

文章编号 1004-924X(2016)增-0035-06

高功率窄线宽微秒脉冲 1 064 nm 环形腔激光

鲁远甫¹, 谢仕永^{2*}, 刘艳², 杨程亮², 王鹏远³

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东深圳 518055;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;

3. 中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁大连 116023)

摘要: 为了实现高效和频的高功率准连续波钠信标激光, 对抑制弛豫振荡的高功率窄线宽微秒脉冲 1064 nm 环形腔激光进行了研究。采用热近非稳腔设计优化了三镜环形腔的腔镜曲率, 腔内插入标准具压窄激光线宽。1 064 nm 薄膜偏振片用作环形腔的输出镜, 与半波片配合实现输出耦合率的连续可调。在 808 nm 半导体激光泵浦功率为 175 W 的条件下, 获得了输出功率为 42 W、光束质量因子 $M^2=1.26$ 、线宽为 0.2 GHz 的 1 064 nm 激光输出, 重复频率为 800 Hz, 脉冲宽度为 100 μ s。腔内插入 1 064 nm 的倍频晶体 KTiOPO_4 , 利用二次谐波效应使高强度的尖峰脉冲序列快速减弱, 实现了激光脉冲弛豫振荡的有效抑制。整个系统结构简单、易实现, 为获得消弛豫振荡的准连续波 1 064 nm 激光提供了实用有效的技术手段。

关键词: 脉冲激光器; 环形腔激光; 钠信标激光; 弛豫振荡; 热近非稳腔; KTiOPO_4 (KTP)

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0035

High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser

LU Yuan-fu¹, XIE Shi-yong^{2*}, LIU Yan², YANG Cheng-liang², WANG Peng-yuan³

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of
Sciences, Shenzhen 518055, China;

2. National Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: shiyong515@163.com

Abstract: In order to realize high-power quasi-continuous wave sodium beacon laser with high-efficiency sum frequency, 1064 nm ring-cavity laser of high-power narrow-linewidth microsecond pulse which restrains relaxation oscillation was studied. A thermally near unstable cavity was adopted to optimize curvature of three-scope ring endoscope, inserting an etalon in cavity to narrow laser linewidth. Using a 1064 nm thin-film polaroid as output mirror of ring cavity and a half wave plate, a continuous adjust-

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-06-08.

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金资助项目 (No. 37730301); 深圳市科技计划资助项目 (No. CXZZ20140609162846202, JCYJ20140417113130693, GJHZ20140417113430592, JCYJ20150925163313898)

able output coupling ratio was realized. Under the condition of 808 nm semiconductor laser with pumping power of 175 W, 1 064 nm laser output with output power of 42 W, beam quality factor $M^2=1.26$, linewidth of 0.2 GHz was acquired. Its repetition frequency is 800 Hz and pulse width is 100 μs . The relaxation oscillation of laser pulse was effectively suppressed by inserting 1 064 nm frequency-doubling crystal KTiOPO₄ in cavity and using second harmonic effect to rapid weaken high-strength spike pulse sequence. The whole system is pretty simple, which provides the practical and effective technical method for obtaining 1064 nm laser of quasi-continuous wave without relaxation oscillation.

Key words: pulse laser; ring-cavity laser; sodium beacon laser; relaxation oscillation; thermally near unstable cavity; KTiOPO₄ (KTP)

1 引言

窄线宽 1 064 nm 激光可以用作光参量振荡器(OPO)的抽运源以扩展激光的波长^[1],还可以应用于量子光学和量子通信^[2]、引力波探测^[3]以及冷原子物理^[4]等领域。此外,高功率窄线宽 Nd : YAG 1 064 nm 激光与 Nd : YAG 的另一条谱线 1 319 nm 激光通过非线性和频效应得到的与钠原子 D₂线共振的 589 nm 黄光被称为钠信标激光^[5-8],该激光激发大气电离层的钠原子产生的钠信标是自适应光学系统的理想信标。与连续波运转的钠信标光源相比,准连续微秒脉冲方式运转的钠信标光源,不仅可以提供门脉冲时间选通机制,消除大气瑞利散射的干扰,提高钠信标信号的信噪比;还可以减小钠导星像斑拉长现象,提高钠导星的成像精度,从而实现自适应光学系统更好的校正效果^[9]。

