

被动调 Q 双腔双频 Nd:YAG 激光器设计及实验

周叶, 焦明星*, 连天虹, 邢俊红, 刘芸, 刘健宁

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 为了获得峰值功率高、相干性好、频差大的双频脉冲激光,设计了一种二极管端面抽运被动调 Q 双腔双频 Nd:YAG 激光器,该激光器采用共增益 T 型双驻波腔结构,腔内偏振分光棱镜和半波片组成的双折射滤光片作为激光纵模选择元件,并以 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为腔内被动 Q 开关,使 1064 nm 激光的 p 分量和 s 分量分别在直线腔和直角腔内同时以单纵模振荡,从而获得 1064 nm 正交线偏振双频激光脉冲输出。建立了被动调 Q 双腔 Nd:YAG 激光器速率方程组,理论分析了双腔脉冲激光输出特性,实验研究了双腔双频脉冲激光的振荡特性和输出特性。实验结果表明:当激光二极管的抽运功率为 2.7 W 时,从直线腔输出的 p 偏振单频脉冲激光的重复频率、脉冲宽度和峰值功率依次为 5.8 kHz、42 ns 和 126.4 W;从直角腔输出的 s 偏振单纵模激光脉冲的重复频率、脉冲宽度和峰值功率依次为 5.8 kHz、40 ns 和 133.6 W。该双频脉冲激光的频差约为 10 GHz。这种双频脉冲固体激光器在激光干涉测量和相干激光雷达探测等领域具有广阔的应用前景。

关键词 激光器; 双频脉冲激光; 双折射滤光片; 被动调 Q; Cr⁴⁺:YAG 晶体

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1201008

Design and Experimental Investigation of Passively Q-Switched Two-Cavity Dual-Frequency Nd:YAG Laser

Zhou Ye, Jiao Mingxing*, Lian Tianhong, Xing Junhong, Liu Yun, Liu Jianning

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract In order to obtain a dual frequency pulsed laser with high peak power, good coherence and large frequency difference, a diode-pumped passively Q-switched two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser is designed, which adopts a structure composed of two T-shaped standing-wave cavities sharing a common gain medium. An intracavity polarizing beam-splitter and a half wave-plate are combined to form a birefringent filter acting as the laser longitudinal mode selector, a piece of Cr⁴⁺:YAG crystal is chosen as a passive Q-switch, and thus the p-component and s-component of this 1064 nm laser are forced to oscillate simultaneously in a single longitudinal mode within the linear and right angle cavities, respectively. The output of orthogonally and linearly polarized dual-frequency pulsed laser at 1064 nm is realized. In addition, the rate equation group of a passively Q-switched two-cavity Nd:YAG laser is established and the output characteristics of two-cavity pulsed laser are analyzed theoretically. Moreover, both the oscillation and output characteristics of this two-cavity dual-frequency pulsed laser are investigated experimentally. The experimental results show that, when the pump power of laser diode is 2.7 W, as for the p-polarization single-frequency pulsed laser output from the linear cavity, the repetition frequency, pulse width and peak power are 5.8 kHz, 42 ns and 126.4 W, respectively. In contrast, as for the s-polarization single-frequency pulsed laser output from the right angle cavity, those are 5.8 kHz, 40 ns and 133.6 W, respectively. The frequency-difference of this dual-frequency pulsed laser is approximately 10 GHz. This dual-frequency pulsed solid-state laser has a wide application prospect in the fields of laser interferometry, lidar coherent detection, and so on.

Key words lasers; dual-frequency pulsed laser; birefringent filter; passive Q-switch; Cr⁴⁺:YAG crystal

OCIS codes 140.2020; 140.3515; 140.3540

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-08-05; 录用日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61605156)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(2016JQ6073)

* E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn

1 引 言

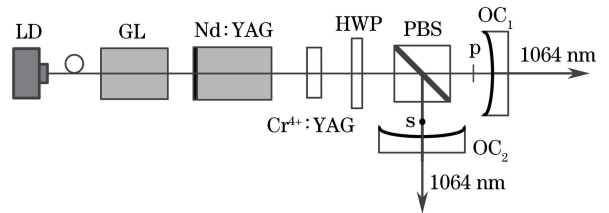
双频固体激光器具有结构简单、频差大、线宽窄、稳定性好等优点,在远距离相干探测、激光雷达、卫星网络通信系统等领域具有广阔的应用前景^[1-2],成为激光技术及其应用领域研究热点之一,引起国内外学者的高度关注。目前,光载微波激光雷达领域大多采用连续波双频激光器作为光源来测量远距离运动目标的速度^[3-6],其探测距离受到连续激光功率水平的限制,若采用高峰值功率双频脉冲激光器作为光源,则可探测到更远距离的速度信息。迄今为止,国内外学者围绕激光二极管(LD)抽运双频固体激光技术开展了系统深入地研究,这些研究主要集中在双频激光的产生和频差调谐等单元技术,包括基于双折射滤光片的选模法^[7-10]、法布里-珀罗(F-P)标准具选模法^[11]、应力双折射选模法^[12-13]、扭转模腔选模法^[14-15]等一系列双频固体激光器,但有关双频脉冲激光技术的研究报道较少。

