

高重复频率窄脉宽电光调 Q Nd:YVO₄激光器

王旭^{1,2} 孙哲¹ 程光华¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用磷酸钛氧钽(RTP)电光偏转器作为调 Q 开关, 实现了连续激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 的激光调 Q 运转。实验研究了输出耦合镜透射率不同、重复频率不同时激光器调 Q 的输出特性。当输出耦合镜透射率为 60%, 在 5 kHz 重复频率运转时, 获得了平均输出功率为 1.22 W、脉冲宽度为 1.0 ns、峰值功率为 244 kW 的调 Q 脉冲输出; 当重复频率为 20 kHz 时, 得到的平均输出功率为 2.67 W, 脉冲宽度为 2.2 ns, 峰值功率为 60.7 kW, 对应斜率效率为 37%, 光束质量因子 $M_x^2 = 1.226$, $M_y^2 = 1.229$ 。并使用磷酸钛氧钾(KTP)晶体对激光器输出的 1064 nm 激光进行了腔外倍频, 获得了重复频率为 20 kHz、平均输出功率为 1.33 W 的 532 nm 绿光输出, 倍频效率为 50%。

关键词 激光器; 电光调 Q; 电光偏转器; 窄脉宽; 高重复频率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601007

High Repetition Rate and Short Pulse Width Electro-Optic Q-Switched Nd:YVO₄ Laser

Wang Xu^{1,2} Sun Zhe¹ Cheng Guanghua¹

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Using the rubidium oxygen titanium phosphate (RTP) electro-optic deflector as a Q-switch, we realize a continuous wave LD-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser and study the output characteristics in experiments at different output coupling rates and different repetition rates. An output pulse train of 1.22 W average output power with pulse width of 1.0 ns and peak power of 224 kW is obtained at the repetition rate of 5 kHz and an output coupler with transmittance of 60%. Another out pulse of 2.67 W average output power with pulse width of 2.2 ns and peak power of 60.7 kW is obtained when the repetition rate is 20 kHz, the slope efficiency is 37%, and the beam quality factors are $M_x^2 = 1.226$, $M_y^2 = 1.229$. Further, by extra-cavity double-frequency based on a potassium titanium oxide phosphate (KTP) crystal, a green laser at 532 nm with repetition rate of 20 kHz and average output power of 1.33 W is obtained, and the corresponding frequency-doubling efficiency is 50%.

Key words lasers; electro-optic Q-switch; electro-optic deflector; short pulse width; high repetition rate

OCIS codes 140.3580; 140.3540; 140.3480

1 引言

激光二极管(LD)抽运的调 Q 固体激光器具有转换效率高、光束质量好、重复频率高、峰值功率大和结构紧凑等优点, 在激光雷达、激光精密加工、光通信、激光测距及医学等领域有着十分重要的应用^[1-3]。目前

收稿日期: 2015-12-21; 收到修改稿日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61223007, 61378019)

作者简介: 王旭(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率固体激光器方面的研究。E-mail: wangxu@opt.cn

导师简介: 程光华(1976-), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事超短脉冲产生及微加工等方面的研究。

E-mail: gcheng@opt.ac.cn(通信联系人)

获得高重复频率、窄脉冲的调 Q 激光通常采用被动调 Q 或主动调 Q 技术。其中被动调 Q 技术成本低、结构简单,但其脉冲重复频率不易控制,输出单脉冲能量相对较低^[4];而主动调 Q 技术具有脉冲重复频率可控、单脉冲能量大、峰值功率高等特点而被广泛使用。常用的主动调 Q 技术包括声光调 Q 技术^[5]和电光调 Q 技术,与声光调 Q 技术相比,电光调 Q 技术具有开关速度快、脉冲宽度窄等优点,可以实现重复频率几赫兹到几十千赫兹、脉冲宽度亚纳秒到纳秒量级的脉冲输出。常用的电光调 Q 晶体有磷酸二氢钾(KDP)、磷酸二氘钾(KD*P)、铌酸锂(LN)、磷酸钛氧铷(RTP)等晶体。其中 RTP 晶体与其他晶体相比较,具有更高的电光系数和光损伤阈值,更容易产生高重复频率和窄脉宽脉冲^[6]。