然而,在自由运转下微秒脉冲激光器输出的并不是平滑的光脉冲,而是一群宽度只有微秒量级的短脉冲尖峰序列,即弛豫振荡。微秒脉冲 1 064 与 1 319 nm 激光和频产生钠信标激光时,尖峰脉冲的高峰值功率容易引起非线性和频晶体的损伤,同时两波长尖峰序列间隔的不同还会引起 1 064 与 1 319 nm 激光脉冲时域交叠不好,降低和频效率。另外,产生的 589 nm 激光由于存在尖峰脉冲而容易使中圈层钠原子对其吸收出现饱和,导致导星回波效率降低。通过高压、高速负反馈的腔内普克尔盒可以实现对弛豫振荡的主动抑制^[10],但是此方法相对复杂。用饱和吸收体(苯池)可以实现对尖峰序列的被动抑制^[11],但不能实现激光强度度和脉冲持续的控制。通过控制谐振腔 Q 参数也可以获得激光尖峰效应的被动

抑制^[12],不过此时激光器输出的光斑发散角较大。腔内插入非线性晶体,通过二次谐波使高强度的尖峰脉冲减弱是抑制弛豫振荡的有效手段。Jeys 等利用灯泵 1 064 nm Nd : YAG 激光腔内 LiIO₃ (LIO)晶体的二次谐波效应成功抑制了弛豫振荡^[13]。

对于均匀增宽的 Nd : YAG 1 064 nm 跃迁,采用驻波腔会存在空间烧孔效应,造成腔内光强分布的空间纵向不均匀,导致多纵模振荡,使输出激光谱线增宽。环形腔使激光在腔内以行波方式运转,消除了空间烧孔效应,当腔内某一纵模起振后会消耗其他纵模的增益,从而抑制了多纵模起振,被广泛用以获得窄线宽激光输出^[14-16]。本文采用 Nd : YAG 三镜环形腔内插入 KTiOPO₄ (KTP)产生消弛豫振荡的窄线宽准连续微秒脉冲 1 064 nm 激光。薄膜偏振片一方面与法拉第旋光器、半波片组合实现环形腔激光单向运转,一方面用作输出耦合镜,与半波片配合实现对输出耦合率的优化调节。利用热近非稳腔设计优化了腔镜曲率。实验结果表明插入非线性频晶体可以以极小的功率损耗带来弛豫振荡的有效抑制。

2 实验及分析

2.1 实验装置

1 064 nm Nd : YAG 三镜环形腔光路如图 1 所示,包括腔镜 M₁、M₂ 及 P₁,激光泵浦模块 LM₁ 和 LM₂,1 064 nm 90°旋光晶体 QR,标准具 FP,法拉第旋光器 FR,1 064 nm 半波片 HW 以及晶体 KTP。其中,M₁、M₂ 镀 17° 1 064 nm 高反膜,P₁ 为 1 064 nm 薄膜偏振片,对 1 064 nm 进行起偏,使得垂直偏振的 s 光反射,水平偏振的 p 光透射。偏振片与法拉第旋光器及半波片形成一个

“光学二极管”,使环形腔内的激光单向运转。标准具 FP 置于两激光泵浦模块之间,引入纵模的差异损耗来抑制多纵模起振,实现对激光线宽的压窄。晶体 KTP 通过对 1064 nm 激光的二次谐波效应来抑制微秒脉冲激光的弛豫振荡。标准具与 KTP 分别通过温控仪进行控温,控温精度为 0.1 °C。两个激光泵浦模块均采用侧面泵浦,每个泵浦模块包括 3 个平均功率为 30 W(800 Hz, 150 μs)的 LD 列阵和一个 Nd:YAG 圆棒,LD 列阵从侧面三向对称泵浦 Nd:YAG 棒,提供最大 90 W 的 808 nm 泵浦,激光棒长 80 mm,直径为 2.5 mm, Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 0.6%。使用较低的掺杂浓度可使激光棒中的增益分布更为均匀,因而可提高光束质量。激光头中的 Nd:YAG 棒比双面镀 1 064 nm 高透膜,以降低激光棒端面的反射损耗。激光棒放于一石英玻璃管中,冷却循环水在激光棒和石英管之间高速流动,以带走泵浦过程中产生的废热,对激光棒进行冷却。激光头之间插入一块相应波长的 90°石英旋光晶体,用来补偿热致双折射效应。

