

基于晶体电光效应的 Nd^{3+} : YAG 激光器调 Q 实验

郭明磊¹, 韩新风¹, 官邦贵¹, 章毛连²

(1. 安徽科技学院 理学院, 安徽 凤阳 233100; 2 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了定量研究由偏振片和 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体构成的电光 Q 开关在脉冲 Nd^{3+} : YAG 激光器中的应用, 在阐述晶体电光效应如何实现激光器调 Q 基本原理的基础上, 从调 Q 激光器的速率方程出发分析调 Q 脉冲的形成过程, 对调 Q 脉冲的峰值功率、脉冲宽度特性进行了分析, 表明控制反转粒子数密度对提高调 Q 脉冲质量的重要性。依据所建的激光调 Q 系统最终实现了 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体电光调 Q、小孔选模、本征级放大、倍频波长 532 nm 的激光输出, 并对调 Q 前后的激光脉宽、能量进行实验测量与对比分析。实验系统分本征级与放大级两级设计, 不仅压缩了激光突发脉冲宽度使其小于 20 ns, 获得了高的峰值功率, 还进一步提高了激光输出能量达到 500 mJ。

关键词: 激光技术; 电光效应; 调 Q

中图分类号: TN 248 13 文献标识码: A 文章编号: 1006- 7167(2010) 12- 0023- 04

The Experiment of Q-Switched Nd^{3+} : YAG Laser Based on the Crystal Electro-Optic Effect

GUO Ming-lei¹, HAN Xin-feng¹, GUAN Bang-gui¹, ZHANG Mao-lian²

(1. College of Science, Anhui University of Science and Technology, Fengyang 233100, China)

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract In order to investigate quantitatively the application of electro-optic Q-switch composed of polarizing plate and $\text{KD}^* \text{P}$ crystal to Nd^{3+} : YAG laser. The basic principle and method of Q-switched Nd^{3+} : YAG laser to crystal electro-optic effect were illuminated firstly. Based on the rate equation of Q-switched laser, the output energy and pulse width were analyzed. The results illustrate that the reversal particle density is important to improve the quality of Q-switched pulsed laser output. The apparatus of Nd^{3+} : YAG laser with Q-switched, Mode-locking, Frequency doubling and laser magnifying is established ultimately. Experiments and analysis on laser impulse width and laser output energy were conducted before and after Q-switch. The experiments system was divided into two levels: latent level and magnifying level, which yielded high peak power realized through compressing the laser pulse width less than 20 ns. Furthermore, the laser output energy is increased to 500 mJ.

Key words laser techniques; electro-optic effect; Q-switched

1 引言

调 Q 技术是将激光能量压缩到宽度极窄的脉冲中发射, 从而获得窄脉宽、高峰值功率激光脉冲的重要

技术^[1]。利用晶体的电光效应, 即晶体的折射率在外加电场的作用下而发生变化的现象, 可做成电光 Q 开关器件。电光调 Q 因其具有开关时间短、效率高、输出脉宽窄、峰值功率高、调 Q 时刻可以精确控制等优点, 是目前应用比较广泛的一种调 Q 技术^[2-4]。对激光调 Q 的实验研究包括基横模选择、发光特性测试、驱动电路、转换效率等, 有助于加深对激光调 Q、激光放大、激光选模和激光调制等关键技术的理解和应用^[5-7]。本文主要通过调 Q 前后的脉宽和能

收稿日期: 2010-04-20

基金项目: 安徽科学研究所引进人才科研项目 (ZRC2008182); 安徽省教育厅研究课题 (2008jyxm338)

作者简介: 郭明磊 (1980-), 男, 山东临沂人, 讲师, 现主要从事激光技术应用研究。Tel: 15855037319; E-mail: Guom199@163.com

量进行实验测量, 研究由偏振片和 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体构成的电光 Q 开关在脉冲 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 激光器中的应用, 达到定量研究的目的。

