

激光与光电子学进展

准连续波泵浦 Yb:KYW/Cr⁴⁺:YAG 调 Q 激光脉冲产生特性的研究张妮慧^{1,2}, 姚铭杰^{1,2}, 葛文琦^{1,2}, 张鸿博^{1,2*}¹中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 从被动调 Q 速率方程出发,理论上研究了准连续波激光二极管(LD)泵浦 Yb:KYW/Cr⁴⁺:YAG 激光器时泵浦参数对脉冲输出特性的影响,通过数值计算解析了调 Q 脉冲延时、脉冲宽度、子脉冲序列等特性与泵浦速率的关系,从而获得最优化泵浦光占空比,有效减少连续波泵浦产生的热效应。进一步,在实验上采用高重频 LD 泵浦源,通过调控泵浦参数实现了被动调 Q 激光的重复频率、脉冲延时、脉冲串子脉冲个数等输出特征的准确锁定和控制。当采用泵浦功率为 15.6 W、占空比分别为 6.50%、8.00% 和 9.65% 时,获得单脉冲、双脉冲和三脉冲的稳定输出,提高了泵浦脉冲和激光脉冲的耦合共振,实验结果与理论计算吻合较好。

关键词 激光器与激光光学; 被动调 Q; Yb:KYW; 准连续波泵浦; 脉冲产生; 脉冲串

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220459

Pulse Characteristics of Quasi Continuous-Wave Pumped Yb:KYW/Cr⁴⁺:YAG Q-Switched LaserZhang Nihui^{1,2}, Yao Mingjie^{1,2}, Ge Wenqi^{1,2}, Zhang Hongbo^{1,2*}¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;²Academy of Opto-Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A theoretical investigation of the influence of pump parameters of quasi-continuous-wave laser-diode (LD) pumped Yb:KYW/Cr⁴⁺:YAG laser on pulse characteristics based on passively Q-switched rate equations is presented. Through numerical calculation, the relationship between the characteristics of Q-switched pulse delay, pulse width, sub-pulse sequence, and pump rate is analyzed to obtain the optimal pump-light duty cycle and effectively reduce the thermal effect caused by continuous-wave pump. Furthermore, the high-repetition-rate LD pump source is used in the experiment, and the accurate locking and control of output characteristics such as repetition rate, pulse delay, and the number of pulse trains of the passively Q-switched laser are realized by adjusting the pump parameters. When the duty cycles of 15.6-W pump power are 6.5%, 8%, and 9.65%, stable outputs of single pulse, double pulse, and triple pulse, respectively, are obtained, and the coupling resonance of pump pulse and laser pulse is improved. The experimental results are in agreement with the theoretical calculation.

Key words laser and laser optics; passively Q-switched; Yb:KYW; quasi-continuous-wave pump; pulse generation; pulse chain

1 引言

小型化、紧凑型纳秒/亚纳秒短脉冲激光在激光雷达探测、激光测距、激光光谱分析、光追踪导航等方面

有着重要的应用^[1-6]。相对于主动调 Q 激光,被动调 Q 激光器结构紧凑成本低,由于 Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收晶体具备物化性能稳定、抗损伤阈值高、使用寿命长等优点而成为首选的调 Q 介质^[7]。采用连续波泵浦的被

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-01-24; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

基金项目: 中国科学院空天信息创新研究院人才计划启动支持项目(Y80B22A13Y)、国家自然科学基金(61835014, 62075221)、国家重点研发计划(2018YFB0504500)

通信作者: hbzhang@aircas.ac.cn

动调 Q 激光,在工作时,输出脉冲重复频率等受泵浦强度、晶体参数、器件温度等因素的影响较大,导致脉冲频率、脉宽等参数的稳定性差,难以准确控制,采用准连续波泵浦技术可有效控制被动调 Q 激光脉冲重复频率,研究泵浦参数与脉冲产生的关系,可使得调 Q 激光拥有更高的泵浦效率、更小的热效应和更大的峰功率。特别在敌我识别、激光测距等领域中^[8-9],对激光脉冲序列特征的控制有着更为严苛的要求,需在小的时序抖动下实现对激光脉冲的调控,因此,深入研究准连续波泵浦下的被动调 Q 激光的输出脉冲特性有十分重要的意义。

2003 年,郑权等^[8]在低于激光器阈值的可调直流预激励基础上叠加一周期、脉冲、电流幅度可调的激光二极管(LD)矩形波电流脉冲泵浦 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器,实验上通过调节矩形波电流占空比和周期,实现了被动调 Q 激光器单脉冲稳定输出和多脉冲发射状态。2005 年,段玉生等^[10]在被动调 Q Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG 激光器中将一控制 LD 聚焦到 Cr⁴⁺:YAG 上,实验中通过控制晶体的漂白程度从而实现调 Q 激光器脉冲输出时刻和个数的主动控制。2010 年, Lee 等^[11]对比了连续和准连续波泵浦被动调 Q Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器的脉宽、脉冲能量和脉冲间的时间延迟等输出特性,得到准连续波泵浦可主动控制脉冲频率以及大大减少脉冲抖动时间。2016 年, Zheng 等^[12]研究了强脉冲泵浦技术,采用重频 1 kHz、最大峰功率 400 W、脉宽 200 μs 的光纤耦合 LD 准连续波泵浦被动调 Q Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 激光器并结合非线性频率变换,最终得到峰值功率 1 MW 以上、低定时抖动的紫外激光输出。与掺 Nd³⁺激光器相比,掺 Yb³⁺激光器的主要优点是泵浦波长和激光波长更接近,量子缺陷低,保证了较低的热效应。其中,双轴晶体 Yb:KYW 具备较大的吸收和发射截面、较宽的增益带宽和偏振激光输出利于非线性频率变换的优势,对于紧凑小型化激光器的研制具有很大的应用价值^[13-16]。上述对被动调 Q 输出脉冲的调控的工作均是基于实验研究,与理论结合分析较少,并且对于调 Q 脉冲的延时、脉冲串中子脉冲数等特性的研究也相对较少。因此本文基于被动调 Q Yb:KYW/Cr⁴⁺:YAG 激光器,从速率方程出发,理论模拟分析了准连续波泵浦下泵浦参数对脉冲输出特性的影响,并进行了相应的被动调 Q 实验。实验表明,准连续波泵浦下被动调 Q Yb:KYW 激光器可稳定运行,通过改变泵浦功率和泵浦脉宽,可实现对激光脉冲的重复频率、脉冲延时以及脉冲串子脉冲个数的锁定和调控,实验结果和理论仿真吻合较好。