根据不同的电光调 Q 工作原理,制成的电光调 Q 开关各有优势。目前常见的电光调 Q 有两大类,包括基于晶体克尔效应的加压式和退压式调 Q,以及电光偏转器调 Q。采用 RTP 晶体制成的普克尔盒,通过加压式或退压式调 Q 可以获得窄脉宽、高能量脉冲输出。2008 年,以色列 Raicol Crystals 公司展示了可工作在 1.2 MHz 重复频率下的 RTP 电光调 Q 开关。2010 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的冯宇彤等^[7]利用 RTP 晶体,在重复频率为 30 kHz,抽运功率为 24 W 时,获得了最大平均输出功率为 6.7 W、脉冲宽度为 7.8 ns 的稳定脉冲序列输出。2015 年,山东大学 Cong 等^[8]获得了重复频率为 10 kHz、脉冲宽度为 47.9 ns 的 RTP 电光调 Q Nd:YAG 单纵模激光输出。目前这种调 Q 方式应用最为广泛,技术相对成熟,由于腔内需要加入偏振片,其中加压式调 Q 还需加入 1/4 波片,因此插入损耗较大,结构相对复杂,同时所需电压较高,通常在几千伏左右。而基于电致偏转原理制成的电光偏转器^[9]作为调 Q 开关无需偏振片和 1/4 波片,具有结构简单、插入损耗小、驱动电压小等特点。2008 年,日本东海大学 Horiuchi 等^[10]利用电光偏转器调 Q 获得了重复频率为 1.4 MHz、脉冲宽度为 39 ns 的激光输出。2010 年,该课题组 Baba 等^[11]又利用电光偏转器调 Q 获得了重复频率为 100 kHz~1 MHz 可调、脉冲宽度为 2 ns~2.5 μs 的激光输出。国内目前研究电光偏转器调 Q 的文献较少,用于激光器调 Q 实验研究的文献报道甚少。

本文利用四电极结构 RTP 电光偏转器作为调 Q 开关,采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,研究了不同重复频率下 RTP 调 Q 的输出特性,获得了最高重复频率为 20 kHz、脉冲宽度为 2.2 ns 的 1064 nm 激光输出。相比于传统的电光调 Q 激光器,缩短了腔长,使激光器结构更为紧凑小型化。

2 理论分析

2.1 四电极结构电光偏转器原理

电光偏转器的工作原理是通过晶体的电光效应产生垂直于光束传播方向的线性折射率梯度,从而使光束发生偏转^[12]。电光偏转器的响应速度可达纳秒量级,具有可控性好、无惯性、重量轻、体积小和灵敏度高优点,在光通信、条纹相机及激光制导等领域有着重要的应用。根据不同偏转方式,可以分为数字电光偏转器、光学相控阵电光偏转器和四电极结构电光偏转器等。其中,四电极结构电光偏转器^[9]是利用 4 个电极同时作用在电光晶体上产生线性梯度电场,引起线性折射率梯度变化,从而使入射光束产生偏转,其结构如图 1 所示,当 4 个电极施加电场后,假定 Z 轴方向产生电场梯度分布,沿 Y 轴入射光束经过梯度电场时产生偏转,偏转角度^[11]的计算公式为

$$\theta = Ln_z^3 \gamma_{33} \frac{V}{Dd}, \tag{1}$$

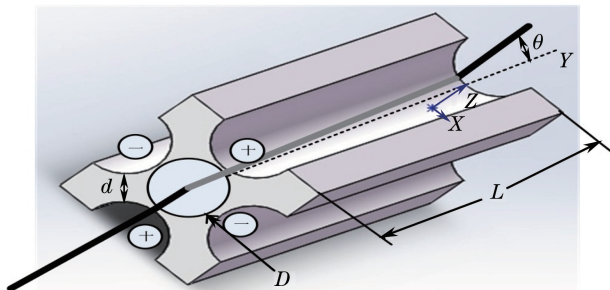


图 1 四电极结构电光偏转器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the quadrupole electro-optic deflector