为了获得高峰值功率双频脉冲激光,本文将双频激光技术与被动调Q技术^[16-19]结合起来,设计了一种双驻波腔结构Cr⁴⁺:YAG被动调Q双频脉冲Nd:YAG固体激光器,该激光器利用偏振分光棱镜将谐振腔分为两个互相正交的平凹驻波腔,在双腔的公共光路上插入Cr⁴⁺:YAG晶体与半波片,其中Cr⁴⁺:YAG晶体作为两个腔共用的被动Q开关,半波片与偏振分光棱镜(PBS)共同组成的双折射滤光片作为两个腔共用的选模元件,并通过调节半波片的快轴与水平方向的夹角控制双腔输出脉冲时域上的同步性,两路谐振腔的结构一致,共用一个激光晶体,所以热透镜效应也相同,保证了双腔出射的光束在空间上的一致性,从而获得了1064 nm的双频同步脉冲激光输出。该激光器无需引入复杂的外部驱动源,易于实现小型化和大频差,所获得的高峰值功率双频脉冲激光将成为光载微波激光雷达领域中优势明显的一种探测光源。

2 激光系统组成

LD抽运Cr⁴⁺:YAG被动调Q双腔双频Nd:YAG激光器设计方案如图1所示。从LD尾纤输出的808 nm抽运光经自聚焦透镜会聚到Nd:YAG增益介质中,将晶体左端面镀有对1064 nm振荡激光高反、对808 nm抽运光增透的双色介质膜作为激光谐振腔的输入耦合镜,右端面镀有1064 nm的增透介质膜。在Nd:YAG晶体右侧依

次放置Cr⁴⁺:YAG晶体、半波片(HWP)、PBS和球面输出耦合镜OC₁,Nd:YAG晶体左端面与OC₁组成直线型平凹稳定腔(简称直线腔);在垂直于直线腔轴线方向并与PBS相对应的位置处放置另一球面输出耦合镜OC₂,Nd:YAG晶体左端面与OC₂组成直角型平凹稳定腔(简称直角腔),PBS和HWP组成双折射滤光片,使直线腔和直角腔均以单纵模振荡,经Cr⁴⁺:YAG晶体被动调Q,实现1064 nm双频脉冲激光的p偏振和s偏振同时输出。在这种被动调Q双腔双频脉冲激光实验系统中,Nd:YAG晶体的尺寸为3 mm×3 mm×5 mm,掺杂浓度(原子数分数)为1.1%,PBS的尺寸为5 mm×5 mm×5 mm,1064 nm半波片HWP的直径和厚度分别为10 mm和0.7 mm,OC₁和OC₂的球面曲率半径为100 mm,对1064 nm波长的透射率T=3.6%,直线腔和直角腔的几何腔长约为7 cm。



LD: laser diode; GL: grin lens; HWP: half-wave plate; PBS: polarized beam splitter; OC: output coupler

图1 被动调Q双腔双频Nd:YAG激光器
Fig. 1 Passively Q-switched two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser

3 理论分析

3.1 双频激光振荡原理

PBS和HWP共同组成的双折射滤光片作为两个腔共同的纵模选择元件,振荡激光通过PBS后的p偏振和s偏振光波往返通过厚度为d的双折射晶体HWP后,产生的相位差为

$$\delta_p = \delta_s = \frac{4\pi\Delta nd}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 Δn 为HWP的双折射率, λ 为激光波长。其中,只有相位差为 2π 整数倍的p光和s光的偏振态不会发生改变,损耗最小,优先起振,而其他频率的光由于偏振态改变,损耗较大,不能起振。由此可以得到双折射滤光片的自由光谱范围 f_{FSR} (即相邻透射峰之间的频率间隔)为

$$f_{FSR} = \frac{c}{2\Delta nd}. \quad (2)$$

双腔双频激光振荡原理如图2所示。由于激光

器具有两个驻波谐振腔,因此存在两组纵模频率梳,如图 2(b)所示(其中实线对应 p 模,虚线对应 s 模),双折射滤光片对 p 模和 s 模的透射率曲线如图 2(c)所示。当双折射滤光片的自由光谱范围 f_{FSR} 大于激光器振荡线宽 $\Delta\nu_{\text{osc}}$ 、并且透射峰极大峰的宽度小于激光器的纵模间隔 $\Delta\nu_{\text{q}}$ 时,直线腔内的 p 模和直角腔内的 s 模均以单纵模振荡,从而实现正交线偏振双频激光振荡输出。

