

连续 Nd·YAG 激光高重复率电光调 Q 研究*

宁国斌 梁 柱 赵振明 梁作亮

(长春光学精密机械学院科技开发中心, 长春 130022)

摘 要 研究了连续 Nd·YAG 激光器中由于热效应使 YAG 棒产生的双折射引起传输的线偏振光退偏为椭圆偏振光的退偏现象所产生的输出不稳定和多模的原因。电光调 Q 技术被应用于连续氦灯抽运的 Nd·YAG 激光器件。为了获得稳定、单模的输出, 在谐振腔内放置了一对 $\lambda/4$ 波片。通过实验研究, 实现了重复频率 1~ 5 kHz 的窄脉冲激光输出, 这将为连续抽运的 Nd·YAG 激光器提供一种新的电光调 Q 技术。

关键词 连续激光电光调 Q, 高重复率, 退偏损耗。

1 引 言

目前, 连续抽运的 Nd·YAG 激光器, 输出高重复率窄脉冲激光, 基本上采用的是声光调 Q 技术。声光调 Q 激光器输出的激光脉冲宽度, 大约在 100~ 300 ns^[1], 具有装置比较复杂, 使用不方便, 容易产生热效应等不利因素。然而, 应用于脉冲激光器中的电光调 Q 技术, 调 Q 激光脉冲宽度在 10 ns 左右, 显示出结构简单, 插入损耗较小, 调节方便, 稳定可靠等优点。电光晶体能够响应频率为 10^{10} 次/秒的电场变化, 所以利用电光效应可以制成高速电光快门, 理论上的开关时间可达 10^{-10} 秒^[2]。电光晶体的开关时间, 远小于激光谐振腔内激光脉冲建立时间, 并且激光谐振腔内光场的有限建立时间和重新抽运到粒子数反转所需要的时间决定了 Q 开关激光器可达到的重复频率的上限。Q 开关 Nd·YAG 激光器最高重复频率约为 50~ 100 kHz。

本文将电光调 Q 技术应用于连续抽运 Nd·YAG 激光器, 可以获得高重复率的窄脉冲激光输出, 代替声光 Q 开关 Nd·YAG 激光器。在分析连续抽运四能级系统的速率方程基础上, 对连续氦灯抽运 Nd·YAG 激光进行电光调 Q 的实验研究, 实现连续 Nd·YAG 激光重复率为 1~ 5 kHz 的电光调 Q。

2 连续抽运高重复率调制阈值

对于 Nd·YAG 激光器, 在连续抽运速率和自发衰减的影响下, 谐振腔低 Q 值的时间内, 反转粒子数 n_2 由下述方程表示

$$\frac{dn_2}{dt} = W_p(n_{\text{tot}} - n_2) - \frac{n_2}{\tau_1}, \quad (1)$$

* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1999-02-23; 收到修改稿日期: 1999-09-13

式中

$$n_{tot} = n_0 + n_2, \tag{2}$$

τ_d 为自发衰减时间, n_0 为工作物质基态粒子数。

在 $n_2 \ll n_{tot}$ 时, 解方程 (1) 得

$$n_2(t) = n_\infty - (n_\infty - n_f) \exp(-\frac{t}{\tau_d}), \tag{3}$$

式中 $n_\infty = \omega_p \tau_d n_{tot}$ 是当 t 大于自发衰减时间 τ_d 时所接近的渐近值。 n_f 是调 Q 脉冲形成后的剩余反转粒子数。 Q 开关重复率为 f 时, 调 Q 脉冲

之间建立反转粒子数的最大时间是 $t = 1/f$, 所以反转粒子数为

$$n_2 = n_\infty - (n_\infty - n_f) \exp(-\frac{1}{\tau_d f}), \tag{4}$$

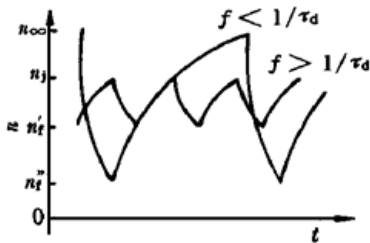


Fig. 1 Inverted population varies periodically with f

它是反转粒子数在每个 Q 开关周期以后返回到它初始时的数值。这个初始数值与调 Q 重复率 f 有关, 如图 1 所示。当 $f < 1/\tau_d$ 时, n_2 周期地由前一次剩余反转粒子数 n_f'' 升到 n_∞ , $f > 1/\tau_d$ 时, n_2 周期地由前一周期剩余反转粒子数 n_f' 升到某一值 n_j 。

