

885 nm 双端泵准连续微秒脉冲 1319 nm 三镜环形腔激光

谢仕永 张小富 乐小云 杨程亮 薄勇 王鹏远 许祖彦

A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm
Xie Shi-Yong Zhang Xiao-Fu Le Xiao-Yun Yang Cheng-Liang Bo Yong Wang Peng-Yuan Xu Zu-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 154205 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.154205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

物理学报.2015, 64(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1064 nm 激光器

A 28.2-W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1064 nm

物理学报.2014, 63(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214206>

用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究

Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave

物理学报.2013, 62(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204205>

角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器

Corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser

物理学报.2013, 62(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144205>

端抽运 Yb³⁺:YVO₄ 激光准三能级理论模型研究

The modeling of end pumping Yb³⁺:YVO₄ quasi-three-level laser

物理学报.2013, 62(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114206>

885 nm双端泵准连续微秒脉冲1319 nm 三镜环形腔激光*

谢仕永¹⁾²⁾ 张小富^{1)†} 乐小云¹⁾ 杨程亮²⁾ 薄勇³⁾ 王鹏远⁴⁾ 许祖彦³⁾

1) (北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

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, 长春 130033)

3) (中国科学院理化技术研究所, 激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

4) (中国科学院大连化学物理研究所, 化学激光重点实验室, 大连 116023)

(2016年3月25日收到; 2016年5月19日收到修改稿)

采用885 nm半导体激光双端泵Nd:YAG三镜环形腔获取高功率、高光束质量、可调谐的准连续微秒脉冲1319 nm激光。通过腔镜镀膜和腔内插入标准具, 分别抑制Nd:YAG的1064 nm与1338 nm谱线起振。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连续可调。885 nm抽运功率150 W时, 在热近非稳腔运转条件下获得重复频率800 Hz、脉冲宽度150 μ s、平均功率22.5 W的1319 nm偏振激光输出, 光束质量因子 $M_x^2 = 1.35$, $M_y^2 = 1.24$ 。腔内插入1319 nm的倍频晶体KTiOPO₄, 通过二次谐波效应使高强度的尖峰脉冲序列减弱, 实现激光脉冲弛豫振荡的有效抑制。精确控制标准具温度, 实现激光波长从1318.888 nm精细调谐到1319.358 nm, 调谐范围为470 pm (81 GHz), 相应的调谐精度为0.7 pm (125 MHz)。

关键词: 885 nm双端泵, 环形腔, 弛豫振荡, 波长调谐

PACS: 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.60.Rn, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.65.154205

1 引言

1319 nm激光波长处于二氧化硅光纤的低色散、低损耗区, 是光纤通信必不可少的理想光源^[1,2]。1319 nm波长激光具有优良的生物医学效应, 在激光医疗领域有着重要应用^[3]。对1319 nm激光倍频和三倍频产生的660 nm红光和440 nm蓝光作为三元色光, 可用于激光彩色显示^[4-6]。此外, 1319 nm激光与非常接近的Nd:YAG另一谱线1338 nm通过非线性光学差频可获得高相干性太赫兹波^[7,8], 在医学成像、公共安全等领域具有广阔的应用前景; 1319 nm激光与Nd:YAG主要谱线1064 nm通过非线性光学和频可获得与钠原子共

振的589 nm黄光^[9,10], 已成功应用于自适应光学系统。808 nm半导体激光(LD)抽运Nd:YAG晶体是获得1319 nm激光输出的有效手段^[11-13]。近年来, 随着885 nm LD技术的不断发展完善, 由其作为抽运源的直接抽运技术可以有效减少晶体热效应和提高光-光转换效率, 已成为研究热点^[14-17]。Li等^[16]通过885 nm LD端泵Nd:YAG晶体的四镜环形腔获得1.86 W的连续波单频1319 nm激光输出; Lü等^[17]采用885 nm LD端泵Nd:YAG晶体的平凹腔产生了9.1 W的连续波1319 nm激光。