2 理论研究及激光系统组成

2.1 被动调 Q Yb:KYW 激光器脉冲特性仿真实验

当输出激光波长为 1 μm 时, Yb:KYW 为准四能

级的激光运行机制,图 1 所示为 Yb:KYW 的能级分裂以及准四能级系统能级跃迁。Yb³⁺离子的吸收光谱和发射光谱有交叠部分,所以影响掺 Yb³⁺介质激光阈值的一个重要因素是增益介质对激光波长的重吸收^[17],从 Yb:KYW 晶体的能级分裂结构出发,考虑重吸收损耗,对被动调 Q 速率方程进行修正,有激光二极管准连续波泵浦 Yb:KYW 被动调 Q 耦合速率方程组:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2 \left(\sigma - \frac{f_1}{f_2} \sigma_{sg} \right) n l - 2 \sigma_{gs} n_{gs} l_s - 2 \sigma_{es} n_{es} l_s - \left(\ln \frac{1}{R} + \delta \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \sigma \phi n - n/\tau + W_p, \quad (2)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -\sigma_{gs} c \phi n_{gs}, \quad (3)$$

$$\frac{dn_{es}}{dt} = -\sigma_{es} c \phi n_{es}, \quad (4)$$

$$n_{gs} + n_{es} = n_{s0}, \quad (5)$$

式中:W_p表示脉冲泵浦下的泵浦速率,有

$$W_p = \begin{cases} \frac{p_p [1 - e^{(-2at)}]}{h\nu_p A_p l}, & 0 < t \leq t_p; \\ 0, & t_p < t \leq T \end{cases} \quad (6)$$

φ为腔内光子数密度;c为真空中光速;n、n_{gs}和n_{es}分别为激光晶体的反转粒子数密度、Cr⁴⁺:YAG基态和激发态粒子数密度;σ、σ_{sg}、σ_{gs}和σ_{es}分别为激光晶体的受激发射截面、信号重的吸收截面、Cr⁴⁺:YAG基态和激发态吸收截面;t_r表示腔内光子寿命,有t_r= $\frac{2L}{c}$,L表示谐振腔光学长度;τ为激光晶体的上能级寿命;f₁和f₂分别为斯塔克分裂能级中激光低能级和高能级的能级分数;l和l_s分别为激光晶体和Cr⁴⁺:YAG的长度;R为输出镜反射率;δ为腔内损耗;p_p为泵浦光峰功

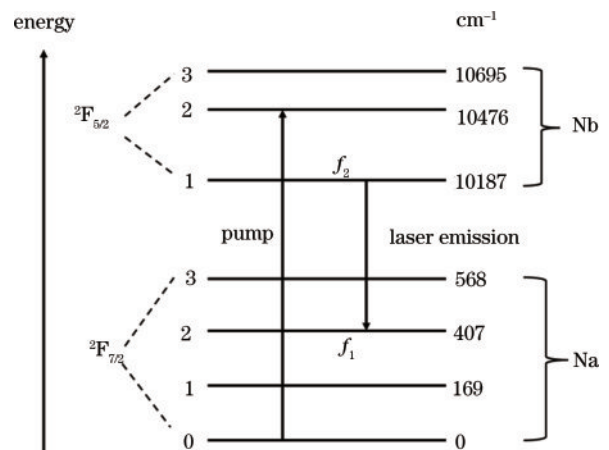


图 1 Yb:KYW 的能级分裂图和准四能级系统能级跃迁示意图
Fig. 1 Yb:KYW energy level split diagram and energy level transition diagram of quasi-four-level system

率,有 $p_p = P/(t_p/T)$, p 为泵浦平均功率; α 为激光晶体的吸收系数; $h\nu_p$ 为泵浦光子能量; A_p 为泵浦光束横截面积; t_p 为泵浦脉宽; T 为一个泵浦周期。

由式(2)激光上能级反转粒子数密度方程可知,当无激光产生时即 $\phi = 0$, 此时,根据式(1)腔内光子数密度方程,引入上能级反转粒子数密度阈值 n_{th} , 从而得到达到激光输出阈值时的时间为

$$t_d = \tau \ln[\alpha/(\alpha - 1)], \quad (7)$$

式中, $\alpha = \frac{W_p \tau}{n_{th}}$, 对 t_d 进行微分得到时间抖动情况:

$$\Delta t = \frac{\tau}{1 - \alpha} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\tau}{1 - \alpha} \frac{\Delta W_p}{W_p} = \frac{\tau}{1 - \alpha} \frac{\Delta P}{P}。 \quad (8)$$