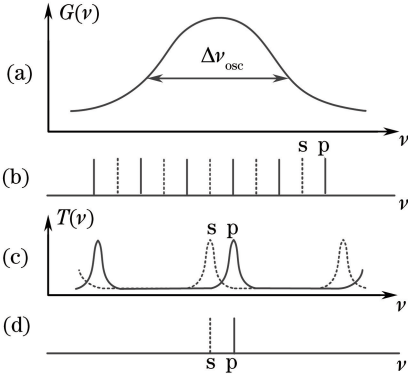


图 2 双频激光振荡原理。(a)增益曲线;(b)纵模频率梳;(c)双折射滤光片透射曲线;(d)激光振荡模

Fig. 2 Oscillation principle of dual-frequency laser. (a) Gain curve; (b) longitudinal frequency combs; (c) transmission curves of birefringent filter; (d) laser oscillation modes

3.2 双腔被动调 Q 激光器特性仿真分析

根据被动调 Q 理论,建立双腔被动调 Q 速率方程组,假设抽运光束的横截面以及增益介质和可饱和吸收体中的光强近似呈均匀分布,忽略激光和可饱和吸收体的自发辐射以及抽运光束纵向衰减的影响,考虑可饱和吸收体的激发态吸收,平面波近似下的被动调 Q 速率方程组可以写为

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{\Phi_1}{t_1} [2\sigma Nl - 2\sigma_{\text{gs}} N_{\text{gs}} l_s - 2\sigma_{\text{es}} N_{\text{es}} l_s - \left(\ln \frac{1}{R_1} + L_1 \right)], \quad (3)$$

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = \frac{\Phi_2}{t_2} [2\sigma Nl - 2\sigma_{\text{gs}} N_{\text{gs}} l_s - 2\sigma_{\text{es}} N_{\text{es}} l_s - \left(\ln \frac{1}{R_2} + L_2 \right)], \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = R_{\text{in}} - \gamma c \sigma (\Phi_1 + \Phi_2) N - N/\tau, \quad (5)$$

$$\frac{dN_{\text{gs}}}{dt} = \frac{N_{\text{s0}} - N_{\text{gs}}}{\tau_{\text{gs}}} - c \sigma_{\text{gs}} (\Phi_1 + \Phi_2) N_{\text{gs}}, \quad (6)$$

式中: Φ_1 和 Φ_2 分别为直线腔和直角腔内的光子数密度; t_1 和 t_2 分别为光子在直线腔和直角腔内往返

一周的时间; σ 为增益介质的受激发射截面; l 为增益介质的长度; l_s 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的厚度; N 为增益介质反转粒子数密度; σ_{gs} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的基态吸收截面; σ_{es} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的激发态吸收截面; L_1 和 L_2 分别为直线腔和直角腔中除了可饱和吸收体的吸收损耗外的总损耗; R_1 和 R_2 分别为直线腔和直角腔输出耦合镜的反射率; N_{gs} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的基态粒子数密度; N_{es} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的激发态粒子数密度; N_{s0} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的总粒子数密度; γ 为激光增益介质的反转简并因子; τ 为自发辐射荧光寿命; τ_{gs} 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的激发态寿命; R_{in} 为抽运速率。在 Matlab 环境下,采用数值迭代方法求解速率方程组,得到双腔被动调 Q 脉冲从开始到熄灭的过程。用于数值模拟的相关物理量参数取值如表 1 所示。

表 1 相关参数取值

Table 1 Value of related parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^8	γ	1
l / mm	5	τ / s	2.3×10^{-4}
l_s / mm	2	$\tau_{\text{gs}} / \text{s}$	3.2×10^{-6}
σ / m^2	6.5×10^{-23}	L_1	0.1
$\sigma_{\text{gs}} / \text{m}^2$	4.3×10^{-22}	L_2	0.1
$\sigma_{\text{es}} / \text{m}^2$	8.2×10^{-23}	$R_1 / \%$	96.4
$N_{\text{s0}} / \text{m}^{-3}$	2×10^{23}	$R_2 / \%$	96.4

仿真中发现,增大双腔的损耗差时,会导致一个腔出光,另一个腔不出光,这是因为两个腔共用增益介质可同时消耗增益介质中的反转粒子数,如果增大双腔损耗差的话,损耗特别小的谐振腔将优先起振,消耗反转粒子数,使得增益曲线下降,这样就导致了另一个支腔由于获得的增益较小而不能起振。为了保证双腔同时输出脉冲激光,设置直线腔和直角腔的输出耦合镜的反射率 R_1 和 R_2 相等以及损耗 L_1 和 L_2 相等,通过改变抽运功率 P_{in} ,研究了双腔被动调 Q 脉冲激光的输出特性。图 3 为数值模拟结果,可以看出,直线腔和直角腔的变化规律一致,增大抽运功率时,脉冲重复频率近似呈线性增长,脉冲宽度基本不变,这是由于增大抽运速率时,谐振腔的净增益增大,增益介质中反转粒子数到达阈值的时间变短,从而使得脉冲重复频率增大。