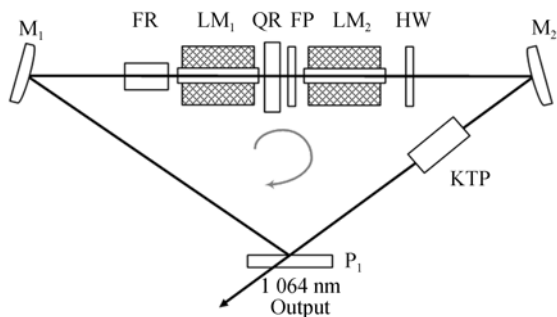


图 1 1 064 nm 三镜环形腔实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental devices of 1 064 nm three mirror ring cavity

2.2 热近非稳腔设计

采用热近非稳腔的设计,即 1 064 nm 环形腔激光器运行在稳区的边缘接近非稳区的位置,以使 Nd:YAG 棒中能获得大的基模半径,这样一方面可以尽可能多地提取泵浦能量,获得高功率激光输出;另一方面可利用激光介质本身的横向尺寸起到限模光阑的作用,抑制高阶模式起振,获得基横模输出,有利于提高振荡激光的光束质量。环形腔中腔内光束沿环形闭合光路传输,为了分析腔内光束的传输特性和计算模参数,将激光介

质等效为透镜,并假设透镜中心就在激光棒的中心。从一根激光棒中心参考面处截断,展开成一个等效的多元件直腔处理,采用 ABCD 传输矩阵对谐振腔的模式进行了理论计算。基于 ABCD 矩阵的基模半径为:

$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} |B|^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{-1/4}, \quad (1)$$

其中: A、B 和 D 分别是 ABCD 矩阵的对应元素。在腔长为 1 476 mm 条件下,数值模拟了环形腔镜 M₁、M₂ 的曲率半径分别取 ∞、-1 000 和 -500 mm 时的激光工作稳区,如图 2 所示。可以看出随着镜 M₁、M₂ 曲率半径的减小,一方面稳区左移,这就意味着激光器在稳区工作时可以获得的最大泵浦功率逐渐提高,输出激光功率也会不断增大;另一方面,稳区内基模光斑半径逐渐变大,更有利于提高输出激光的光束质量。测试了激光棒在最大泵浦功率下热透镜焦距为 350 mm,然而,腔镜曲率半径为 -500 mm 时,若使激光器运行在稳区最左端,所需热焦距小于 300 mm,因此选用曲率半径为 -1 000 mm 的方案,使环形腔运转在 U 型曲线左端的稳定区边缘。

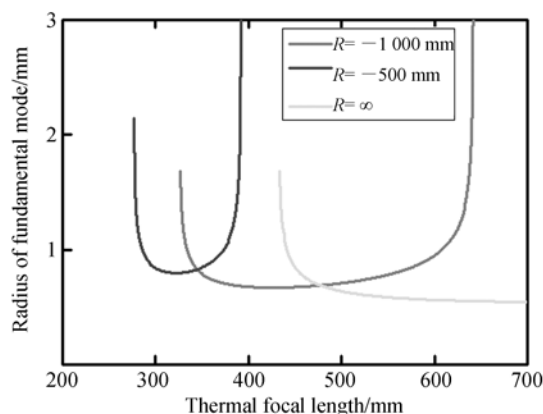


图 2 不同曲率腔镜下激光工作稳区

Fig. 2 Stable regions of laser operating under different curvatures of cavity mirror

2.3 腔内插入倍频晶体抑制弛豫振荡理论

在微秒脉冲激光的产生过程中,在泵浦初始阶段谐振腔内没有足够的受激辐射消耗增益,因此在泵浦开始后激光增益可以远远超过稳态时的增益。这种初始的高增益将导致高强度激光的快速建立,而高强度的激光又会快速消耗增益,导致激光强度大大下降。在持续的泵浦作用下,以上

过程不断持续下去,形成一个又一个的尖峰脉冲,即弛豫振荡。腔内插入非线性倍频晶体,高强度的尖峰脉冲由于部分转化为二次谐波而强度减弱,其消耗的增益也就相应减少,使得腔内还有一定的激光存在;而下一个尖峰脉冲产生时的增益也不会远远超过稳态的增益,如此下去产生的尖峰脉冲将会很快平稳,从而实现对弛豫振荡的抑制。

本文通过理论计算解释腔内插入倍频晶体抑制弛豫振荡,从激光速率方程出发,微秒脉冲激光的速率方程可表示为^[17]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = c\Phi\sigma N - \frac{\Phi}{\tau_p} + s, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -c\Phi\sigma N - \frac{\Phi}{\tau_f} + W_p(N_{\text{ground}} - N), \quad (3)$$