率方程为

Wagner 等人关于单个 Q 开关脉冲的理论, 也适用于连续抽运 Nd·YAG 调 Q 激光器系统。由方程(4) 描述的反转粒子数随时间周期性的变化, 在每个变化周期内, 满足调 Q 的速率方程为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \Phi(\frac{c\sigma n_2 l}{l'} - \frac{\epsilon}{t_R}), \tag{5}$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -\Phi n_2 \sigma c, \tag{6}$$

式中 l', l 分别为谐振腔长和 Nd·YAG 棒长度。 $t_R = 2l'/c$, 表示光子在谐振腔内的往返时间。 $\epsilon = -\ln R_1 + l + \xi(t)$, 是激光在谐振腔内每次往返的损耗, 其中第一项为耦合损耗, 第二项包含散射、衍射、吸收等损耗, $\xi(t)$ 表示 Q 开关引入的腔损耗。

当 $d\Phi/dt = 0$ 时, 由 (5) 式可以解出阈值时反转粒子数

$$n_t = \frac{\epsilon}{2\sigma l}. \tag{7}$$

取 (5) 式和 (6) 式的商, 消去方程中的时间参数得

$$\frac{d\Phi}{dn_2} = -\frac{l}{l'}(1 - \frac{n_t}{n_2}). \tag{8}$$

积分 (8) 式, 取 $n_2(t) = n_t$ 时, 可以得到腔内最大光子密度:

$$\Phi_{max} = \frac{l}{l'}(n_t \ln \frac{n_t}{n_i} + n_i - n_t). \tag{9}$$

在光子衰减的寿命时间 $\tau_c = t_R/\epsilon$ 内, 腔内峰值功率为

$$P_{peak} = \frac{\Phi_{max} S l h \nu}{\tau_c}, \tag{10}$$

式中 S 是 Nd·YAG 棒横截面。将 (10) 式乘以透过率因子 $\ln(1/R_1)/\epsilon$, 得到谐振腔输出的峰

值功率为

$$P_{\max} = \frac{lvhv}{l'T_{\text{tr}}} [n_i - n_t(l + \ln \frac{n_i}{n_t})] \ln \frac{1}{R_1}. \quad (11)$$

由(9)式、(11)式可以看出,当激光器的阈值反转粒子数 n_t 与初始反转粒子数 n_i 相当时,谐振腔内没有光子积累,谐振腔没有激光输出。在 n_t 降到最低时,腔内积累光子最多,由谐振腔输出的激光功率最大。由(7)式和图1可知,应用电光效应引入一种谐振腔损耗机制,产生腔损耗 $\xi(t)$ 高重复率周期变化,使 n_t 在 n_t'' 与 n_∞ 或 n_t' 与 n_j 之间高频振荡,从而谐振腔以高重复率输出最大功率的激光。

3 连续激光高重复率电光调 Q 实验

采用连续氙灯抽运 Nd·YAG 激光器,进行电光调 Q 实验。Nd·YAG 介质的直径为 $\phi 6$ mm,长 $l = 75$ mm,阈值抽运电功率 0.9 kW。谐振腔选取平凹腔,平面输出镜反射率 $R_1 = 85\%$,曲率半径为 2000 mm 的凹面全反射镜,反射率 $R = 100\%$,谐振腔长 $l' = 500$ mm。连续抽运 Nd·YAG 高重复率电光调 Q 激光装置如图 2 (a) 所示。当激光器为两膜一棒时,实验测得输出连续激光功率与抽运输入功率的关系曲线如图 2 (b) 所示,抽运功率为 2.5 kW 时,输出连续激光为 21 W。为了观察方便,用 KTP 晶体倍频器,对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光倍频,这时可观察到连续输出的波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 的激光。把布儒斯特偏振片和 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体置入谐振腔内,并进行适当调节,使谐振腔内振荡的激光为偏振光。绕 Nd·YAG 激光棒轴线旋转布儒斯特偏振片,当旋转到某一角度时,可以使激光器输出达到最大;再继续旋转偏振片到某一位置,激光器输出则变为最小,这时在偏振片反射方向测得有近 4.8 W 的激光,并且随氙灯注入电功率的增加而增大,损耗最大时的偏振片绕轴角度也在变。由于损耗特别严重,从 KTP 倍频器件几乎观察不到有绿光输出。而在抽运电功率恒定的情况下,激光器输出的激光功率和激光模式基本上不变。将 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体加上重复率为 1 kHz 的 $\lambda/4$ 电压并以退压开门工作方式,观察到倍频器件输出较亮的波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 激光。测得激光脉冲宽度为 19~ 22 ns,输出平均功率 430 mW。这表明已有调 Q 现象,从而实现连续抽运 Nd·YAG 激光的高重复率电光调 Q。