4 实验方法和实验结果及分析

4.1 双频激光振荡特性

采用自由光谱范围为 3.75 GHz 的 F-P 扫描干涉仪扫描输出激光,用示波器记录激光振荡模谱。

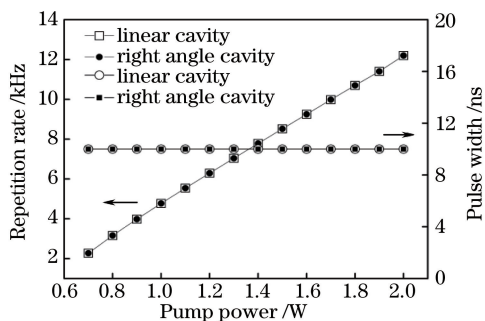


图 3 重复频率、脉冲宽度与抽运功率的关系
Fig. 3 Relationship of repetition rate and pulse width with pump power

图 4 为双腔激光振荡模谱,其中图 4(a)和图 4(b)分别为未加入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时直线腔和直角腔的激光振荡模谱,可以看出 PBS-HWP 组成的双折射滤光片具有良好的单纵模选择能力,直线腔和直角

腔均实现了双频连续激光输出。将一片初始透过率为 85%的可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体插入 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体与半波片之间,将其作为被动调 Q 元件,继续采用 F-P 扫描干涉仪观察激光振荡模谱,图 4(c)和图 4(d)分别为加入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体后直线腔和直角腔的脉冲激光振荡模谱,由于加入调 Q 晶体之后,激光器输出脉冲激光,而脉冲的重复频率远大于 F-P 腔的扫描频率(50 Hz),因此 F-P 扫描干涉仪在扫描同一纵模的时间间隔内,激光器输出了多个脉冲,又由于纵模具有一定的线宽,因此示波器显示为纵模包络下的脉冲波形,可以看出,直线腔和直角腔均实现了单纵模脉冲激光输出。同时,用检偏器检验了双腔的输出激光偏振态,发现直线腔和直角腔输出的 1064 nm 单频激光均为线偏振光,并且它们是偏振方向正交的 p 光和 s 光。

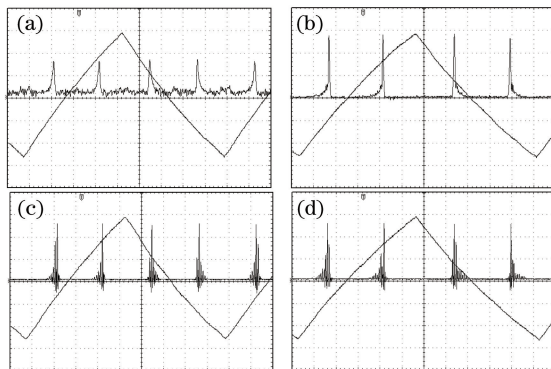


图 4 激光振荡模谱。(a)直线腔未插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体;(b)直角腔未插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体;
(c)直线腔插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体;(d)直角腔插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体

Fig. 4 Patterns of laser oscillation modes. (a) Linear cavity without $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal; (b) right angle cavity without $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal; (c) linear cavity with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal; (d) right angle cavity with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal

4.2 双频激光功率调谐特性

将 HWP 置于 360° 旋转架中,使其快轴处于水平位置,将该位置作为转角的初始位置,然后绕激光腔轴旋转 HWP,以改变 HWP 快轴与 PBS 的 p 偏振面或 s 偏振面之间的夹角,并用激光功率计测量不同转角位置处直线腔和直角腔的输出功率,激光输出功率与半波片转角之间的变化关系如图 5 所示。实验发现,直线腔和直角腔的输出功率随着 HWP 转角呈周期为 $\pi/2$ 的三角函数规律变化,两个腔功率调谐曲线变化规律相反。当 HWP 的转角为 $\pi/4$ 的奇数倍时,直线腔的输出功率最大,直角腔的输出功率最小;当 HWP 的转角为 $\pi/4$ 的偶数倍时,直线腔的输出功率最小,直角腔的输出功率最大;当 HWP 的快轴与水平方向的夹角分别为 25° 、 75° 、 100° 、 160° 、 200° 、 240° 、 290° 和 330° 时,两个腔的

输出功率近似相等,建立双腔琼斯矩阵,所得计算结果与理论结果相吻合。实测结果中,双腔的激光输出功率存在一定的波动,这是因为直线腔和直角腔共用增益介质和饱和吸收体,两个谐振腔之间的增益竞争使得两路光的光强出现波动,造成了功率的不稳定性;同时,HWP 在旋转过程中偏离原来与腔轴垂直的平面,导致腔内损耗改变,使得直线腔和直角腔的峰值功率产生一定的偏差。