2 基本原理

电光调 Q 的理论基础是晶体的电光效应^[8]。激光谐振腔中 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体横向电光调 Q 的实验原理如图 1 所示。在氙灯的光泵浦下, $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 激光棒发射自然光, 通过偏振方向平行于电光晶体的 x 方向的偏振器后, 变成沿 x 方向的线偏振光。当在晶体 x 方向加上电场时, 晶体感应轴为 x', y' , 相当于 x, y 绕 z 轴旋转了 45° 。设经过起偏器所得的为沿 x 方向的线偏振光, 不妨设定它沿 x', y' 方向振幅的分量分别为 $E_{x'}(0) = E_{y'}(0) = A$, 当线偏振光通过长为 l 厚为 d 的电光晶体后, x', y' 方向上折射率不同, 两分量之间会产生相位差 δ 。根据文献 [9], 使 $\delta = \pi$ 时的电压值即为半波电压

$$U_{\pi} = U_{\lambda/2} = \frac{\lambda_0 d}{n_o^3 \gamma^{63} l}$$

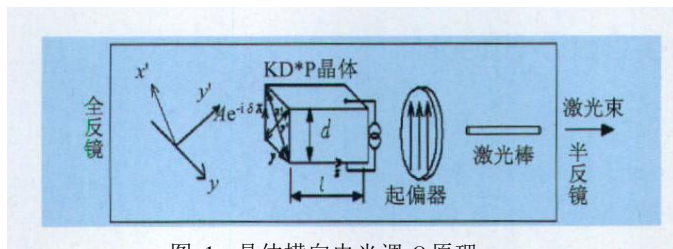


图 1 晶体横向电光调 Q 原理

若在 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体上施加一个 $U_{\lambda/4}$ 的外加电压, 则调制晶体起到 $1/4$ 波片的作用, 线偏振光通过晶体后产生了 $\pi/2$ 的位相差, 在这种情况下, 从晶体出射后的光为圆偏振光。经过全反镜反射回来, 再次通过调制晶体后, 又会产生 $\pi/2$ 的相位差, 往返一次共产生了 π 的相位差, 出射光以沿 y 方向的线偏振态再次经过偏振器, 因不能够通过, 故不能形成激光振荡。但由于氙灯一直在对 YAG 棒进行抽运, 工作物质中反转粒子数便得到足够的积累, 当粒子反转数达到最大时, 突然去掉调制晶体上的 $U_{\lambda/4}$ 电压, 此时沿谐振腔轴线方向传播的激光可自由通过调制晶体, 而其偏振状态不发生改变, 获得峰值功率极高的巨脉冲激光输出, 并称该谐振腔处于高 Q 状态^[10]。

3 理论分析

普通脉冲固体激光器, 上能级的粒子数会因激光振荡而减少, 不能积累很大的反转粒子数, 因而不能有很高的峰值功率。对于调 Q 脉冲激光器, 却可以产生很高的峰值功率。通常用一个简化的二能级模型, 借助调 Q 激光器的速率方程, 分析调 Q 脉冲的峰值功率、脉冲宽度等特性。根据文献 [11], 调 Q 脉冲激光

器典型的速率方程为 2 个相关联的方程:

$$\frac{d\phi}{dt} = \left[\frac{n}{n_1} - 1 \right] \delta\phi \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -2 \frac{n}{n_1} \delta\phi \quad (2)$$

方程 (1) 反映了激光腔中的光子数密度 ϕ 与反转粒子数密度 n 、阈值反转粒子数密度 n_1 之间的关系, n_1 是恰可以产生激光振荡时的反转粒子数密度, 只有 $n > n_1$ 时才可产生激光发射。方程 (2) 反映了反转粒子数密度的变化率 dn/dt 是光子数变化率的 2 倍, 即每产生 1 个光子, 上能级粒子数减 1 个, 下能级粒子数加 1 个, 反转粒子数减 2 个。

