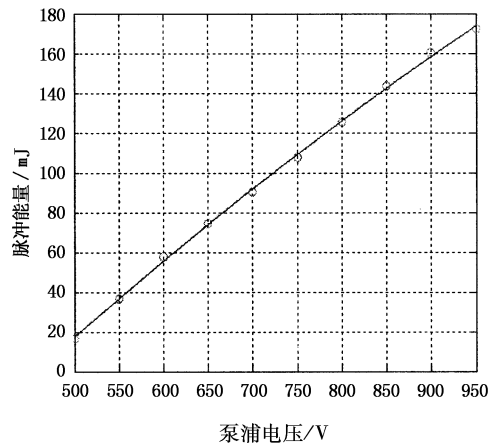


图 2 脉冲能量曲线

3.2 实验结果分析

Nd³⁺:YAG 调 Q 激光器属于四能级系统,但是由于调 Q 巨脉冲宽度很窄,在巨脉冲发生过程中从激光上能级跳到下能级的粒子并不能立即从下能级消失。因而不能认为激光下能级为空能级,故在调 Q 器件中,Nd³⁺:YAG 调 Q 激光器的行为偏离理想的四能级系统,而接近三能级系统^[9,11]。为使研究问题简化,假设:①Q 开关打开前不存在自发辐射;②Q 开关打开后光泵浦立即停止;③我们研究的速率方程仅用以研究 Q 值阶跃后的脉冲形成过程,认为 Q 值阶跃时工作物质已储存好了 n_i 个粒子反转数(n_i 即初始粒子反转数)。为此,我们可把能级结构简化为只有激光上下能级的二能级系统。

下面两式即为调 Q 脉冲激光器的典型速率方程:

$$\frac{d\Phi}{d\tau} = \Phi \left(\frac{n}{n_i} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\frac{dn}{d\tau} = -2\Phi \frac{n}{n_i} \quad (2)$$

其中, $\tau = t/t_c$, t_c 为 Q 值阶跃后光子在谐振腔内的寿命; n_i 为腔内光子数最大时的反转粒子数。 Φ 为腔内光子数, 由速率方程的解可求得有关激光巨脉冲的性能参数。

从调 Q 激光器工作物质中取出的总粒子反转数为 $n_0 = n_i - n_f$, 每增加一个光子, 相应的激光上能级的粒子数减少一个, 而下能级的粒子数增加一个, 所以粒子反转数要减小两个, h 为普朗克常数, ν 为激光振荡频率, 故:

$$E = \frac{1}{2}(n_i - n_f)h\nu \quad (3)$$

由上式可看出脉冲能量 E 与从调 Q 激光器工作物质中取出的总粒子反转数 n_0 成正比, 而随着泵浦能量的增加, n_0 也随着增加, 则输出脉冲能量也随之线性增加。

4 测试 YAG 激光器调 Q 输出脉冲宽度及脉冲峰值功率

4.1 测试实验结果

实验利用漫反射屏将激光脉冲漫反射, 对漫反射光脉冲选用光电探测器(响应时间 $\leq 1\text{ms}$) 探测, 在调 Q 条件下, 用 Tektronix TDS1012B 型示波器(频带宽度为 100MHz) 进行脉冲宽度测试。当泵浦电压在 $550 \sim 900\text{V}$ 之间逐渐增大时, 输出脉冲波形如图 3 所示, 可得出随着泵浦电压的增加, 输出脉冲