可以看出,泵浦功率的一个微小改变都会引起延迟的较大变化,因此对于被动调 Q 脉冲间的延时的研究,泵浦源的影响是至关重要的。

当泵浦功率非常大时,脉冲抖动可以在更短的时间得到限制,同时脉冲峰值与峰值间的偏差也可以得到缓解,准连续波泵浦因具有较大峰值功率的优势,因此可以减小脉冲的时序抖动。泵浦效率和与热负荷的表达式为^[12]

$$\eta_p \equiv \frac{1 - \exp(-t_p/\tau)}{t_p/\tau}, \quad (9)$$

$$\eta_h \equiv 1 - \eta_q \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \lambda_p / \lambda_f, \quad (10)$$

式中: η_p 为泵浦效率; η_h 为热负荷; η_p 为泵浦量子效率; η_r 为辐射量子效率; λ_p 为泵浦波长; λ_f 为平均荧光波长。式(9)泵浦效率表示来自于脉冲泵浦下光子数密度和反转粒子数密度变化的速率方程,是激光腔在稳态条件下,泵浦脉冲时间内介质储存在上能级的最大反转粒子数与总粒子数的比值,式中的 t_p/τ 为泵浦脉宽与上能级寿命之比,由于准连续波泵浦脉冲时间小于连续泵浦,使准连续波泵浦的 η_p 较大, η_h 变小,即准连续波泵浦具有更低的热负荷。

根据上述理论分析并对速率方程进行数值求解,得出准连续波泵浦下泵浦参数对脉冲输出特性的影响,所使用的参数如表 1 所示。

表 1 相关参数取值

Table 1 Value of related parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
σ/m^2	3.0×10^{-24}	$\tau/\mu s$	300
σ_{sg}/m^2	0.3×10^{-24}	$t_s/\mu s$	3.5
σ_{gs}/m^2	8.7×10^{-23}	γ	1
σ_{es}/m^2	2.2×10^{-23}	δ	0.2
n_g	2	l/mm	10
n_s	1.8	l_s/mm	0.5
L/mm	35	$c/(m \cdot s^{-1})$	3×10^8
f_1	0.0840	f_2	0.7524

2.2 实验装置和方法

Yb:KYW 被动调 Q 激光器装置图如图 2 所示,为保证稳定的基横模输出,采用简单、紧凑的平凹腔,其中:平面输入镜 M_1 两面均镀有 940 nm 高透 (HT) 膜,腔内一面镀有 1030 nm 高反 (HR) 膜;平凹输出镜 M_2 腔内面镀有 1030 nm 部分反射膜,透过率 $T=15\%$,曲率 $R=200$ mm;总腔长 32 mm。泵浦源为纤芯直径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤耦合输出的 LD,重频为 500 Hz,泵浦脉宽在 100~200 μs 间可调,输出中心波长为 940 nm,输出功率 >20 W。耦合头由一对近红外增透凸透镜 (焦距比为 3:5) 组成,并准直聚焦到腔内激光晶体上,此时泵浦光束直径为 333.3 μm 。Yb:KYW 晶体掺杂的原子数分数为 3%,通光截面尺寸为 3 mm \times 4 mm,通光长度为 10 mm, N_g - cut,沿 N_m 方向切割 1° ,以防止寄生振荡。晶体两端面镀膜分别为 HT@1030 nm & 940 nm。为进行有效的热管理,晶体用铝箔包裹并安装在通有循环冷却水的紫铜热沉上,循环冷却水温为 23 $^\circ C$ 。采用未镀膜的 Cr^{4+} :YAG,其通光截面为 $\Phi 6$ mm,厚度为 0.5 mm,初始透过率 $T_0=95\%$ 。

在上述实验条件下,搭建 Yb:KYW 被动调 Q 激光器,通过调节输出镜和 Cr^{4+} :YAG 晶体的位置使谐振腔处于最佳状态,获得调 Q 脉冲激光输出。

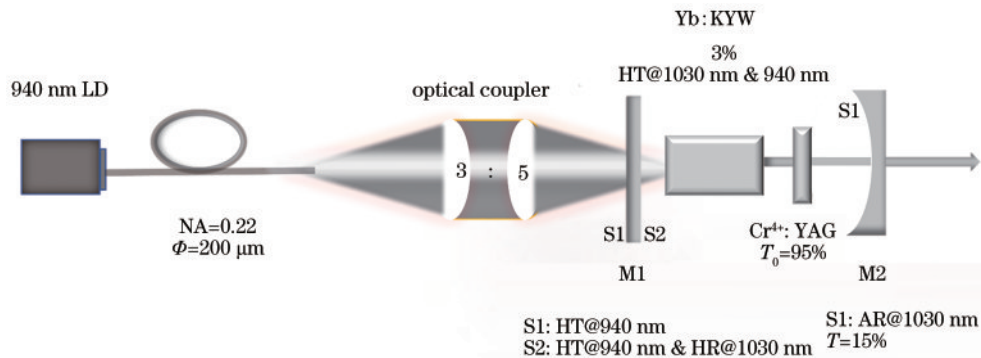


图 2 Yb:KYW 被动调 Q 激光器的装置图

Fig. 2 Cavity's design diagram of Yb:KYW passively Q-switched laser

3 理论和实验结果及分析

从速率方程可知,在给定泵浦源、激光晶体和腔型的条件下,泵浦速率通过改变腔内反转粒子数密度来影响脉冲输出,而从式(6)可以看出,泵浦速率由泵浦功率 P 和泵浦脉宽 t_p 决定。因此,接下来主要分析 P 和 t_p 对脉冲输出特性的影响,包括以下两个部分:对脉冲延时和脉冲串子脉冲个数的影响。