调 Q 过程中对 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体施加或去掉 $U_{\lambda/4}$ 外加电压, 可认为是 Q 值发生阶跃的过程。阶跃前, 不产生激光振荡, 实际上是 n_1 积累至初始反转粒子数密度 n_1 的过程; 阶跃后, 产生激光振荡, 能持续到反转粒子数密度由 n_1 变为 n , 光子数密度 ϕ 则由 0 变化到最大值 ϕ_m 。

由两速率方程得

$$\frac{d\phi}{dn} = \frac{1}{2} \left[\frac{n_1}{n} - 1 \right] \quad (3)$$

利用积分:

$$\int_0^{\phi_m} d\phi = \int_{n_1}^n \frac{1}{2} \left[\frac{n_1}{n} - 1 \right] dn \quad (4)$$

可以得出

$$\phi_m = \frac{1}{2} n_1 \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 + \ln \frac{n_1}{n_1} \right] \quad (5)$$

用泰勒级数展开

$$\ln \frac{n_1}{n_1} = - \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 \right]^2 - \frac{1}{3} \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 \right]^3 + \dots \quad (6)$$

得近似式

$$\phi_m = \frac{1}{4} n_1 \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 \right]^2 \quad (7)$$

因为调 Q 脉冲的峰值功率与 ϕ_m 成正比, 则由关系式 (7) 得到在 $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ 不同情况下, 峰值功率 P 与 n_1 的关系曲线, 如图 2 所示。

根据式 (2)

$$dt = - \frac{n_1}{2n \delta\phi} dn \quad (8)$$

为了近似地反映调 Q 脉冲波形, 不妨把 ϕ 把式 (7) 代入 (8), 得

$$dt = - \frac{2}{n \delta} \left[\frac{n_1}{n_1} - 1 \right]^{-2} dn \quad (9)$$

脉冲上升时间为:

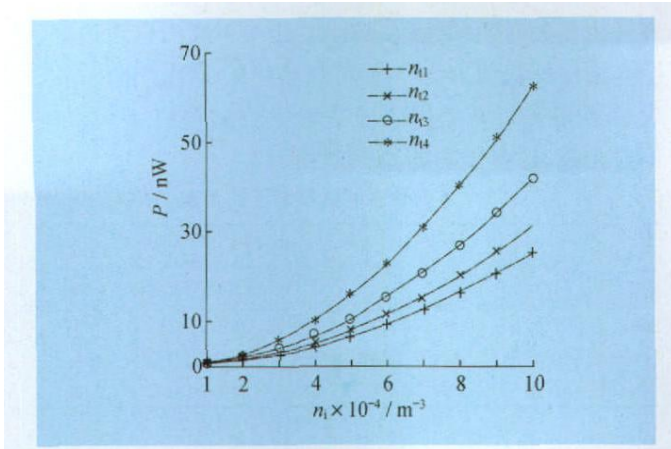


图 2 功率与反转粒子数密度关系曲线

$$t_1 = \int_{n_i}^{n_f} -\frac{2}{n\delta} \left(\frac{n_i}{n_i} - 1 \right)^{-2} dn = -\frac{2}{\delta} \left(\frac{n_i}{n_i} - 1 \right)^{-2} \ln \frac{n_f}{n_i} \quad (10)$$

脉冲下降时间为:

$$t_2 = \int_{n_i}^{n_f} -\frac{2}{n\delta} \left(\frac{n_i}{n_i} - 1 \right)^{-2} dn = -\frac{2}{\delta} \left(\frac{n_i}{n_i} - 1 \right)^{-2} \ln \frac{n_f}{n_i} \quad (11)$$

式中, n_f 是脉冲停止时的反转粒子数密度。依据式 (10)、(11), 画出 $n_1 > n_2$ 2 种情况下, 调 Q 脉冲波形如图 3 所示。可以看出, 脉冲信号前沿变化快, 后沿变化慢, 这是由前沿为受激辐射后沿是腔内光子自由衰减造成的。另外提高抽运速率以增大 n_i , 设计合适的谐振腔结构以减小 n_i 可以有效地提高调 Q 的脉冲质量。