准连续微秒脉冲运转的1319 nm与1064 nm激光和频产生的钠信标激光, 通过门脉冲选通机制可消除大气瑞利散射干扰和减小钠导引星像斑拉长现象, 从而实现自适应光学系统更好的校正

* 应用光学国家重点实验室开放基金、国家自然科学基金(批准号: 61205101)和深圳市科技计划项目(批准号: GJHZ20140417113430592, JCYJ20140417113130693, JCYJ20150925163313898)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: xfzhang@buaa.edu.cn

效果^[18]. 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. 短脉冲的高峰值功率容易引起非线性晶体的损伤, 另外短脉冲序列还会引起1319 nm与1064 nm激光脉冲时间交叠不佳, 降低和频效率. 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^[19]利用灯泵1064 nm Nd:YAG激光腔内LiIO₃(LIO)晶体的二次谐波效应, 实现弛豫振荡的抑制. Johnson等^[20]使用LiB₃O₅(LBO)晶体作为腔内倍频器, 成功抑制了灯泵1319 nm Nd:YAG环形腔激光器输出脉冲的尖峰行为.

对于均匀增宽的Nd:YAG 1319 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. 随着抽运功率的增加, 空间烧孔效应会导致多纵模振荡, 使输出激光谱线增宽. 采用标准具抑制驻波腔内的多纵模起振, 会造成腔内损耗大幅增加, 随之输出功率下降. 三镜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, 被广泛用于获得窄线宽激光输出^[1,10,16]. 本文采用885 nm LD双端泵Nd:YAG三镜环形腔, 产生消弛豫振荡的窄线宽连续微秒脉冲1319 nm激光. Nd:YAG的1064 nm与1338 nm谱线分别通过腔镜镀膜和腔内插入标准具进行抑制. 薄膜偏振片与法拉第旋光器、半波片组合实现环形腔激光单向运转, 通过旋转半波片对输出耦合率进行优化调节. 在885 nm LD抽运功率150 W时, 获得平均功率22.5 W、光束质

量 $M^2 = 1.3$ 的1319 nm偏振激光输出, 重复频率800 Hz, 脉冲宽度150 μs. 利用KTiOPO₄ (KTP)晶体对1319 nm光的倍频效应对微秒脉冲激光的弛豫振荡进行了有效的抑制. 精确控制标准具温度, 实现激光波长从1318.888 nm精细调谐到1319.358 nm, 相应的调谐精度为0.7 pm.

2 实验与分析

2.1 实验装置

885 nm双端泵1319 nmNd:YAG三镜环形腔光路如图1所示, 包括腔镜M1, M2及M3, 激光晶体模块LCM1和LCM2, 1319 nm 90°旋光晶体QR, 法拉第旋光器FR, 1319 nm半波片HW, 标准具FP, 晶体KTP, 温控仪TC1和TC2, 885 nm LD 光纤耦合输出模块及其光束整形系统BS1, BS2. 其中, 腔镜M1, M2镀17° 1319 nm高反, 885及1064 nm高透膜, 从而可以有效抑制Nd:YAG晶体的1064 nm谱线起振; M3为1319 nm 薄膜偏振片, 对1319 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放置在一个精细设计的光具座上, 以保证能进行精密的角度和温度控制, 用于增大Nd:YAG晶体的1338 nm谱线损耗, 从而抑制其起振, 还可以实现对1319 nm激光波长的精密调谐. 晶体KTP通过对1319 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.