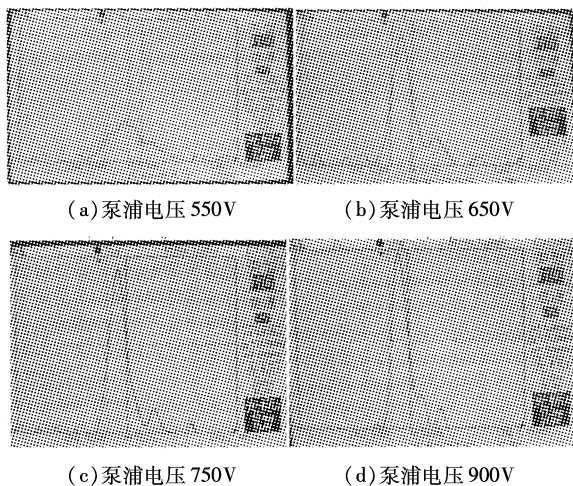


图3 不同泵浦电压下的脉冲波形

表2 YAG 输出脉冲宽度随泵浦电压变化的实验数据

U/V	τ/ns										均值	稳定性/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
550	15.60	16.80	15.60	15.60	18.00	16.80	16.40	19.20	15.60	18.40	16.80	14.3
560	14.40	16.00	14.40	12.80	12.80	12.00	12.40	13.20	16.00	13.00	13.70	16.8
570	12.80	10.80	14.00	14.00	13.20	12.80	14.40	13.60	14.40	14.80	13.28	18.7
580	10.00	13.60	9.60	10.40	10.80	11.20	11.20	10.80	12.80	11.40	11.18	21.6
600	9.60	8.80	13.20	11.20	8.40	10.80	10.00	12.80	10.80	10.00	10.56	20.4
620	8.80	9.60	12.80	9.20	11.20	12.80	8.40	9.60	10.40	11.40	10.42	19.4
650	9.60	11.60	8.40	10.40	9.20	8.80	8.800	9.00	9.60	11.00	9.64	20.3
700	8.40	9.20	9.60	9.20	8.40	9.20	9.600	8.80	10.40	10.00	9.28	12.1
750	10.00	9.60	8.40	9.60	8.80	9.60	8.400	8.80	8.00	9.20	9.04	11.5
800	8.80	8.40	8.80	8.00	9.60	9.20	8.800	9.20	10.40	8.60	8.98	16.9
850	8.00	7.60	9.20	8.20	8.80	9.20	9.200	8.40	8.80	7.60	8.50	10.5
900	7.80	8.20	9.20	9.60	8.00	7.20	9.200	8.80	8.20	7.60	8.38	14.6

宽度不断减小, 脉冲的幅值不断增加。输出脉冲宽度随泵浦电压变化的实验数据如表 2 所示。输出脉冲峰值功率随泵浦电压变化的数据如表 3 所示。

表3 输出脉冲峰值功率随泵浦电压变化的数据

电压/V	550	600	650	700	750	800	850	900
峰值功率/MW	2.17	5.47	7.72	9.75	11.88	13.96	16.89	19.13

实验结果: ①当电压从 $500 \sim 950\text{V}$ 逐渐增大时, 激光器的单次, 脉冲宽度从 $16.8 \sim 8.38\text{ns}$ 逐渐变小, 变化曲线关系如图 4 所示。②电压在 $500 \sim 950\text{V}$ 逐渐增大时, 激光器的单次脉冲能量在多次测量中稳定性从 21.6% 提高到 10.5% , 稳定性较差。但相比较电压在 $700 \sim 850\text{V}$ 时, 激光器的单次脉冲宽度较稳定。③电压在 $500 \sim 950\text{V}$ 逐渐增大时, 激光器的单次脉冲峰值功率近似线性增加, 如图 5 所示。

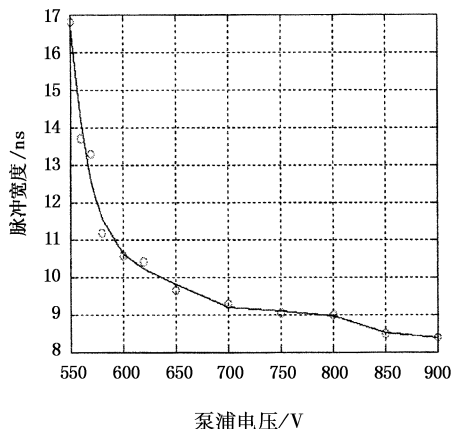


图4 输出脉冲宽度曲线

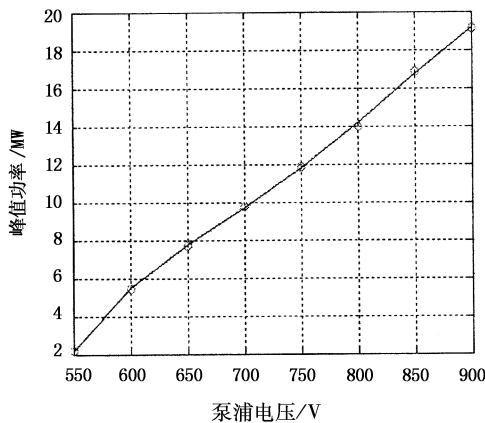


图5 输出脉冲峰值功率

4.2 实验结果分析

由速率方程组式(1)、式(2)可解得调 Q 巨脉冲的时间特性^[9,11]:

$$\tau = \frac{t}{t_c} = - \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{n \left(l_n \frac{n}{n_i} + \frac{n_i}{n_i} - \frac{n}{n_i} \right)} \quad (4)$$