式中 L 为偏转器长度; n_z 为折射率; γ_{33} 为克尔系数; V 为施加电压; D 为通光孔径; d 为两个相邻电极之间的最短距离。对于本文使用的 RTP 晶体电光偏转器, $\gamma_{33} = 40.5 \text{ pm/V}$, $n_z = 1.85$, $V = 1 \text{ kV}$, $L = 11 \text{ mm}$, $D = 1 \text{ mm}$, $d = 0.6 \text{ mm}$, 计算可得偏转角度约为 5 mrad 。

2.2 脉冲宽度理论分析

根据 Zayhowski 等^[13] 的电光调 Q 理论分析, 最窄脉冲宽度 t_{\min} 的表达式为

$$t_{\min} = 8.1n/(N_0\sigma c), \quad (2)$$

式中 n 为激光晶体的折射率; σ 为激光晶体的受激发射截面; c 为光速; N_0 为粒子数密度, 其表达式为

$$N_0 = \frac{P_{\text{abs}}}{h\nu_p \pi r_m^2 l} \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right)\right] \tau}{\left[1 - (1 - \eta) \exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right)\right]}, \quad (3)$$

式中 P_{abs} 为吸收抽运功率; $h\nu_p$ 为抽运光光子能量; r_m 为振荡光光斑半径; l 为谐振腔腔长; t_p 为调 Q 脉冲时间间隔; τ 为激光晶体的荧光寿命; η 为提取效率。

由(2)式与(3)式可以看出, 当晶体参数、抽运功率、振荡光光斑半径及谐振腔腔长一定时, 重复频率决定了激光脉冲宽度, 重复频率越低, 脉冲宽度越窄; 当晶体参数、抽运功率、振荡光光斑半径及重复频率一定时, 腔长越短, 脉冲宽度越窄。因此, 采用电光偏转器调 Q 省去了偏振片和 1/4 波片, 有效缩短了腔长, 减小了损耗, 更容易实现窄脉宽激光输出。

3 实验研究

3.1 实验装置

LD 抽运的 RTP 电光偏转器调 Q Nd:YVO₄ 激光器实验装置如图 2 所示。实验采用中心波长为 808 nm、最大输出功率为 30 W 的光纤耦合连续激光二极管作为抽运源, 光纤纤芯直径为 200 μm , 数值孔径为 0.22。尾纤输出的抽运光经过 1:2 的准直聚焦透镜后得到腰斑直径为 400 μm 的抽运光, 透镜组耦合效率为 95%。激光晶体 Nd:YVO₄ 中掺杂 Nd³⁺ 离子数分数为 0.5%, 几何尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm, 其中 5 mm 为通光方向长度, 晶体沿 a 轴切割, 前端面镀有 808 nm 的增透膜 (AR) 和 1064 nm 的高反膜 (HR), 后端面镀有 1064 nm 的增透膜。RTP 电光偏转器放置于激光晶体和输出耦合镜 (OC) 之间, 偏转器长度为 11 mm, 通光孔直径为 1 mm, 插入损耗小于 2%。激光晶体前端面和平面输出耦合镜构成了调 Q 激光器的谐振腔, 谐振腔腔长为 19 mm。

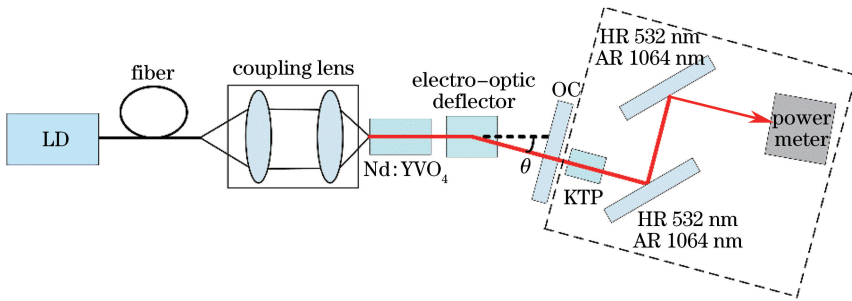


图 2 LD 抽运的 RTP 电光偏转器调 Q Nd:YVO₄ 激光器装置图

Fig. 2 Schematic diagram of LD-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser using RTP electro-optic deflector