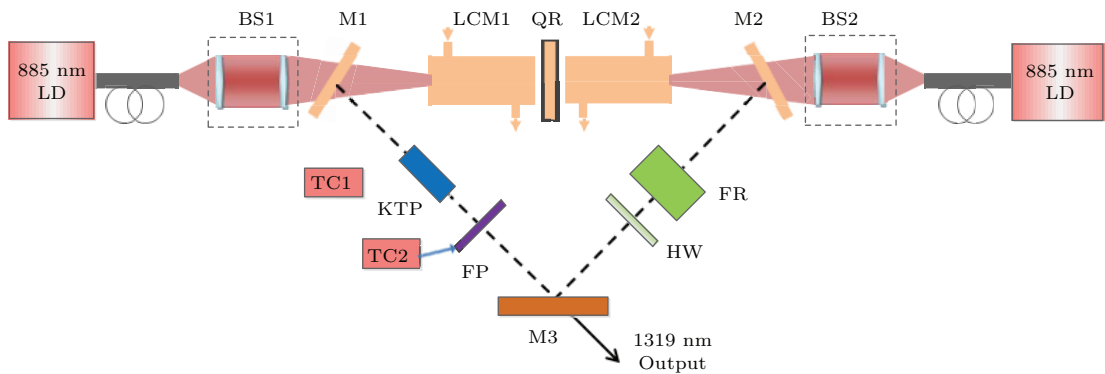


图1 (网刊彩色) 885 nm双端泵1319 nm三镜环形腔实验装置示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the experimental device of 1319 nm three mirror ring cavity dual-end pumped at 885 nm.

采用 885 nm LD 直接抽运技术, 由于没有经由激发态粒子的无辐射跃迁, 减少了不必要的能量损失, 从而有效减小了热透镜效应, 并提高了输出效率. 本实验中采用的抽运源为 DILAS 公司生产的光纤耦合半导体激光器, 中心波长 885 nm, 谱宽 2.5 nm, 最大输出功率 96 W (800 Hz, 200 μ s), 光纤芯径为 400 μ m, 数值孔径 $NA = 0.22$, 其输出激光通过传输比为 1 : 4 的光束整形系统耦合至 Nd:YAG 晶体. Nd:YAG 激光棒总长 70 mm, 直径为 3 mm, Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 0.6%, 棒两端分别键合 5 mm 的未掺杂 YAG, 保证晶体吸收部分充分冷却, 以避免晶体端面热应力过大而炸裂. Nd:YAG 棒双面镀 1319 nm 高透膜, 以降低端面反射损耗. 通过冷却循环水对激光棒进行冷却, 以带走抽运过程中产生的废热. 激光棒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.

2.2 实验结果与分析

1319 nm 薄膜偏振片除了用于构成“光学二极管”, 同时也作为激光器的输出耦合镜, 与半波片配合实现激光器输出耦合率可调, 其输出耦合率可表示为 [21]

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

其中 OT 是环形腔的输出透过率, 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.

三镜腔腔长 1200 mm, 通过设计使激光器以热近非稳腔运转, 从而有利于获得高功率、高光束质量 1319 nm 激光输出 [9]. 1319 nm 激光输出功率随 885 nm 抽运功率的变化曲线如图 2 所示. 在重复频率 800 Hz 条件下, 885 nm LD 抽运功率 150 W 时, 获得平均功率 22.5 W 的 1319 nm 偏振激光输出, 相应的光-光转换效率为 15%.

利用光束质量分析仪 (M^2 -200, Spiricon Inc.) 对输出功率 22.5 W 时的 1319 nm 激光进行了光束质量测量, 测量结果如图 3 所示, 测量到的光束质量因子 $M_x^2 = 1.35$ 和 $M_y^2 = 1.24$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.30$.

在微秒脉冲激光的产生过程中, 激光速率方程可表示为 [20]

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

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

其中, φ 是光子数密度, t 是时间, σ 是受激发射截面, 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 是抽运速率, s 是自发辐射速率, N_{ground} 是基态粒子数密度.