其中: Φ 是光子数密度, σ 是受激发射截面面积, N 是反转粒子数密度, c 是光速, τ_p 是光子寿命, τ_f 是荧光寿命, W_p 是泵浦速率, s 是自发辐射速率。

为了将上式中的参数转化为可测量的量,经转换可得以下微分方程:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = KPE - \frac{c}{l}AP + S, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{l}{c}KPE - \frac{E}{\tau_f} + W, \quad (5)$$

其中: P 是激光功率, E 是在激光棒模式体积中的储能, $K = \frac{c\sigma}{h\nu V}$, V 是模式体积, l 是谐振腔总长, S 是自发辐射产生的功率,损耗常数 $A = -\ln(R)$, R 是输出耦合镜的反射率, W 是传递到激光棒上能级的泵浦功率。当腔内插入倍频晶体后,引入了一正比于激光功率平方的损耗,于是式(4)变为:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = KPE - \frac{c}{l}AP - \frac{c}{l}\alpha P^2 + S, \quad (6)$$

其中: α 正比于倍频晶体的非线性系数。

代入相关参数,数值求解式(5)和式(6)可知腔内插入非线性倍频晶体后,高强度的尖峰脉冲由于部分转化为二次谐波而强度减弱,尖峰脉冲序列很快就被抑制。

2.4 实验结果

本实验中,1 064 nm 薄膜偏振片除了用于构成“光学二极管”,同时也作为环形腔的输出耦合镜,与半波片配合实现激光器的输出耦合率可调,其输出耦合率可表示为^[18]:

$$T = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(4\theta - \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (7)$$

其中 θ 是半波片主轴与水平方向的夹角。通过旋

转半波片改变 θ 值即可改变振荡腔的输出耦合率,使激光输出耦合率连续可调,实现激光器以最佳耦合率输出。激光器以热近非稳腔运转,1 064 nm 激光的输出功率随 LD 泵浦功率的变化曲线如图 3 所示。在重复频率为 800 Hz 的条件下,808 nm LD 泵浦功率为 175 W 时,可以获得平均功率为 42 W 的 1 064 nm 偏振激光输出,相应的光-光转换效率为 24%。

利用光束质量分析仪 (M^2 -200, Spiricon Inc.) 对输出功率为 42 W 时的 1 064 nm 激光进行光束质量测量,测量结果如图 4 所示,测量到的光束质量因子 $M_x^2 = 1.25$ 和 $M_y^2 = 1.27$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.26$ 。

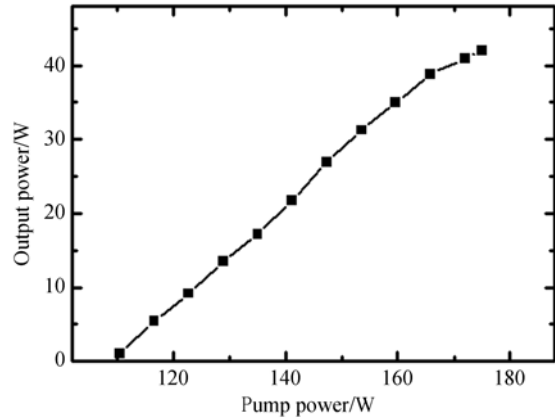


图 3 1 064 nm 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of 1 064 nm laser output power with LD pump power

利用自由光谱区 (FSR) 1.5 GHz、精细度为 200 的 F-P 共焦球面扫描干涉仪对 1 064 nm 激光线宽进行测量,结果如图 5 所示。图中两个峰之间对应一个自由光谱区,通过比较每个峰的宽度与峰峰之间的宽度,得出 1 064 nm 种子源激光线宽的半高全宽 (FWHM) 为 0.2 GHz。

本实验采用腔内插入 1 064 nm 倍频晶体 KTP 对弛豫振荡进行抑制。KTP 晶体尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm,采用 II 类临界相位匹配,匹配温度为 40℃,前后通光面均镀有 1 064 nm 的增透膜。1 064 nm 激光脉冲波形通过一硅光电探测器 (DET10A, Thorlabs) 和示波器 (DPO 4104, Tektronix) 进行测量,测量结果如图 6 所示。其中,图 6(a) 为未插入 KTP 自由运转时的脉冲波形,可以看出输出激光并不是一个平滑的光脉