这个积分不易直接求得解析解,可根据已知条件,利用数值积分来求得数值解。当式(4)中 $n_1 = n_i, n_2 = n_i$ 时,可算出脉冲左半部分的波形,即上升段的波形;当取 $n_1 = n_i, n_2 = n_f$ 时,便可计算出右半部,即脉冲下降段的波形。由于激光脉冲的宽度是以脉冲半功率点间的宽度来计算的,因此在上升段,要求计算出 $\Phi_{\max}/2$ 到 Φ_{\max} 的时间 Δt_r ,在下降段要求计算出 Φ_{\max} 到 $\Phi_{\max}/2$ 的时间 Δt_f ,脉冲宽度 $\Delta t = \Delta t_r + \Delta t_f$ 。由数值计算可知,当 n_i/n_i 值增大时,激光脉冲的上升时间迅速缩短;而下降时间由于主要取决于光子在谐振腔中的自由衰减寿命。因此,各脉冲波形的下降时间变化不大。由于随着泵浦电压的增加, n_i/n_i 的值也增加,则脉冲宽度减小。

利用调 Q 得到的激光虽然单个脉冲能量不大,但是由于脉宽窄,其峰值功率很高,而光与物质相互作用时,峰值功率起主要作用。

$$\text{由公式 } P_{\max} = \frac{E_{\text{out}}}{\tau} \quad (5)$$

可计算得出 YAG 激光器的动态输出峰值功率。

调 Q 情况下,峰值功率有如下关系:

$$P_{\max} = h\nu\Phi_{\max}\delta_0 \approx \frac{1}{4}h\nu \frac{v}{L} Tn_i \left(\frac{n_i}{n_i} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

其中, Φ_{\max} 为腔内光子数最大值; δ_0 为输出镜单位时间内光能量的衰减率; h 为普朗克常数; ν 为激光振荡频率; v 为光在谐振腔内的运动速度; T 为谐振腔的输出反射镜的透过率。由于随着泵浦能量的增

加, n_i/n_i 的值也增加,由公式(5)可知峰值功率也随之增加。

5 结论

(1) 当电压从 500 ~ 950V 逐渐增大时,激光器的单次脉冲能量逐渐变大,且满足近似线性变化关系;激光器的单次脉冲能量在多次测量中稳定度从 2.9% 提高到 0.5%,稳定性较好。

(2) 当电压从 500 ~ 950V 逐渐增大时,激光器的单次脉冲宽度逐渐变小,激光器的单次脉冲能量在多次测量中不确定度从 21.6% 提高到 10.5%,稳定性较差,激光器的单次脉冲峰值功率近似线性增加。

(3) 研究表明电压在 700 ~ 900V 时,激光器的单次脉冲能量和单次脉冲宽度较稳定,不确定度分别近似为 1% 和 13%。

参考文献:

- [1] Barryl P, Anand Arajah P. Effect of side-mode suppression ratio on the performance of self-seeded gain-switched optical pulses in light wave communications systems [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11 (11): 1360 - 1362.
- [2] Zheng Quan, Zhao Ling, Qian Long-sheng. Single-frequency operation of a diode-pumped green laser using multi-Brewster plates [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1 (8): 480 - 481.
- [3] 莫霜, 曲彦臣, 等. 主被动调 Q - 锁模 Nd:YAG 激光器的实验研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (8): 722 - 724.
- [4] 冯衍, 毕勇, 张鸿博, 等. 20W 腔外倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器 [J]. 光学学报, 2003, 23 (4): 469 - 471.
- [5] 刘辉兰, 王红梅, 等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 锁模激光器的输出特性 [J]. 河北师范大学学报 (自然科学版), 2007, 31 (6): 752 - 756.
- [6] 张秋琳, 苏红新, 等. LD 抽运被动调 Q 固体激光器的脉冲稳定性 [J]. 物理学报, 2007, 56 (10): 5818 - 5821.
- [7] 裴为华, 宋丽君, 宋晏蓉, 等. Cr:YAG 激光器的实验研究 [J]. 激光与红外, 2002, 32 (3): 177 - 120.
- [8] 李红艳, 翟利华, 任向军, 等. YAG 激光器输出特性的分析 [J]. 激光杂志, 2003, 24 (3): 0017 - 0020.
- [9] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002, 5 - 46.
- [10] 段存丽, 赵顺阳. 会聚偏振光干涉法测量波片相位延迟量 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (6): 576 - 579.
- [11] 徐荣甫, 刘敬海. 激光器件与技术教程 [M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1986: 156 - 179.