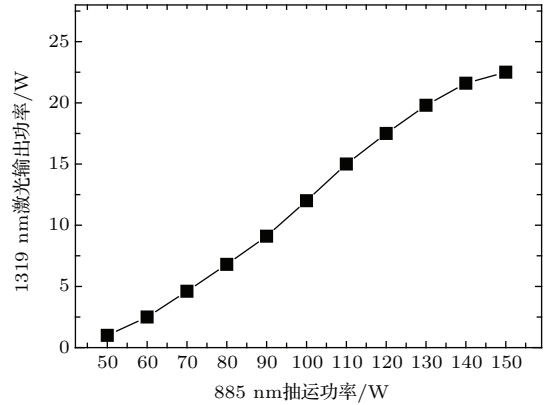


图 2 1319 nm 激光输出功率随 885 nm 抽运功率的变化曲线

Fig. 2. Variation curve of 1319 nm laser output power with pump power at 885 nm.

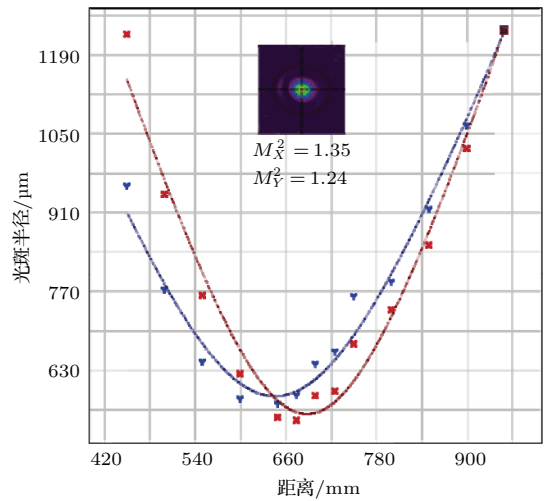


图 3 (网刊彩色) 1319 nm 激光的光束质量测量结果

Fig. 3. (color online) Measurement of beam quality of 1319 nm laser.

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; $K = c\sigma/(h\nu V)$, 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抽运功率.

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, 于是方程 (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 是倍频晶体引入的损耗, 正比于倍频晶体的非线性系数.

通过数值求解方程 (4) 和 (5), 可得自由运转时微秒激光脉冲在持续的抽运作用下, 形成一个又一个的尖峰脉冲, 即弛豫振荡. 通过数值求解方程 (5) 和 (6), 可得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, 尖峰脉冲序列很快被抑制. 本实验采用腔内插入 1319 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 × 15 mm, 采用 II 类临界相位匹配, 匹配温度为 40 °C, 前后通光面均镀有 1319 nm 的增透膜. 1319 nm 激光脉冲波形通过一铟镓砷光电探测器 (DET10 C, Thorlabs) 和示波器 (DPO 4104, Tektronix) 进行测量, 测量结果如图 4 所示. 其中图 4 (a) 为未插入 KTP 时的脉冲波形, 可以看出, 输出激光并不是一个平滑的光脉冲, 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 4 (b) 为插入 KTP 后的脉冲波形, 光脉冲经过建立初期的一个尖峰脉冲后很快变平滑, 尖峰序列被迅速减弱, 实现了对弛豫振荡的有效抑制, 测得弛豫振荡抑制之后的激光脉宽为 150 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带来弛豫振荡的有效抑制.

利用标准具材料具有一定的热膨胀系数和折射率温度系数, 通过调节标准具的温度可实现激光波长调谐, 波长调谐随温度变化关系可表示为 [21]

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{1}{l_2} \frac{dl_2}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T, \quad (7)$$

其中, λ 为激光波长, n 为标准具材料的折射率, l_2 为标准具厚度, T 为标准具温度. 波长调谐范围与温度变化量成正比关系, 调谐精度取决于对标准具材料的控温精度. 本实验中采用的标准具厚度 1 mm, 双面反射率均为 40%, 选用高品质的无水熔石英材料以减小对 1319 nm 激光的吸收损耗. 用自行研制的控温仪对标准具进行精确

温控, 控温精度为 0.1 °C, 从而实现激光波长的精密调谐. 对于 1319 nm 激光波长可使用波长计 (WS-5, High Finesse GmbH) 进行测量, 波长调谐结果如图 5 所示. 当标准具的温度以 0.1 °C 间隔从 25 °C 到 90 °C 变化时, 1319 nm 激光的波长可以从 1318.888 nm 精细调谐到 1319.358 nm, 调谐范围为 470 pm (81 GHz), 相应的调谐精度为 0.7 pm (125 MHz).