实验采用加压电光偏转器调 Q 方式^[14], 当 RTP 电光偏转器加上电压时, RTP 晶体折射率梯度发生变化, 经过偏转器后的光束发生偏转, 调节输出镜, 使输出镜轴向与光束偏转方向一致, Q 开关打开, 形成调 Q 脉冲激光输出; 当 RTP 电光偏转器未加电压时, 光束未发生偏转, 与输出镜成 θ 角度, 不能形成激光振荡, Q 开关为关闭状态。实验中所使用的调 Q 驱动源输出的高压脉冲上升时间为 10 ns, 重复频率在 0~20 kHz 范围内连续可调, 输出高压为 1 kV。实验在室温下进行, 实验过程中采用 Ophir Novo 50A 型功率计测量激光输出的平均功率, 使用美国力科公司的 WM8600A 型 6 GHz 带宽数字示波器和美国索雷博公司 5 G 光电

探头测量调 Q 脉冲波形。

3.2 实验结果与分析

研究了输出耦合镜的透射率($T=50\%$ 、 60% 、 70%)不同、重复频率($f=5$ 、 10 、 15 、 20 kHz)不同时调 Q 激光器的输出特性。图 3(a)、(b)、(c)分别为输出耦合镜透射率为 50% 、 60% 和 70% 时,不同重复频率下平均输出功率随抽运功率的变化关系。从图 3 可以看出,在一定抽运功率范围内,不同重复频率下的平均输出功率随着抽运功率的增大而近似呈线性增长。当输出耦合镜 $T=50\%$,抽运功率超过 8 W 时,出现了输出饱和现象,而输出耦合镜 $T=60\%$ 和 $T=70\%$ 的情况下,平均输出功率并未出现饱和的趋势,这是由于同一抽运功率下,输出耦合镜透射率越低,腔内激光功率密度越高,热透镜效应^[15]越强,腔内增益增长变慢,从而影响了激光器高功率输出。在抽运功率和输出耦合镜透射率一定的情况下,平均输出功率随着重复频率的增加而增大,在输出耦合镜 $T=60\%$ 、重复频率为 20 kHz、抽运功率为 10.5 W 时,获得了最大平均输出功率为 2.67 W,激光晶体 Nd:YVO₄ 实际吸收抽运功率为 9.5 W,斜率效率为 37% ,光-光转换效率为 28.1% 。

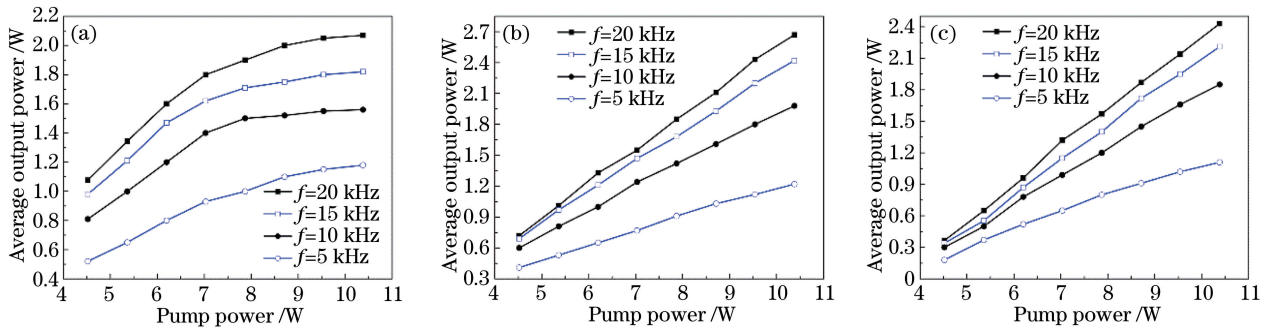


图 3 输出耦合镜的透射率不同、重复频率不同时激光平均输出功率随抽运功率的变化关系。

(a) $T=50\%$; (b) $T=60\%$; (c) $T=70\%$

Fig. 3 Average output power versus pump power at different output coupling rates and different repetition rates.