3.1 对脉冲延时的影响

图 3 为在给定泵浦脉冲下调 Q 脉冲延时示意图,其中 t_p 和 t_d 分别表示泵浦脉宽和调 Q 脉冲延时,为微秒量级, t_l 为激光脉宽,为纳秒量级。通过理论模拟,图 4 给出了泵浦功率 P 和泵浦脉宽 t_p 对激光单脉冲延时的整体作用情况,其中 P 由 10 W 增大到 30 W, t_p 由 100 μs 增加到 400 μs ,因为 P 和 t_p 决定了泵浦速率,存在 t_d 相等的区域分布,而这些区域泵浦速率恰好一致。并且从图中还可以观察到, P 越大、 t_p 越小时 t_d 越短,且变化情况近似为线性,当 $P = 30\text{ W}$ 和 $t_p = 100\ \mu\text{s}$ 时存在最短延时 20 μs ; P 越小、 t_p 越大时 t_d 越长,但存在突变情况。为进一步分析,图 5(a) 和 5(b) 分别给出了

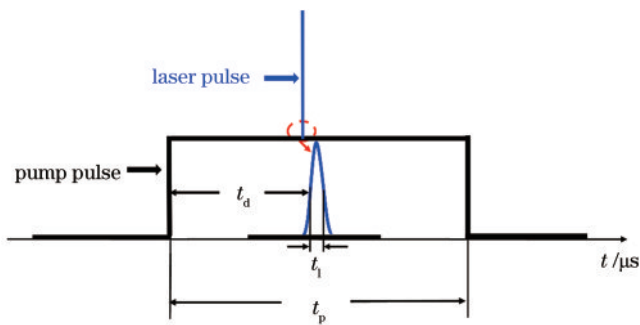


图 3 调 Q 脉冲延时示意图
Fig. 3 Diagram of Q-switched pulse delay

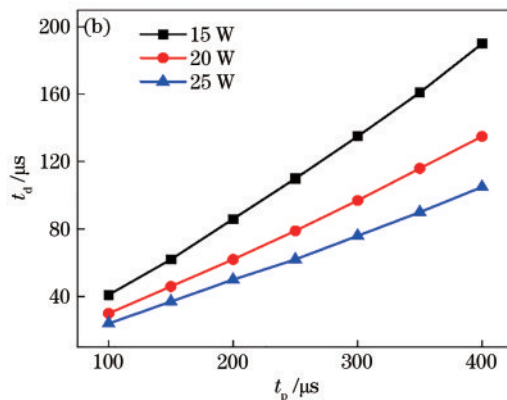
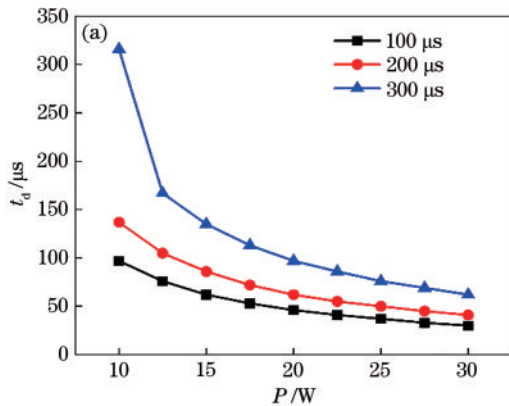


图 5 脉冲延时随(a)泵浦功率($t_p = 100, 200, 300\ \mu\text{s}$)和(b)泵浦脉宽($P = 15, 20, 25\text{ W}$)的变化情况
Fig. 5 Variations of pulse delay with (a) pump power ($t_p = 100, 200, 300\ \mu\text{s}$) and (b) pump pulse width ($P = 15, 20, 25\text{ W}$)

随后,为表征激光性能,脉冲波形由 Tektronix 公司的 1 GHz MSO4101 数字示波器和 Thorlabs 公司的 DET10AM 探测器进行实时观测,并给出激光脉冲延