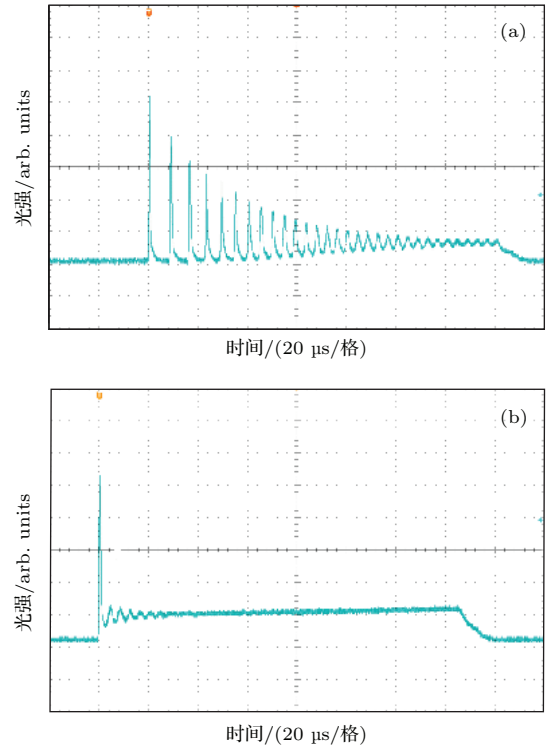


图 4 1319 nm 激光脉冲波形 (a) 弛豫振荡抑制之前; (b) 弛豫振荡抑制之后
Fig. 4. Pulse waveform of 1319 nm laser: (a) Before relaxation oscillation suppression; (b) after relaxation oscillation suppression.

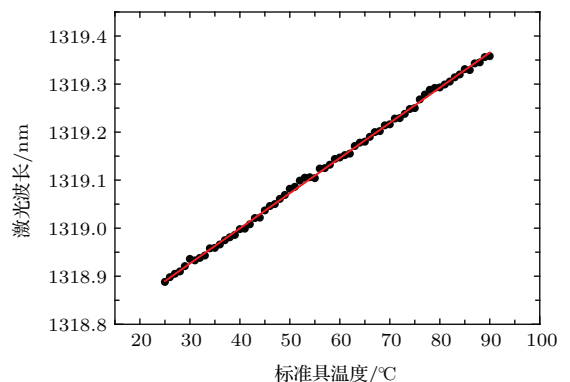


图 5 (网刊彩色) 激光波长随标准具温度的变化
Fig. 5. (color online) Variation curve of wavelength of laser with temperature of etalon.

3 结 论

采用 885 nm LD 双端直接抽运 Nd:YAG, 获得高功率、高光束质量的准连续微秒脉冲 1319 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 22.5 W 的 1319 nm 偏振激光输出, 光束质量 $M^2 = 1.30$, 重复频率 800 Hz, 脉冲宽度 150 μ s. 通过调节标准具温度, 实现激光波长从 1318.888 nm 精细调谐到 1319.358 nm, 调谐精度达 0.7 pm. 采用腔内插入 1319 nm 倍频晶体 KTP 对弛豫振荡进行抑制, 光脉冲经过建立初期的一个尖峰脉冲后很快变平滑, 尖峰序列被迅速减弱, 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 1319 nm 激光提供了实用有效的技术手段.