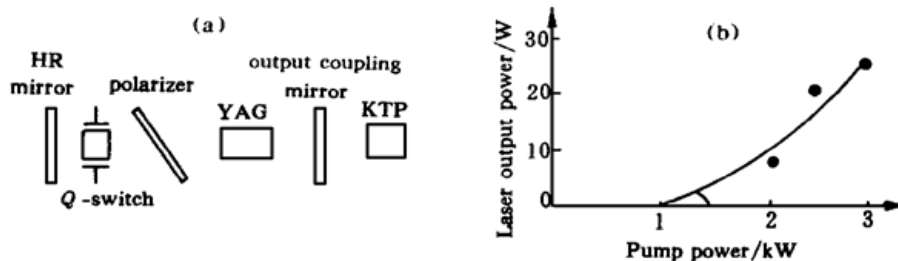


Fig. 2 (a) High repetition rate electrooptic Q-switched laser, (b) Dependence of the Nd·YAG laser output power on the pump power

将调 Q 晶体 $\text{KD}^* \text{P}$ 和偏振片放入谐振腔内进行调 Q 时,产生较大的损耗,并且多模输出,这种情况基本上是热效应产生退偏现象造成的。经偏振片起偏的线偏振光,通过由热效应产生双折射特性的 Nd·YAG 棒传输时,线偏振光退变为椭圆偏振光。当椭圆偏振光由腔镜反射通过偏振片时被起偏, p 支被反射离开谐振腔, s 支则透过,在谐振腔内振荡。s 支激光通过 Nd·YAG 棒放大同时退变为椭圆偏振光,再次通过偏振片时又被起偏, p 支被损耗

掉, s 支透过。激光在谐振腔内每往返一次, 就损耗近一半左右的光能, 从而大部分反转粒子数消耗在退偏损耗中, 致使激光器一直工作在高阈值状态。激光在谐振腔内经多次往返振荡后, 激光器一直保持在阈值附近工作。实验发现, 当抽运功率变化时, 退偏损耗和输出模式随之变化, 在抽运功率确定的条件下, 通过旋转偏振片, 可以获得最大激光输出, 但仍是多模的。

实验中, 在抽运功率确定的条件下, 转动偏振片至激光输出达最大的位置。为了获得窄脉冲和基模激光输出, 在谐振腔内放入 $\lambda/4$ 波片, 此波片和 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体构成加压开门式开关, 并且具有选模作用。图 3 所示的是双 $\lambda/4$ 波片加压开门式高重复率电光调 Q 激光器。图中谐振腔输出镜 M_1 为平面镜, 其反射率 $R_1 = 85\%$, 全反镜 M_2 为曲率半径为 2000 mm 的凹面反射镜, 腔长 $l' = 500$ mm。在 M_2 与 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 棒之间放置 $\lambda/4$ 波片, $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 棒与 M_1 之间放置 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体和偏振片。利用功率场效应晶体管高压调 Q 电路控制高重复频率开关。这种电路提供电脉冲的电压为 0~5000 V, 电脉冲前沿为 5 ns 左右, 加压时间为 10 μs 左右。当图 3 所示的激光器开始工作后, $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体加上 3700~4000 V 电压时, 激光器处于开门工作状态, 输出调 Q 激光脉冲。在谐振腔内, M_2 与 $\lambda/4$ 波片之间和加 $\lambda/4$ 电压的 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体与 M_1 之间传输的是线偏振光, 在 $\lambda/4$ 波片与加电场的 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体之间, 即 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 棒中振荡的是圆偏振光。这样有利于基模的选取。退掉 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体上的 $\lambda/4$ 电压后, 激光器处于关门工作状态。为了减小热效应的损耗起伏, 利用图 3 的装置, 在抽运功率确定的条件下, 通过改变调 Q 晶体上的电压, 能获得可调的激光输出功率。

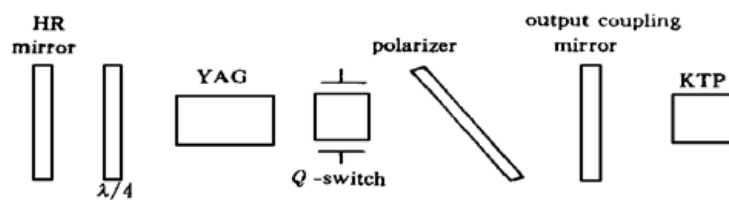


Fig. 3 High repetition rate electrooptic Q -switched laser with two $\lambda/4$ plates