该实验系统中,直线腔和直角腔共用一个被动 Q 开关,在双腔同时运转时,两路光的光强同时去饱和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,而 Q 开关打开的时间大于激光脉冲的持续时间,所以两路脉冲的重复频率是一致的,但是当两个腔增益与损耗不同时,会导致一个腔内的光强较强,另一个腔内的光强较弱,这样在两路光同时去饱和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时,两路光脉冲的

建立时间会有一些的时间差,使得脉冲在时域上稍稍错开。为了使双频脉冲保持同步,需要平衡两个腔的增益与损耗,而位于两个腔公共光路上的半波片对两路光的光强具有周期性的调谐作用。在某些特定的半波片快轴与水平方向的夹角下,两路光光强相同,可认为此时两个腔增益平衡,这样就可以保证脉冲在时域上的同步。因此,可以选用这几个角度对应的位置作为最终双频脉冲激光输出时半波片的位置。

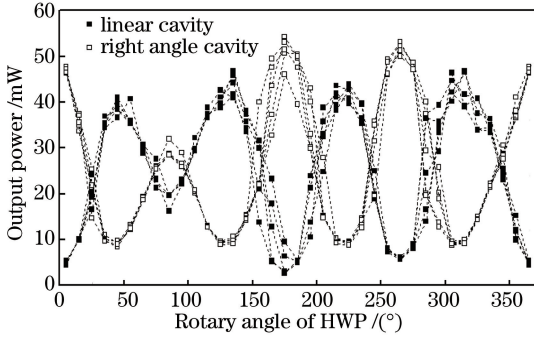


图 5 激光输出功率与半波片转角的关系
Fig. 5 Relationship between laser output power and rotary angle of HWP

4.3 脉冲激光输出特性

(1) 平均输出功率。依据图 5 的实验结果,为了保证双腔脉冲的一致性,选取 330° 作为 HWP 的固定转角位置。图 6 为激光器平均输出功率与入射抽运功率的变化关系,可以看出,双腔平均输出功率随着输入功率的增大而增大,在输入功率增大到 2.7 W 时,直线腔和直角腔分别获得了 30.8 mW 和 30.9 mW 的最大平均输出功率。当增大抽运功率时,增益介质中的反转粒子数积累速率变快,被动 Q 开关打开前积累的反转粒子数更多,这样谐振腔内的净增益增大,平均输出功率增大。理论上,抽运功率和激光输出功率应呈线性关系,但腔内各个元件

的加入使得谐振腔损耗不稳定,加上抽运功率的不稳定性造成了线性度的降低,同时,在抽运功率增大的过程中,直线腔和直角腔的平均输出功率非常相近,可认为两个谐振腔处于增益平衡状态。

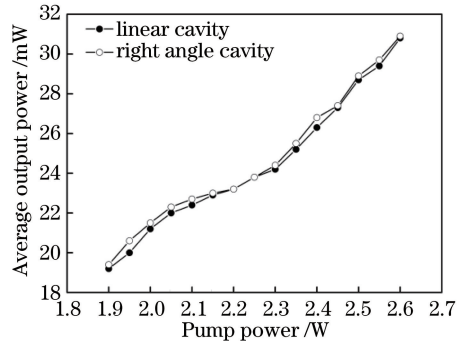


图 6 平均输出功率与抽运功率的关系
Fig. 6 Relationship between average output power and pump power

当 LD 的抽运功率为 2.25 W 时,测量直线腔和直角腔激光输出功率随时间的变化关系。实验记录了 20 min 内激光器的激光输出功率稳定性,采样间隔为 2 s。图 7(a)、(b)分别为直线腔和直角腔激光输出功率随时间的变化关系。20 min 内直线腔的平均输出功率为 23.4 mW,最大输出功率为 27.1 mW,最小输出功率为 18.6 mW,功率稳定性为 1.5%。直角腔的平均输出功率为 23.7 mW,最大输出功率为 28.4 mW,最小输出功率为 21.1 mW,功率稳定性为 1.3%,两个腔的输出功率稳定性较好。由于两个腔共用激光晶体的激活区,在固定的抽运功率下,增益介质中总的反转粒子数一定,这时两路光共同消耗反转粒子数,当一路光消耗的反转粒子数较多时,另一路光消耗的反转粒子数相应地较少,这种增益竞争造成了两路光能量的相对变化,使得双腔激光功率出现波动,当一个腔的功率增大时,另一个腔的功率随之减小。