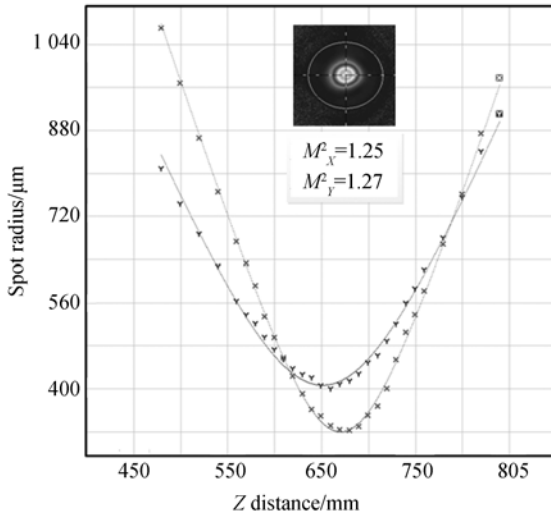


图 4 1 064 nm 激光的光束质量测量结果

Fig. 4 Beam quality of 1 064 nm laser

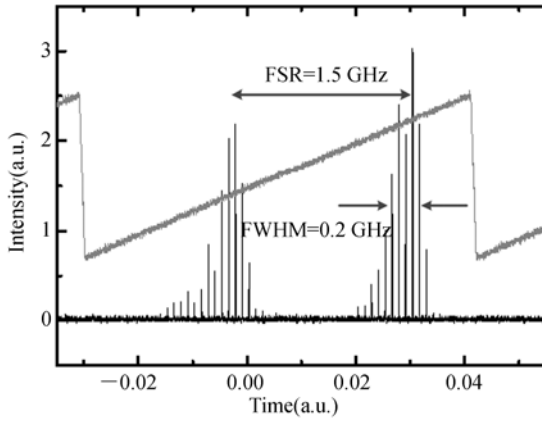


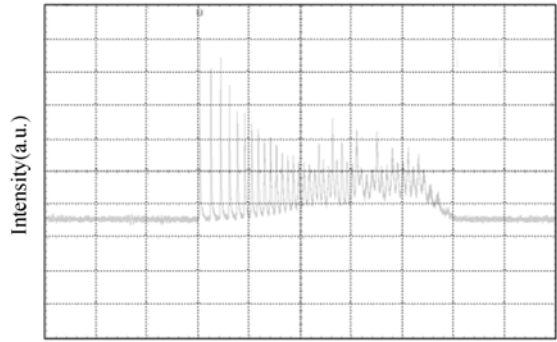
图 5 1 064 nm 激光的线宽测量结果

Fig. 5 Linewidth of 1 064 nm laser

冲,而是一群宽度只有微秒量级的短脉冲序列,存在强烈的弛豫振荡效应。图 6(b)为腔内插入 KTP 后的脉冲波形,光脉冲经过建立初期的几个尖峰脉冲后很快变平滑,尖峰序列被迅速减弱,对脉冲 15 μs 后的尖峰序列实现了完全抑制,测得弛豫振荡抑制之后的激光脉宽约为 100 μs 。此外,还对弛豫振荡抑制前后的激光输出功率进行了测量,发现功率损耗仅为 1%,因此插入非线性倍频晶体可以以极小的功率损耗有效抑制弛豫振荡。