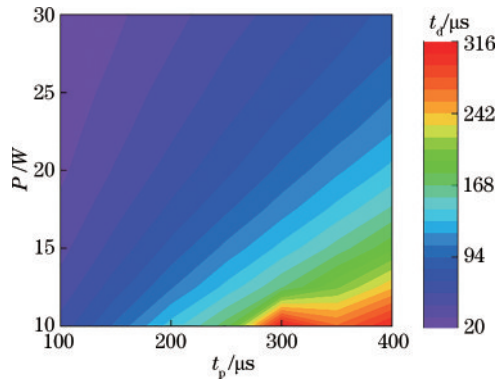


图 4 泵浦源对脉冲延时的影响
Fig. 4 Influence of pump source on pulse delay

$t_p = 100, 200, 300\ \mu\text{s}$ 时 t_d 随 P 的变化情况和 $P = 15, 20, 25\text{ W}$ 时 t_d 随 t_p 的变化情况,较为直观地发现了大泵浦功率和小泵浦脉宽更有利于缩短脉冲延时。这是因为 P 越大、 t_p 越小时,对应的泵浦速率越大,反转粒子数增大到最大值越快,漂白 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 越容易,单脉冲延时越短。图 5(a) 中存在一个较为特殊的现象,当 $P = 10\text{ W}$, $t_p = 300\ \mu\text{s}$ 时, t_d 为 316 μs ,大于泵浦脉宽,这是因为在泵浦源的作用下,腔内反转粒子数在泵浦持续时间 300 μs 时累积到最大值,但此时 Q 开关仍关闭,无脉冲输出,当泵浦停止,反转粒子数下降,腔内光强增大,在 316 μs 时 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 中几乎所有的基态粒子被激发到激发态, Q 开关被打开,从而输出光脉冲,这也就解释了小泵浦功率和大泵浦脉宽下脉冲延时存在的突变情况。因此,若想得到单脉冲,可根据图 4、图 5 中激光脉冲延时的理论预期,针对特定的泵浦速率,调整泵浦功率和脉宽,最终实现既可减少热效应又相对稳定且具备最佳占空比的单脉冲输出,此时由于在一个泵浦周期内只输出一个脉冲,所以输出脉冲频率完全等于泵浦脉冲频率。

时情况。如图 6(a)、6(b) 所示, P 分别为 12.7、13.8、14.6、15.6 W,当 $t_p = 200\ \mu\text{s}$ 时激光单脉冲延时情况以及根据脉冲延时改变 t_p 从而得到单脉冲脉宽 t_l 的实

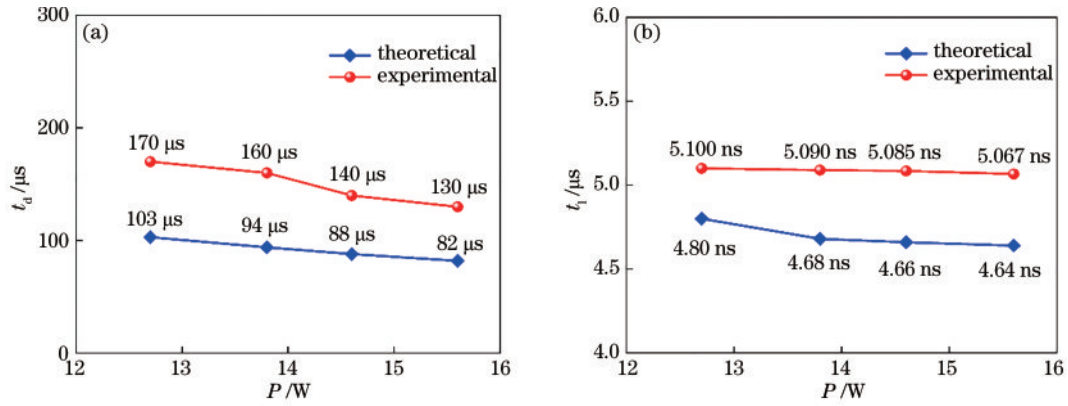


图 6 (a)脉冲延时和(b)脉宽随泵浦功率的变化情况

Fig. 6 Variation of (a) pulse delay and (b) pulse width with pump power

验与理论对比情况。从图中可以看到,随着 P 的增加, t_d 有较为明显的缩短, t_l 则略有减小,相对理论值实验结果均略有偏高,分析原因是由于腔内功率密度过高,不可避免的热效应增加了激光器的腔内损耗,从而使脉冲延时和脉宽有所增加。同时还发现,低功率下二者脉冲延时差距相对较大,考虑是由于低功率下掺铽晶体的重吸收损耗更高所致。

为量化泵浦脉宽对脉冲延时的影响,给出了当 $P = 12.7 \text{ W}$ 、 $t_p = 200, 190, 170 \text{ μs}$ 时激光单脉冲建立

的波形图,结果如图 7(a)所示。可以发现,3种泵浦脉宽下脉冲延时基本保持一致,其中泵浦脉宽为 170 μs 时激光脉冲恰好建立在泵浦脉冲波形后沿,此时泵浦脉宽与脉冲延时相等,即此条件下的最佳占空比为 8.5% 。图 7(b)为 3 种泵浦条件下的脉冲波形图,可以看出 $t_p = 170 \text{ μs}$ 时,单脉冲波形均匀对称无拖尾且脉宽最小为 5.100 ns ,因此保证最佳泵浦占空比还有利于得到较为理想的激光脉冲,而这十分具有应用价值。