还可以采用如图 4 所示的装置, 这种装置也具有选模作用, 但仍然是退压开门式高重复率电光调 Q 。

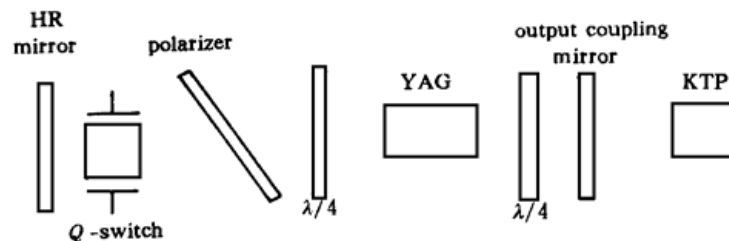
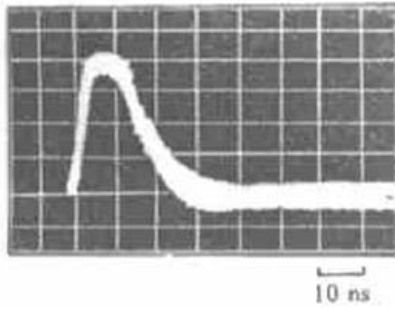
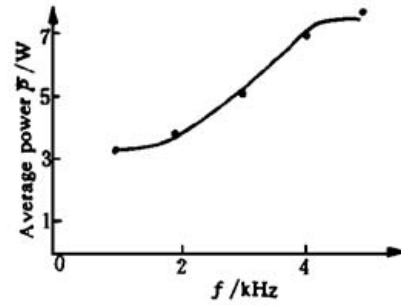


Fig. 4 High repetition rate electrooptic Q -switched laser

在抽运电功率仍然为 2.5 kW 时, 激光器输出的连续激光功率为 20.9 W。对循环冷却水进行制冷, 确保谐振腔内的温度基本恒定。将 $\text{KD}^* \text{P}$ 调 Q 晶体和偏振片置入谐振腔内, 如图 3 所示。当重复频率为 1 kHz 的电光调 Q 晶体工作时, 测得输出平均功率为 3.4 W, 调 Q 激光脉冲宽度为 14~15.6 ns, 激光脉冲波形如图 5 所示, 算得相应的调 Q 激光脉冲峰值功率为 0.22 MW。调 Q 重复率增加时, 输出平均功率也增加, 当重复率等于 5 kHz 时, 输出平均功率为 7.8 W。在连续抽运功率确定的条件下, 调 Q 激光器输出平均功率与调 Q 重复率的关系如图 6 所示的实验测试曲线。

Fig. 5 Pulse profile of Q -switchingFig. 6 Relationship between the average power \bar{P} and repetition rate f

结束语 通过对调 Q 理论的分析 and 连续抽运 Nd·YAG 激光高重复率电光调 Q 的实验研究表明, 电光调 Q 技术可以应用于连续 Nd·YAG 激光器中, 能获得高重复率窄脉冲激光。研究工作是在抽运功率固定的条件下进行的。当重复率为 1 kHz 时, 调 Q 激光脉冲幅值基本上是稳定的; 当重复率增高时, 调 Q 激光脉冲幅值开始出现微小抖动。

参 考 文 献

- [1] 克希奈尔 W. 固体激光工程. 华光译. 北京: 科学出版社, 1983. 459
 [2] 蒋民华. 晶体物理. 济南: 山东科学出版社, 1980. 381

High Repetition Rate Electrooptical Q -Switching of CW Nd·YAG Laser

Ning Guobin Liang Zhu Zhao Zhenming Liang Zuoliang

(Centre for Developing Science and Technology,

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 23 February 1999; revised 13 September 1999)

Abstract The instability and multi-mode oscillation of the output caused by depolarization of the linearly polarized light into the elliptically polarized light in transmission due to thermo-induced birefringence of the YAG rod are studied. Electrooptical Q switching technology is applied to the Nd·YAG laser pumped by a CW Kr lamp. To generate stable and single-mode output, a pair of $\lambda/4$ plates are arranged in the oscillator. Electrooptical Q -switching at a repetition of 1~ 5 kHz and a narrow-pulse-duration laser output are experimentally obtained. A novel electrooptical Q -switching technique is provided for CW Nd·YAG lasers.

Key words electrooptical Q -switching of CW laser, high repetition rate, depolarization loss.