(a) $T=50\%$; (b) $T=60\%$; (c) $T=70\%$

图 4(a)和(b)分别为抽运功率 10.5 W 时,不同透射率的输出耦合镜下脉冲宽度和峰值功率随重复频率的变化关系。一定透射率的输出耦合镜下,脉冲宽度随着重复频率的减小而逐渐变窄,这是由于重复频率越低,反转粒子数积累的时间越长,则 Q 开关打开时激光作用越强,能在更短的时间内消耗完反转粒子数^[16];峰值功率则随着重复频率的增大而减小。同一重复频率下,输出耦合镜 $T=50\%$ 时,脉冲宽度最大而峰值功率最小,当 $T=60\%$ 时,得到了重复频率为 5 kHz、脉冲宽度为 1 ns 的最短脉冲输出,相应的峰值功率为 244 kW;当最大重复频率为 20 kHz 时,得到了脉冲宽度为 2.2 ns、峰值功率为 60.7 kW 的调 Q 脉冲输出,相应的脉冲波形如图 5 所示。根据(2)式与(3)式计算得到的不同重复频率下的脉冲宽度如图 4(a)所示,与实验结果对比可以看出,实验测得脉冲宽度比理论计算值略大,这主要是由电光偏转器驱动电源输出的高压脉冲上升时间较长、Q 开关速度较慢造成的。

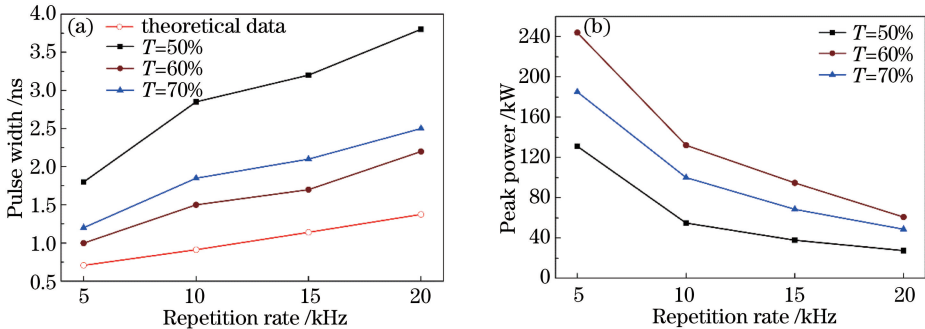


图 4 抽运功率 10.5 W 时不同透射率的输出耦合镜下(a)脉冲宽度和(b)峰值功率随重复频率的变化关系

Fig. 4 (a) Pulse width and (b) peak power versus repetition rate at different output coupling rates with the pump power of 10.5 W