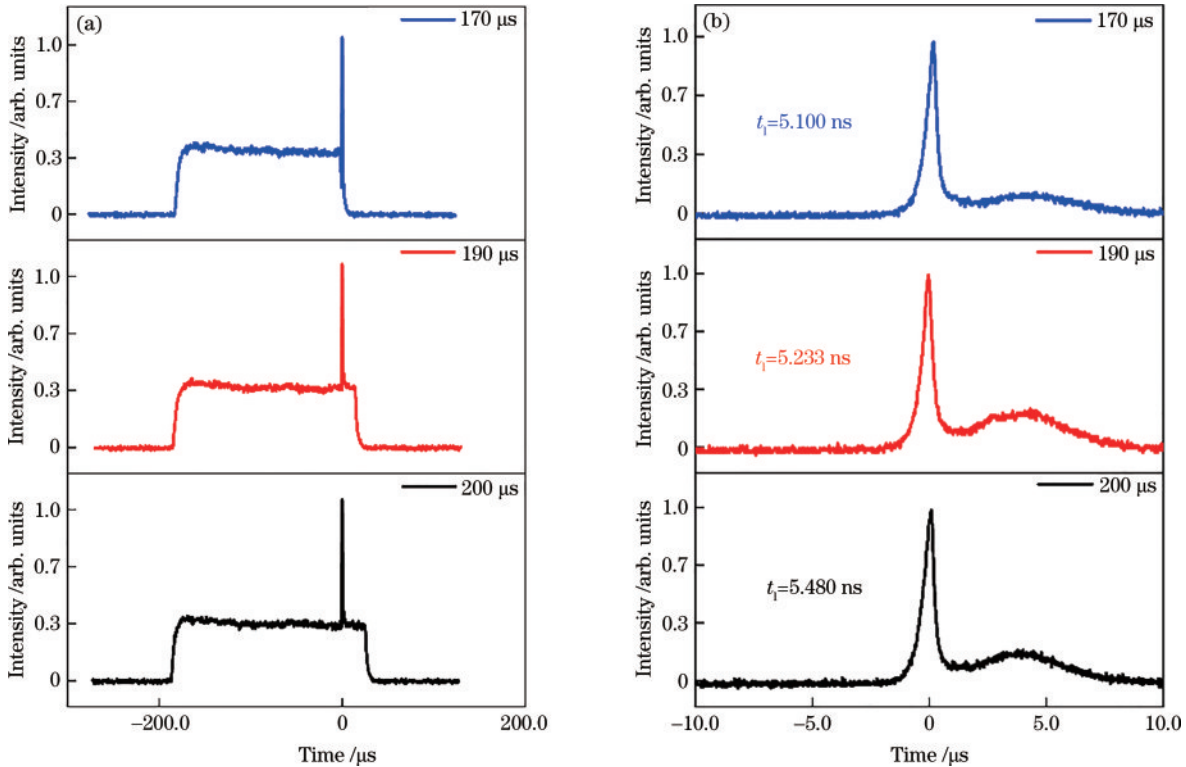


图 7 脉冲建立 (a) 波形图 和 (b) 脉宽图 ($P = 12.7 \text{ W}$, $t_p = 200, 190, 170 \text{ μs}$)

Fig. 7 Pulse build (a) waveform graph and (b) pulse width graph ($P = 12.7 \text{ W}$, $t_p = 200, 190, 170 \text{ μs}$)

测试了 30 min 内单脉冲输出能量为 0.2 mJ 时的能量波动情况来表明系统稳定性情况,此时最大泵浦功率为 15.6 W ,泵浦脉宽为 130 μs ,重频为 500 Hz ,结

果如图 8(a)所示,在准连续波泵浦下调 Q 系统十分稳定, 30 min 内输出能量的标准偏差为 0.76 μJ 。图 8(b)为此调 Q 激光脉冲输出序列,可看出脉冲峰值与峰

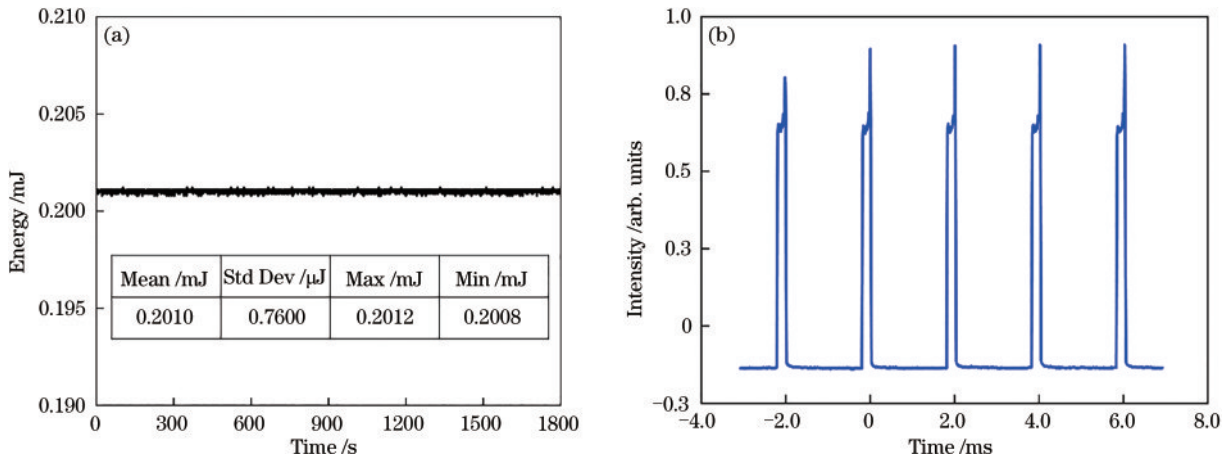


图 8 被动调 Q Yb : KYW 激光器 (a) 在 30 min 内的能量稳定性和 (b) 脉冲建立情况 ($P = 15.6 \text{ W}$)
 Fig. 8 (a) Energy stability within 30 min and (b) pulse establishment of Q-switched Yb : KYW laser ($P = 15.6 \text{ W}$)

值间的幅度变化较小。这是因为脉冲的抖动取决于调 Q 脉冲后剩余的激发态反转粒子数密度,在准连续波泵浦情况下,脉冲启动时间由脉冲电流源控制,时间波动仅为脉冲累积时间内的波动,而剩余的激发态反转粒子数在下一个脉冲建立之前已经消耗殆尽。