4 实验装置

激光调 Q 放大系统主要结构如图 4 所示, 激光工作物质为 Nd³⁺:YAG 激光棒, 泵浦源采用脉冲氙灯, 用半导体激光器做系统准直, 谐振腔由相对平行放置的 2 面镜子构成, 冷却水系统采用液体冷却。

Nd³⁺:YAG 激光棒受到泵浦脉冲氙灯的照射时, 掺杂离子被激发, 通过谐振腔的调节, 形成高的反转粒子数分布, 因受激辐射放大产生激光。调 Q 的工作程序为: 首先激光主电源对电容充电, 接于氙灯电极, 但

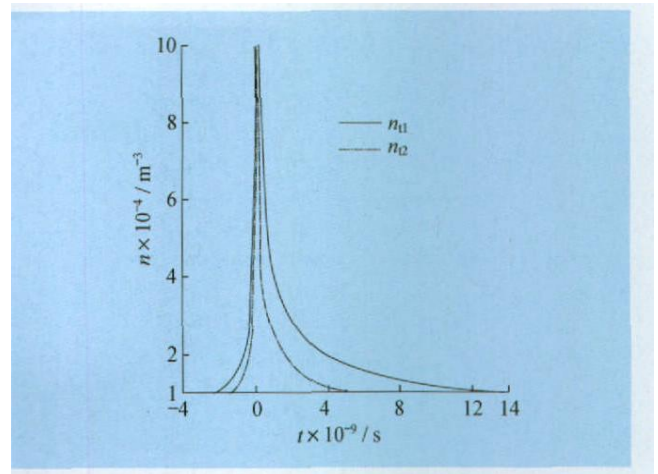


图 3 调 Q 脉冲波形

不点燃; 开动晶体电源对 KD*P 晶体加 $U_{\lambda/4}$ 的外加电压; 由时标信号发生器产生信号, 以控制激光主电源停止对电容充电, 同时控制触发器, 点燃氙灯, 激光棒受到激励后, 上能级反转粒子数大量积累, 却因 KD*P 晶体加 $U_{\lambda/4}$ 的外加电压, 不能形成激光振荡; 通过延时电路, 将 KD*P 晶体 $U_{\lambda/4}$ 电压去掉, 谐振腔形成激光振荡, 获得高功率本征级激光脉冲。调节小孔光阑位置, 得到 TEM₀₀ 基模输出; 将本征级激光输入放大级系统, 由控制电路和延时器控制获得高能量激光脉冲。

5 实验结果

将调整架放到导轨上, 以棒中心高度为准, 移动小孔光阑, 调节半导体激光器, 使光通过小孔。调节两腔镜架和聚光腔架, 使小孔光阑能通过两腔镜和激光棒中心, 且反射像均回到小孔。安好电源系统, 运转激光器, 微调腔镜, 加入倍频晶体, 使输出波长为 532 nm 的激光, 在感光相纸上打出均匀的圆光斑, 即实现基模输出。调节光路, 使输出光斑最好, 连接好示波器, 用热释电探头和脉冲探头分别测量能量和激光脉宽。