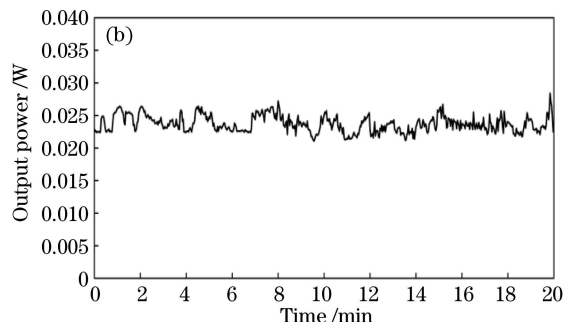
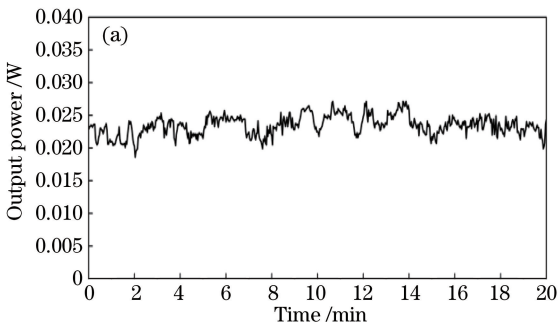


图 7 激光输出功率稳定性。(a)直线腔;(b)直角腔
Fig. 7 Stability of laser output power. (a) Linear cavity; (b) right angle cavity

(2) 重复频率与脉冲宽度。采用快速光电二极管探测激光输出脉冲,用示波器观察输出脉冲,图 8 记录了抽运功率为 2.7 W 时直线腔和直角腔的输出脉冲激光,其中图 8(a)为直线腔脉冲序列图,图 8(b)为直线腔脉冲波形图,图 8(c)为直角腔脉冲序列图,图 8(d)为直角腔脉冲波形图。可以看出,

在抽运功率为 2.7 W 时,直线腔获得了重复频率为 5.8 kHz、脉冲宽度为 42 ns 的被动调 Q 脉冲激光输出,直角腔获得了重复频率为 5.8 kHz、脉冲宽度为 40 ns 的被动调 Q 脉冲激光输出,此时脉冲波形平滑而稳定,输出激光为单纵模。

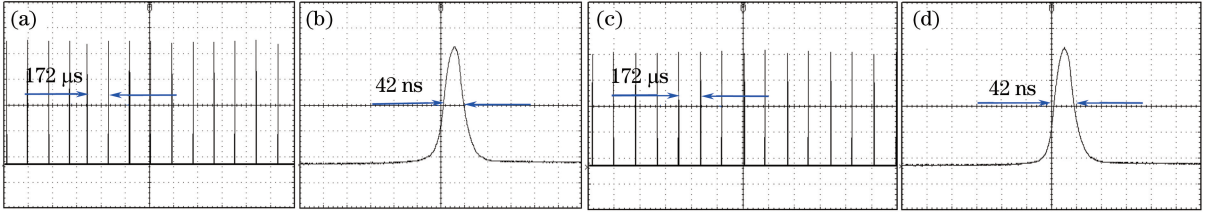


图 8 抽运功率为 2.7 W 时,双腔双频被动调 Q 激光脉冲图。(a)直线腔脉冲序列图;
(b)直线腔脉冲波形图;(c)直角腔脉冲序列图;(d)直角腔脉冲波形图

Fig. 8 Passively Q-switched double cavity dual-frequency laser pulses at pump power of 2.7 W. (a) Pulse sequence of linear cavity; (b) pulse waveform of linear cavity; (c) pulse sequence of right angle cavity; (d) pulse waveform of right angle cavity

通过调节抽运功率,得到了不同重复频率的脉冲序列,可以看出抽运能量的改变对脉冲重复频率的影响非常大。图 9 为激光器输出脉冲重复频率与入射抽运功率的函数关系图。从图中可以看出,直线腔和直角腔的脉冲重复频率随着入射抽运功率的增大均近似呈线性增加,在最大抽运功率为 2.7 W 时,直线腔和直角腔均获得了最大脉冲重复频率为 5.8 kHz 的激光输出,该结果与仿真结果相吻合。当增大抽运功率时,谐振腔的净增益增大,增益介质中反转粒子数的累积速度加快,到达阈值的时间变短, Q 开关被连续漂白的速度变快,使得 Q 开关被打开的时间间隔缩小,从而使重复频率增大。同时,两个腔的重复频率在抽运功率增大的过程中基本保持一致,某些时刻出现的偏差主要是由双腔能量的不稳定性与测量误差的存在导致的,因此可认为两路光在时域上是同步的,在谐振腔各参数确定时,通过增