3.2 对脉冲串子脉冲的影响

当泵浦功率较大和泵浦脉宽较小时,同一组脉冲序列会出现脉冲串情况,这是由于单脉冲延时逐渐缩短,而工作物质的阈值反转粒子数基本保持不变,存在的剩余反转粒子数多次打开 Q 开关,从而形成子脉冲输出。接下来将分析泵浦源对激光脉冲串子脉冲的影响。

与脉冲延时相同,图 9 给出了理论上泵浦功率 P 和泵浦脉宽 t_p 对子脉冲个数的整体作用情况。图中表明 P 越大、 t_p 越小时子脉冲个数越多, $P = 30 \text{ W}$ 、 $t_p = 100 \mu\text{s}$ 时存在最大子脉冲个数,为 9 个。并且可观察到, P 不变的情况下在一较大泵浦脉宽范围内子脉冲个数保持不变,因此泵浦功率对子脉冲个数的影响更大。

针对脉冲串子脉冲的产生,就实验结果与理论模

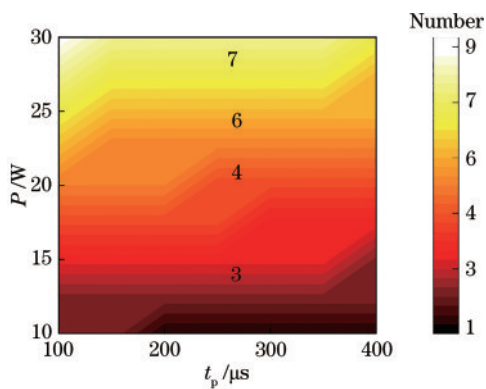


图 9 泵浦源对脉冲个数的影响

Fig. 9 Influence of pump source on pulse number

拟进行了对比,包括子脉冲个数和子脉冲间的延时。图 10 为 $t_p = 200 \mu\text{s}$ 时,子脉冲个数随 P 的变化情况,不难看出,子脉冲个数会随着 P 的增大而增加,实验下子脉冲个数偶有小于理论值,但二者相差不大。图 11(a) 则为子脉冲间的延时, P 增大的情况下,脉冲延时随之缩短且脉冲与脉冲间的延迟也会变短,对比理论值和实验值,各个脉冲的延时存有些许差异,但 P 越大差距逐渐减小,在最大泵浦功率 $P = 15.6 \text{ W}$ 下,实验上首脉冲到三脉冲的延时分别为 130、160、190 μs ,图 11(b) 为此情况下的脉冲波形图,而理论上则分别为 82、138、186 μs ,可看出三脉冲延时的实验值和理论值已非常接近,这说明在一定程度上理论模拟是可靠的。通过对脉冲串子脉冲间延时的分析,可达到控制脉冲序列中子脉冲个数的目的。

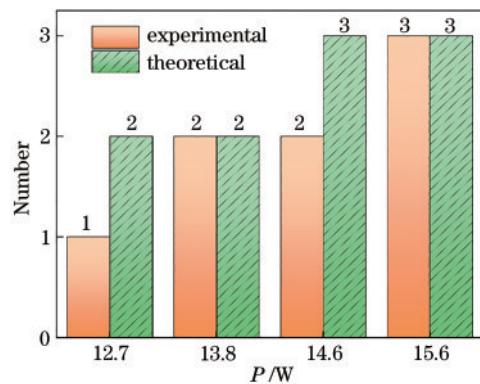


图 10 $t_p = 200 \mu\text{s}$ 时,脉冲个数随泵浦功率的变化情况
 Fig. 10 Change of pulse number with pump power when $t_p = 200 \mu\text{s}$

针对上述分析,结合理论仿真结果,通过改变脉冲泵浦源的功率和脉宽,从而实现被动调 Q Yb : KYW 激光器激光脉冲重频、脉冲延时、脉冲串子脉冲个数在一定程度上的锁定和调控以及激光脉冲的稳定输出。

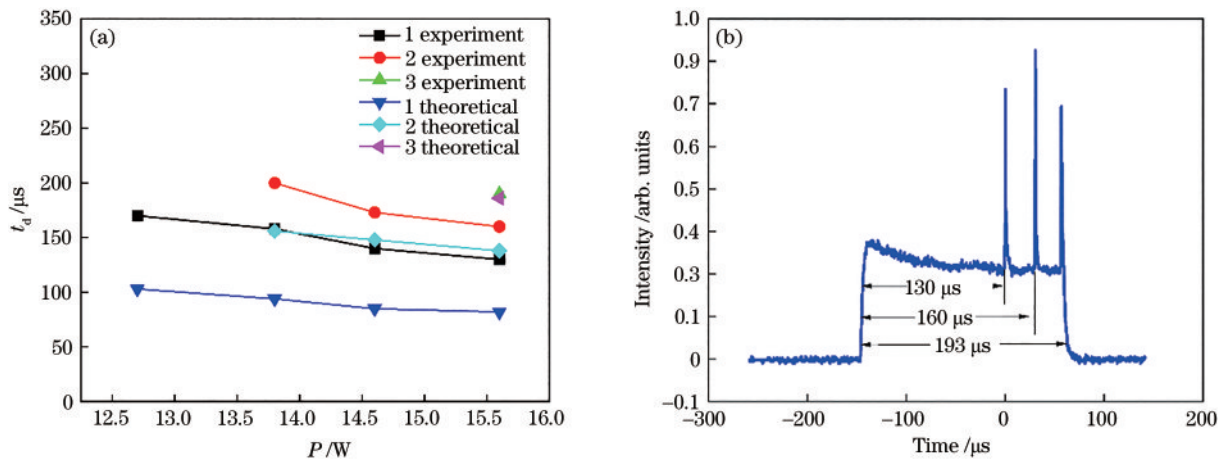


图 11 子脉冲的(a)脉冲延时实验与仿真对比图和(b)脉冲波形图($P = 15.6 \text{ W}$)