实验结果表明, 通过调 Q 技术可以使激光突发脉冲宽由 73 12 μs 压缩至 18 92 ns 如图 5 所示, 得到单

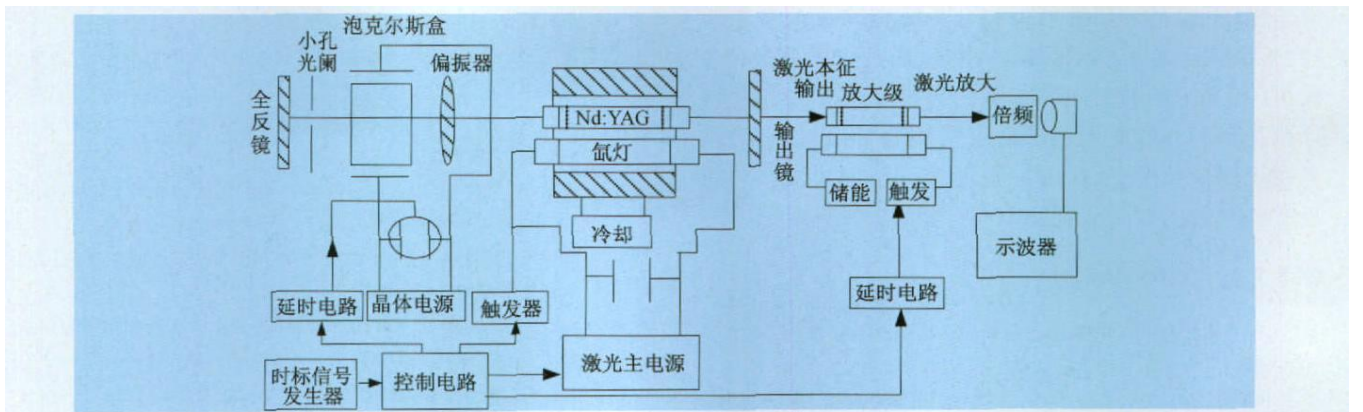


图 4 调 Q 激光器实验系统图

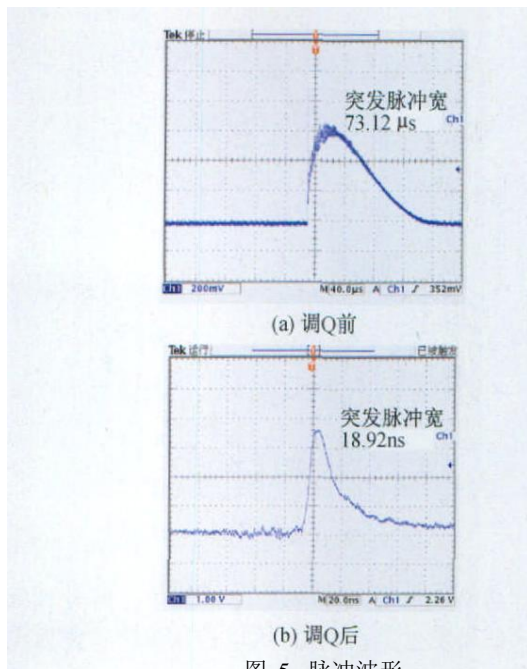


图 5 脉冲波形

色性好的激光脉冲。因为脉宽压缩了近 3 个数量级, 这样把能量压缩在极短的时间内释放, 必定可获得极高的峰值功率, 达到兆瓦级以上的功率。但是通过调 Q 前激光能量输出和调 Q 本征级能量输出的实验测量可知, 激光器实际上所输出的能量并不一定很大, 而是与调 Q 前相差无几 (见表 1)。利用激光放大技术, 通过在激光本征级后加一个放大器, 可以获得高能量激光, 放大级的能量输出是本征级能量的 2~4 倍, 激光输出能量数值对比于表 1。激光放大器虽然没有谐振腔, 但工作物质在光泵浦作用下处于粒子数反转状态, 当本征级输出的激光进入放大器时, 产生共振跃迁得到激光放大。实验中实现高效率调 Q 的方法: ①精确控制 Q 开关的延迟时间, 在激光上能级反转粒子束

(上接第 22 页)

5 结 语

由上述实验结果分析可知, 利用面阵 CCD 测量衍射光强, 再通过计算机采集和分析数据来反演微粒直径, 不仅极大地增加了数据的质量, 而且由于采集速度极快 (相当于给衍射图样拍照), 因此克服了使用检流计测量衍射光强的不稳定性带来的测量误差, 有效地提高了测量精度, 从而进一步提升了衍射法测微粒直径实验的教学效果和说服力。

参考文献 (References):

- [1] 陈飞明, 曹万民, 韩苏雷. 衍射光强分布规律的计算机采集与分析 [J]. 洛阳工学院学报, 2000(2): 73-76.
- [2] 戴兵, 包志华, 贺安之, 等. 用数码相机测量颗粒尺寸分布的研究 [J]. 激光与红外, 2001(2): 124-127.