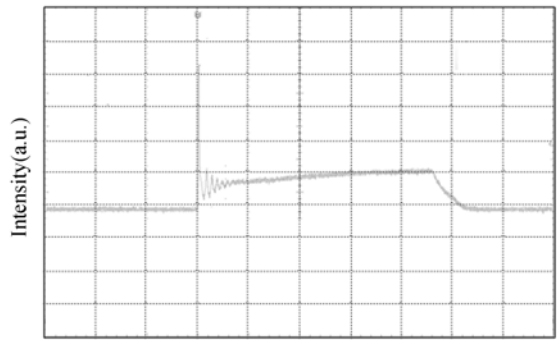
3 结 论

本文采用了腔内插入 KTP 的 Nd : YAG 三



(a)自由运转时

(a)Free running



(b)腔内插入KTP后

(b)Inserting KTP in cavity

图 6 1 064 nm 激光脉冲波形

Fig. 6 Pulse waveforms of 1 064 nm laser

镜环形腔获得弛豫振荡抑制的高功率高光束质量准连续微秒脉冲 1 064 nm 激光。薄膜偏振片用作输出耦合镜,通过旋转半波片改变其主轴与水平方向的夹角可使激光输出耦合率连续可调,实现激光器以最佳耦合率输出。热近非稳腔运转条件下获得最大功率为 42 W 的 1064 nm 偏振激光输出,光束质量 $M^2 = 1.26$,线宽为 0.2 GHz,重复频率为 800 Hz,脉冲宽度为 100 μs 。采用腔内插入 1 064 nm 倍频晶体 KTP 对弛豫振荡进行抑制,脉冲建立初期的尖峰被迅速减弱,15 μs 后的尖峰序列实现了完全抑制,弛豫振荡抑制前后的激光输出功率损耗仅为 1%,证明了插入非线性倍频晶体可以以极小的功率损耗带来弛豫振荡的有效抑制。整个系统相对简单、较易实现,为获得高功率消弛豫振荡的准连续微秒脉冲 1 064 nm 激光提供了实用有效的技术手段,同时也为实现高效和频的高功率准连续波钠信标激光奠定了基础。

参考文献:

- [1] KOVALCHUK E V, DEKORSY D, LVOVSKY A I, *et al.*. High-resolution Doppler-free molecular spectroscopy with a continuous wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(18): 1430-1432.
- [2] WU L A, XIAO M, KIMBLE H J. Squeezed states of light from an optical parametric oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, 4(10): 1465-1475.
- [3] WILLKE B. GEO600: status and plans [J]. *Class Quantum Grav.*, 2007, 24(19): S389-S397.
- [4] KUHR S, ALT W, SCHRADER D, *et al.*. Deterministic delivery of a single atom [J]. *Science*, 2001, 293(5528): 278-280.
- [5] 刘杰,王建立,吕天宇,等. 全固态 589 nm 激光器及其钠导星激发亮度 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(12): 3199-3204.
LIU J, WANG J L, LÜ T Y, *et al.*. All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3199-3204. (in Chinese)
- [6] BIENFANG J C, DENMAN C A, GRIME B W, *et al.*. 20 W of continuous-wave sodium D2 resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2219-2221.
- [7] FUGATE R Q, DENMAN C A, HILLMAN P D, *et al.*. Progress toward a 50-watt facility-class sodium guide star pump laser [J]. *SPIE*, 2004, 5490: 1010-1020.
- [8] TAYLOR L R, FENG Y, CALIA D B. 50W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [9] 许祖彦,谢仕永,薄勇,等. 30 W 级第二代钠信标激光器研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 101-103.
XU Z Y, XIE S Y, BO Y, *et al.*. Investigation of 30 W-class second-generation sodium beacon laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 101-103. (in Chinese)
- [10] PANARELLA E, BRADLEY L. Controlled time-wise redistribution of laser energy [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1975, 11(5): 181-85.
- [11] PANTELL R H, WARSZAWSKI J. Laser power stabilization by means of nonlinear absorption [J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(7): 213-15.
- [12] SANDOVAL R P. Resonator configuration for the suppression of relaxation oscillations in a long-pulsed Nd : YAG laser [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(9): 1328-33.
- [13] JEYS T H. Suppression of laser spiking by intracavity second harmonic generation [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(9): 1011-1013.
- [14] OKHAPKIN M V, SKVORTSON M N, BELKIN A M, *et al.*. Tunable single-frequency diode-pumped Nd : YAG ring laser at 1064/532 nm for optical frequency standard applications [J]. *Optics Communications*, 2002, 203(5): 359-362.
- [15] WANG P Y, XIE SH Y, BO Y, *et al.*. 33W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 094208.
- [16] XI W Q, ZHAO J Y, ZHANG K SH. A high-power continuous-wave laser-diode end-pumped Nd : YVO₄ laser of single-frequency operation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(5): 1144-1146.
- [17] JOHNSON R P. Spike suppression and longitudinal mode selection in a 1.319 mm Nd : YAG laser by high-efficiency intracavity frequency doubling [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40: 1078-1081.
- [18] 王鹏远. 高功率准连续微秒脉冲全固态钠信标激光技术研究及应用[D]. 北京:中科院理化技术研究所, 2014.
WANG P Y. *Investigation and Application of High Power Quasi-continuous-wave Microsecond Pulse Diode-pumped Solide-state Sodium Beacon Laser Technology* [D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

作者简介:



鲁远甫(1981—),男,甘肃酒泉人,博士,副研究员,硕士生导师,2009 年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要激光技术、太赫兹技术及其应用的研究。E-mail: yf.lu@siat.ac.cn

通讯作者:



谢仕永(1984—),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,2011 年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事高功率窄线宽全固态激光技术的研究。E-mail: shiyong515@163.com