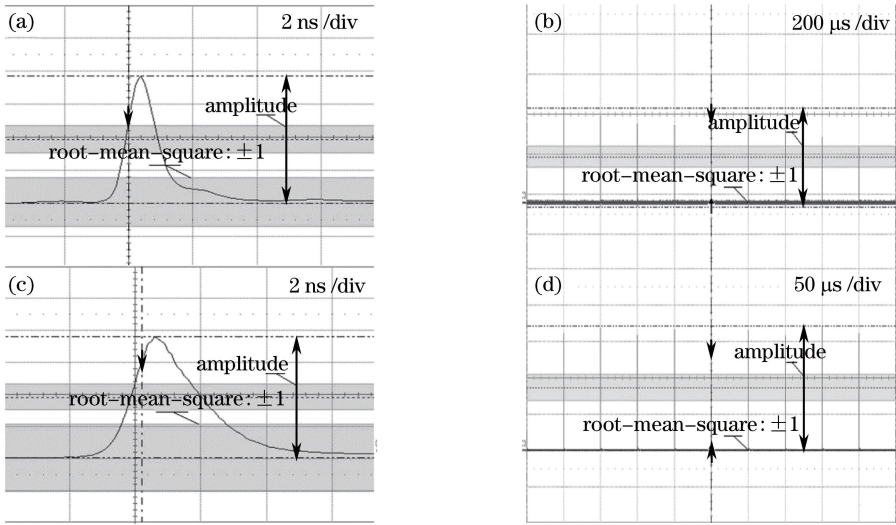


图 5 $T=60\%$ 、不同重复频率时输出脉冲波形。(a) (b) $f=5\text{ kHz}$; (c) (d) $f=20\text{ kHz}$

Fig. 5 Pulse shapes at output coupling rate of 60% and different repetition rates. (a) (b) $f=5\text{ kHz}$; (c) (d) $f=20\text{ kHz}$

在重复频率为 20 kHz、平均输出功率为 2.67 W 时,利用偏振分光棱镜测量输出激光的偏振特性。实验测得输出激光为线偏振光,偏振比大于 1000 : 1。这是由于 RTP 电光偏转器利用了 RTP 晶体的双折射效应,光束在晶体内分解为 o 光和 e 光,偏转器只对其中一种线偏振光起振,因此省去了偏振片。利用 M2-200S 光束质量分析仪测得输出激光的光束质量因子 $M_x^2 = 1.226, M_y^2 = 1.229$,如图 6 所示,光斑对称性良好。通过实验优化了输出耦合镜的透射率,当输出耦合镜 $T=60\%$ 时,激光器在高重复频率下获得了更窄的脉冲宽度和更高的峰值功率。受高频高压驱动源所限,未能进行高于 20 kHz 重复频率的实验。

输出耦合镜 $T=60\%$ 的条件下,在腔外加入磷酸钛氧钾(KTP)晶体进行腔外倍频实验研究,获得了波长为 532 nm 的绿光输出,激光器结构如图 2 所示。所用 KTP 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm,通光方向为 8 mm 长度方向,属于 II 类临界相位匹配(切割角度: $\theta=90^\circ, \phi=23.5^\circ$),晶体两端镀有 1064 nm 和 532 nm 的高透膜,置于输出镜之后放置。倍频激光经过一组双色镜反射后,使用功率计测量 532 nm 激光功率。不同重复频率下倍频激光平均输出功率随抽运功率的变化关系如图 7 所示,当抽运功率为 10.5 W、最大重复频率为 20 kHz 时,获得了平均输出功率为 1.33 W 的绿光输出,对应的倍频效率为 50%。

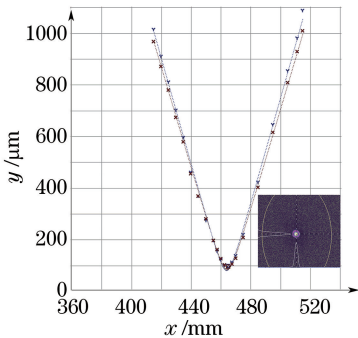


图 6 平均输出功率 2.67 W 时光束质量因子

Fig. 6 Beam quality at average output power of 2.67 W

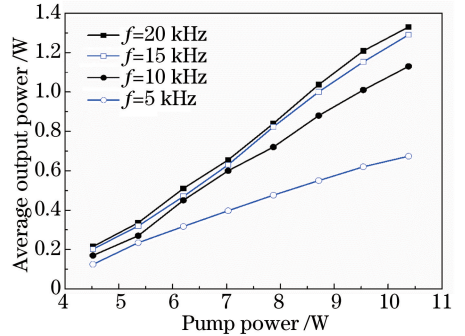


图 7 不同重复频率下倍频激光平均输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 7 Average output power of frequency-doubling laser versus pump power at different repetition rates