数达到最大时, 立即去掉晶体上的 $1/4$ 波长电压最好。
②严格保证起偏方向与 KD^* P 晶体的 x 轴方向一致, 起偏器与 KD^* P 晶体感应主轴方位的偏离不仅影响出射光强, 还将影响调 Q 的效率。

表 1 激光输出能量与电压的关系 mJ

	电压 /V					
	500	520	540	560	580	600
未调 Q 激光能量	56.3	78.6	94.8	119.2	147.1	165.6
调 Q 本征级能量	61.7	86.1	104.7	124.2	142.1	165.2
调 Q 放大级能量	250.5	311.7	355.8	438.2	482.3	538.2

参考文献 (References):

- [1] 李相银. 激光原理技术及应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 338-339.
- [2] 沈洪斌, 刘秉琦, 李刚, 等. LD 抽运 Nd:YAG/KTP 腔内倍频连续绿光激光器实验研究 [J]. 物理实验, 2008, 28(8): 1-4.
- [3] 尚卫东, 李发丹, 薛海, 等. Nd³⁺:YAG 固体激光器电光调 Q 激光脉冲的时域分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 39(4): 633-636.
- [4] 李继武, 李忠洋, 钟凯, 等. 电光调 Q 1064 nm / 532 nm 脉冲激光器 [J]. 应用激光, 2008, 28(3): 230-233.
- [5] 吴浚浩. 脉冲 Nd³⁺:YAG 激光器基横模选择的实验研究 [J]. 物理实验, 2007, 27(6): 3-6.
- [6] 陈颖, 撒昱, 叶志生, 等. 固体激光器的快速电光 Q 开关驱动电路的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1613-1616.
- [7] 王玮. YAG 电光调 Q 激光器发光特性的测试 [J]. 光学仪器, 2008, 30(4): 11-15.
- [8] 倪新蕾. 电光调制及其应用 [J]. 中山大学学报论丛, 2002, 22(1): 34-37.
- [9] 赵建林. 高等光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 116-117.
- [10] W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文译. 北京: 科学出版社, 2002: 132-169.
- [11] 蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 88-89.

- [3] 赵焕卿, 乐连平, 章志鸣. 激光衍射法测量雾滴和微粒的尺寸 [J]. 应用激光, 1987(2): 61-65.
- [4] 赵凯华, 钟锡华. 光学 (上) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 191-192, 210-214.
- [5] HAROLD N. FROCK, 冯克猷. 利用光散射法测量微粒尺寸 [J]. 国外计量, 1990(5): 4-5.
- [6] 陈刚. 光散射法测量颗粒尺寸和浓度的实验研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 7-15.
- [7] 杜梅芳. 光电池性能参数的探讨 [J]. 哈尔滨师范大学学报 (自然科学版), 1999(2): 41-43.
- [8] 王清华, 简森夫, 张少明, 等. 激光衍射法测试颗粒形状的模拟 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2003(4): 60-63.
- [9] 郭明安, 李斌康, 阮林波. 高分辨 CCD 图像采集系统的实现 [J]. 电视技术, 2003(6): 49-50.
- [10] 江涛, 罗志勇, 王斌. 面阵 CCD 自动检测系统中图像等距采集的智能实现 [J]. 半导体光电, 1995(3): 256-259.
- [11] 杜良. 单透镜成像系统的分数维傅立叶变换分析 [J]. 应用激光, 2000(5): 201-204.