Fig. 11 (a) Comparison diagram of pulse delay experiment and simulation and (b) pulse waveform diagram ($P = 15.6 \text{ W}$) of sub pulse

4 结 论

从被动调 Q 速率方程出发,结合 Yb:KYW 晶体的特性以及准连续波泵浦的特点,理论模拟了泵浦功率和泵浦脉宽对被动调 Q 激光器脉冲延时、脉冲宽度、脉冲串子脉冲个数以及子脉冲间的延时等特性的影响。在此基础上,采用 Yb:KYW/Cr³⁺:YAG 的被动调 Q 激光对理论进行验证并分析,获得与理论模拟一致的结果,通过对准连续波 LD 泵浦源的调控,实现最佳泵浦占空比的被动调 Q Yb:KYW 激光器在脉冲频率、脉冲延时和脉冲串子脉冲个数的锁定和调控,在泵浦功率为 15.6 W、占空比分别为 6.50%、8.00% 和 9.65% 时,获得单脉冲、双脉冲和三脉冲的稳定输出。

参 考 文 献

- [1] Ancona A, Nodop D, Limpert J, et al. Microdrilling of metals with an inexpensive and compact ultra-short-pulse fiber amplified microchip laser[J]. Applied Physics A, 2009, 94(1): 19-24.
- [2] 梁田, 丁征, 齐文宗. 被动调 Q 固体激光器上转换效应的数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 791-796.
Liang T, Ding Z, Qi W Z. Numerical simulations of upconversion effects in passively Q -switched solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 791-796.
- [3] Zayhowski J J, Wilson A L. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd:YAG/Cr³⁺:YAG passively Q -switched microchip lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(12): 1588-1593.
- [4] 漆云凤, 楼祺洪, 张影华, 等. Cr³⁺:YAG 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1449-1454.
Qi Y F, Lou Q H, Zhang Y H, et al. Study on Ti:Sapphire end-pumped Nd:YAG ceramic laser passively Q -switched by Cr³⁺:YAG[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(11): 1449-1454.
- [5] 杨成伟, 霍玉晶, 尹晓东, 等. 激光二极管抽运 Cr³⁺:YAG 被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 1-4.
- [6] Yang C W, Huo Y J, Yin X D, et al. Experimental study on LD pumped Nd:YVO₄ laser passively Q -switched by Cr³⁺:YAG[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(1): 1-4.
- [7] Lopez-Moreno C, Amponsah-Manager K, Smith B W, et al. Quantitative analysis of low-alloy steel by microchip laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2005, 20(6): 552-556.
- [8] Hong Z, Zheng H, Chen J, et al. Laser-diode-pumped Cr³⁺, Nd³⁺:YAG self- Q -switched laser with high repetition rate and high stability[J]. Applied Physics B, 2001, 73(3): 205-207.
- [9] 郑权, 邵兰芳, 赵岭, 等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态激光器可控运转方法研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 194-196.
Zheng Q, Shao L F, Zhao L, et al. Study on controllable operation of a Cr:YAG passively Q -switched laser[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(3): 194-196.
- [10] 李宏斌, 董怡, 王鹏飞, 等. 被动调 Q 高功率脉冲串激光器[J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 762-765.
Li H B, Dong Y, Wang P F, et al. Passive Q -switch high power burst laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(7): 762-765.
- [11] Yang C W, Huo Y J, He S F, et al. Controllable passively Q -switched laser[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(1): 117-119.
- [12] Yi J, Lee K, Kim Y, et al. Comparison of CW pumping and quasi-CW pumping for a passively Q -switched Nd:YAG laser[J]. Journal- Korean Physical Society, 2010, 57(21): 359-363.
- [13] Zheng L H, Kausas A, Taira T. >MW peak power at 266 nm, low jitter kHz repetition rate from intense pumped microlaser[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28748-28760.
- [14] Loiko P A, Yumashev K V, Kuleshov N V, et al. Thermo-optical properties of pure and Yb-doped monoclinic KY(WO₄)₂ crystals[J]. Applied Physics B, 2004, 31(1): 1-4.

- 2012, 106(3): 663-668.
- [14] Demidovich A A, Kuzmin A N, Ryabtsev G I, et al. Influence of Yb concentration on Yb: KYW laser properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, 300/301: 238-241.
- [15] Hildebrandt M, Bunting U, Kosch U, et al. Diode-pumped Yb: KYW thin-disk laser operation with wavelength tuning to small quantum defects[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(2): 796-798.
- [16] Jacobsson B. Experimental and theoretical investigation of a volume-Bragg-grating-locked Yb: KYW laser at selected wavelengths[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6443-6454.
- [17] Auge F, Druon F, Balembois F, et al. Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb³⁺-doped Ca₄GdO(BO₃)₃(Yb: GdCOB) laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(5): 598-606.