大抽运功率可以得到高重复频率的双频脉冲激光输出。

图 10 为激光器输出脉冲宽度与入射抽运功率的函数关系图。从图中可以看出,直线腔和直角腔的脉冲宽度随着入射抽运功率的增大不明显,该结果与仿真结果相吻合,其中直线腔和直角腔的脉冲宽度均在 40~46 ns 范围内波动。脉冲宽度主要由初始反转粒子数密度、谐振腔损耗以及腔长三个因素决定,初始反转粒子数密度越大,脉冲建立时间越短,谐振腔的损耗越大,脉冲熄灭时间越短,脉宽与腔长呈正比例关系,当抽运功率变化时,这三个因素没变,所以脉冲宽度不变。实测结果中,脉宽存在一定的波动,这主要是由两个腔之间存在增益竞争导致能量不稳定造成的。

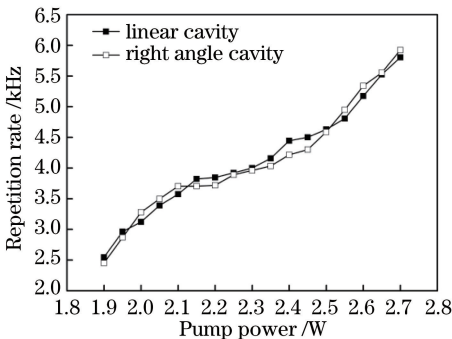


图 9 脉冲重复频率与抽运功率之间的关系
Fig. 9 Relationship between pulse repetition rate and pump power

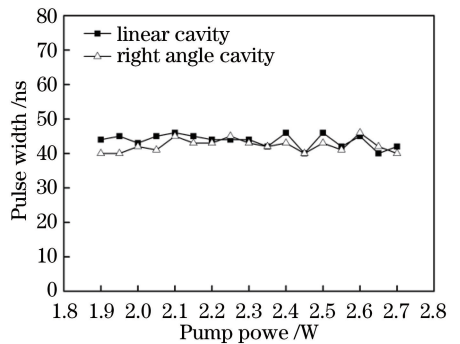


图 10 脉冲宽度与抽运功率之间的关系
Fig. 10 Relationship between pulse width and pump power

4.4 双频脉冲激光的频差测量

为了测量双腔双频脉冲激光的频差大小,采用 WS-7 型激光波长计测量直线腔和直角腔输出激光

的波长。当激光器以双频脉冲激光输出时,分别将直线腔和直角腔的输出激光耦合进激光波长计,实验记录了双腔双频脉冲激光波长随时间的变化规律,如图 11 所示,可以看出,在 20 min 测量时间内,直线腔输出的 p 偏振单频激光的平均波长为 1064.482631 nm,直角腔输出的 s 偏振单频激光的平均波长为 1064.519598 nm,其波长差平均值为 0.0370 nm,相应的频差平均值为 10 GHz。在测量过程中,直线腔单频激光波长的最大值和最小值分别为 1064.48309 nm 和 1064.48263 nm,波长变化量为 0.00046 nm;直角腔单频激光波长的最大值和最小值分别为 1064.51901 nm 和 1064.51847 nm,波长变化量为 0.00054 nm,直线腔和直角腔输出激光的波长稳定性较好。影响双频激光器频差稳定性的因素主要包括晶体的热效应和环境机械振动引起的谐振腔元件的不稳定,热效应引起的频率不稳定一般比较缓慢,而机械振动引起的不稳定一般比较快。本文方案中,由于两路谐振腔共用了一个激光晶体,晶体温度变化对两路谐振腔频率影响的趋势是相同的,因此可以在很大程度上消除热效应引起的频差不稳定。而对于机械振动引起的频差不稳定,需采用被动隔振技术和专门的主动稳频技术进行处理。对于连续激光器,可采用相位调制光外差稳频(即 Pound-Drever-Hall 稳频)技术^[20];对于脉冲式激光器,不能直接采用 Pound-Drever-Hall 稳频技术,后续将开展这方面的研究。

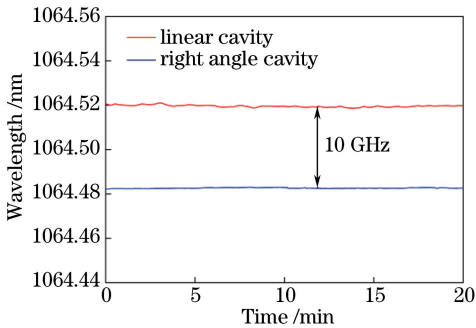


图 11 激光波长稳定性随时间的变化

Fig. 11 Variation of stability of laser wavelength with time

5 结 论

设计了一种二极管抽运被动调 Q 双腔双频 Nd:YAG 激光器,建立了被动调 Q 双腔双频激光器的速率方程,理论分析了双腔脉冲激光的输出特性,实验研究了双腔双频脉冲激光器的选模特性、功率调谐特性、功率稳定性以及脉冲输出特性。研究结