4 结 论

利用 RTP 电光偏转器作为调 Q 开关,实现了高重复频率窄脉宽电光调 Q 激光输出。当输出耦合镜 $T=60\%$ 时,获得了最大重复频率为 20 kHz、平均输出功率为 2.67 W、脉冲宽度为 2.2 ns、峰值功率为

60.7 kW的调Q脉冲输出,斜率效率为37%,光束质量因子 $M_x^2 = 1.226, M_y^2 = 1.229$ 。在不同重复频率条件下,使用KTP晶体对激光器输出的调Q激光进行了腔外倍频,在重复频率为20 kHz时,获得了平均输出功率1.33 W的绿光输出,对应倍频效率为50%。实验结果表明,RTP电光偏转器调Q可以获得高重复频率窄脉宽激光输出,相比传统加压式调Q省去了偏振片和1/4波片,同时具有所需驱动电压小、激光器结构更加简单紧凑等优点。

参 考 文 献

- Butler A C, Spence D J, Coutts D W. Scaling Q-switched microchip lasers for shortest pulses[J]. Applied Physics B, 2012, 109(1): 81-88.
- Hendow S T, Shakir S A. Structuring materials with nanosecond laser pulses[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10188-10199.
- Ma Huijun, Li Xiaoli, Zhu Xiaolei, *et al.*. Investigation on the characteristic of kHz all-solid-state laser for airborne lidar ocean survey[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1197-1201.
马惠军, 李小莉, 朱小磊, 等. 机载测深激光雷达千赫兹全固态激光器设计及特性研究[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1197-1201.
- Dong J, Ueda K, Shirakawa A, *et al.*. Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14516-14523.
- Cai H, Zhou J, Zhao H M, *et al.*. Continuous-wave and Q-switched performance of an Yb:YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970-nm laser diode[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(11): 852-854.
- Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli, *et al.*. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1654-1659.
朱小磊, 唐昊, 李小莉, 等. 高重复频率电光调Q全固态激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1654-1659.
- Feng Yutong, Zhu Xiaolei, Tang Hao, *et al.*. Characteristics of RbTiOPO₄ electro-optic Q-switch operation at high repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 617-621.
冯宇彤, 朱小磊, 唐昊, 等. 磷酸钛氧钼高重复率电光调Q特性[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 617-621.
- Cong Z H, Liu Z J, Qin Z G, *et al.*. RTP Q-switched single-longitudinal-mode Nd:YAG laser with a twisted-mode cavity[J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5143-5146.
- Friel G J, Conroy R S, Kemp A J, *et al.*. Q-switching of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser using a quadrupole electro-optic deflector[J]. Applied Physics B, 1998, 67(2): 267-270.
- Horiuchi R, Adachi K, Watanabe G, *et al.*. 1.4-MHz repetition rate electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. Optics Express, 2008, 16(21): 16729-16734.
- Baba M, Fujishiro T, Yamaguchi S, *et al.*. Linearly polarized 100-kW-peak-power pulsed fiber laser with a novel master oscillator[J]. Optical Review, 2010, 17(2): 50-53.
- Lu Xiuquan, Chen Shaoh, Shen Dezhong. A KNbO₃ electro-optic deflector[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(6): 519-522.
卢秀权, 陈绍和, 沈德忠. KNbO₃电光偏转器[J]. 中国激光, 1998, 25(6): 519-522.
- Zayhowski J J, Dill C. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates[J]. Optics Letters, 1992, 17(17): 1201-1203.
- Conroy R S, Rae C F, Friel G J, *et al.*. Compact low-threshold Q-switched intracavity optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 1998, 23(17): 1348-1350.
- Duan Y, Zhu H, Ye Y, *et al.*. Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1314-1317.
- Yu Y J, Chen X Y, Wang C, *et al.*. High repetition rate 880 nm diode-directly-pumped electro-optic Q-switched Nd:GdVO₄ laser with a double-crystal RTP electro-optic modulator[J]. Optics Communications, 2013, 304: 39-42.