果表明,这种被动调 Q 双腔双频 Nd:YAG 激光器可以稳定输出 1064 nm 正交线偏振双频激光脉冲序列,其峰值功率和重复频率随着 LD 抽运功率的增加而增加,并且脉冲宽度基本上不受 LD 抽运功率的影响,而频差大小主要取决于直线腔和直角腔的腔长和腔内半波片的相位延迟量,实验获得的双频脉冲激光的频差约为 10 GHz。下一步拟在激光器的频率稳定性方面展开深入研究,以获得更为稳定的双频脉冲激光。

参 考 文 献

- [1] Li L, Zhao C M, Zhang P, *et al.* The study on diode-pumped two-frequency solid-state laser with tunable frequency difference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2663-2669.
李磊, 赵长明, 张鹏, 等. 激光二极管抽运频差可调谐双频固体激光器的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(5): 2663-2669.
- [2] Zhang J H, Yang D Z, Gao J, *et al.* Effect of time-frequency disturbance on performance of dual-frequency laser coherent detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061403.
张建华, 杨德钊, 高洁, 等. 时频扰动对双频激光相干探测系统的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061403.
- [3] Li Y H, Wu Z S. Range Doppler detection based on the pulsed two-frequency laser[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(3): 159-163.
李艳辉, 吴振森. 基于双频脉冲激光器的距离多普勒探测[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(3): 159-163.
- [4] Li L, Zhao C M, Gao L, *et al.* Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 249-252.
李磊, 赵长明, 高岚, 等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 249-252.
- [5] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, *et al.* Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5702-5712.
- [6] Li L X, Li L. Progress on pulse-to-pulse coherent beat note generated by two-frequency solid-state lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(6): 591-594.
李立新, 李磊. 双频固体激光器产生相干脉冲输出的研究进展[J]. *激光与红外*, 2009, 39(6): 591-594.
- [7] Jiao M X, Zhang S L, Liang J W. Birefringent dual-frequency Nd:YAG laser with large frequency-difference[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(2): 100-102.

- 焦明星, 张书练, 梁晋文. 大频差双折射双频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(2): 100-102.
- [8] McKay A, Dekker P, Coutts D W, *et al.* Enhanced self-heterodyne performance using a Nd-doped ceramic YAG laser [J]. Optics Communications, 2007, 272(2): 425-430.
- [9] Jiao M X, Xing J H, Liu Y, *et al.* Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid-state laser with large frequency difference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37 (11): 2784-2789.
焦明星, 邢俊红, 刘芸, 等. 双腔大频差双频全固态激光器设计与实验研究 [J]. 中国激光, 2010, 37 (11): 2784-2789.
- [10] Rolland A, Brunel M, Loas G, *et al.* Beat note stabilization of a 10-60 GHz dual-polarization microlaser through optical down conversion [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4399-4404.
- [11] Le Gouët J, Morvan L, Alouini M, *et al.* Dual-frequency single-axis laser using a lead lanthanum zirconate tantalate (PLZT) birefringent etalon for millimeter wave generation: beyond the standard limit of tunability [J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1090-1092.
- [12] Gudelev V G, Mashko V V, Nikeenko N K, *et al.* Diode-pumped cw tunable two-frequency YAG:Nd³⁺ laser with coupled resonators [J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2003, 76(3): 249-252.
- [13] Huang C N, Li Y, Guo H, *et al.* A novel tunable dual-frequency laser with large frequency difference [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13 (3): 229-231.
黄春宁, 李岩, 郭辉, 等. 新型大频差可调谐双频激光器 [J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(3): 229-231.
- [14] Xing J H, Jiao M X. Two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser with a twisted-mode configuration [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 136-141.
邢俊红, 焦明星. 扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器 [J]. 光子学报, 2015, 44(2): 136-141.
- [15] Evtuhov V, Siegman A E. A “twisted-mode” technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. Applied Optics, 1965, 4(1): 142-143.
- [16] Marziyeh E J, Mahdi D B, Morteza H. Pulsed Nd:YAG passive Q-switched laser using Cr³⁺:YAG crystal [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44 (3): 522-527.
- [17] Li M L, Meng P B, Yan F J. Progress on passively Q-switched solid-state lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 090001.
李梦龙, 蒙裴贝, 颜凡江. 高重频被动调 Q 固体激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52 (9): 090001.
- [18] Maleki A, Saghafifar H, Tehrani M K. 57 mJ with 10 ns passively Q-switched diode pumped Nd:YAG laser using Cr³⁺:YAG crystal [J]. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(1): 48.
- [19] Huang H T, Li M, Jin L. Passively Q-switched 1 μm solid-state laser using gold nanorod as saturable absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (7): 0703021.
黄海涛, 李敏, 金琳. 金纳米棒饱和吸收体 1 μm 被动调 Q 固体激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703021.
- [20] Su J, Jiao M X, Ma Y Y, *et al.* Design of Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0316001.
苏娟, 焦明星, 马源源, 等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计 [J]. 中国激光, 2016, 43 (3): 0316001.