参考文献

- [1] Xie S Y, Lu Y F, Ma Q L, Wang P Y, Shen Y, Zong N, Yang F, Bo Y, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 064208
- [2] Lian W Y, Zhou Y, Wang T Y, Zhang G Z, Xiang W H 2007 *Laser & Infrared* **37** 508 (in Chinese) [廉伟艳, 周瑜, 王廷营, 张贵忠, 向望华 2007 激光与红外 **37** 508]
- [3] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Huang L X, Chen J, Chen W D, Chen Z Q 2007 *Appl. Opt.* **46** 384
- [4] Wang T, Yao J Q, Zhao P, Cai B J, Wang P 2005 *Proc. SPIE* **5627** 121
- [5] Sun Z P, Li R N, Bi Y, Yang Y D, Bo Y, Hou W, Lin X C, Zhang H B, Cui D F, Xu Z Y 2004 *Opt. Express* **12** 6428
- [6] Mu X D, Ding Y J 2005 *Opt. Lett.* **30** 1372
- [7] Lin B, Xiao K, Zhang Q L, Zhang D X, Feng B H, Li Q N, He J L 2016 *Appl. Opt.* **55** 1844
- [8] Liu H, Yao J Q, Zheng F H, Lu Y, Wang P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 230 (in Chinese) [刘欢, 姚建铨, 郑芳华, 路洋, 王鹏 2008 物理学报 **57** 230]
- [9] Lu Y F, Xie S Y, Bo Y, Cui Q J, Zong N, Gao H W, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 970 (in Chinese) [鲁远甫, 谢仕永, 薄勇, 崔前进, 宗楠, 高宏伟, 彭钦军, 崔大复, 许祖彦 2009 物理学报 **58** 970]
- [10] Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, Wang B S, Zuo J W, Wang Z C, Shen Y, Zhang F F, Wei K, Jin K, Xu Y T, Xu J L, Peng Q J, Zhang J Y, Lei W Q, Cui D F, Zhang Y D, Xu Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094208
- [11] Zheng J K, Bo Y, Xie S Y, Zuo J W, Wang P Y, Guo Y D, Liu B L, Peng Q J, Cui D F, Lei W Q, Xu Z Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 074202
- [12] Lu J H, Lu J R, Murai T, Takaichi K, Uematsu T, Xu J Q, Ueda K, Yagi H, Yanagitani T, Kaminskii A A 2002 *Opt. Lett.* **27** 1120
- [13] Li N, Pang Y, Lu Y H, Zhang L, Xie G, Wang W M, Xu X X 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 0802007 (in Chinese) [李楠, 庞毓, 鲁燕华, 张雷, 谢刚, 王卫民, 许晓小 2013 中国激光 **40** 0802007]
- [14] Lavi R, Jackel S, Tal A, Lebiush E, Tzuk Y, Goldring S 2001 *Opt. Commun.* **195** 427
- [15] Lü Y F, Zhao L S, Zhai P, Xia J, Li S T, Fu X H 2012 *Opt. Lett.* **37** 3177
- [16] Li M L, Zhao W F, Zhang S B, Guo L, Hou W, Li J M, Lin X C 2012 *Appl. Opt.* **51** 1241
- [17] Lü Y F, Zhang X H, Xia J, Yin X D, Bao L, Quan H 2010 *Laser Phys.* **2** 200
- [18] Xu Z Y, Xie S Y, Bo Y, Zuo J W, Wang B S, Wang P Y, Wang Z C, Liu Y, Xu Y T, Xu J L, Peng Q J, Cui D F 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0900111 (in Chinese) [许祖彦, 谢仕永, 薄勇, 左军卫, 王保山, 王鹏远, 王志超, 刘苑, 徐一汀, 许家林, 彭钦军, 崔大复 2011 光学学报 **31** 0900111]
- [19] Jeys T H 1991 *Appl. Opt.* **30** 1011
- [20] Johnson R P 2008 *Opt. & Laser Technol.* **40** 1078
- [21] Wang P Y 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王鹏远 2014 博士学位论文(北京: 中科院理化技术研究所)]

A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm*

Xie Shi-Yong¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Fu^{1)†} Le Xiao-Yun¹⁾ Yang Cheng-Liang²⁾ Bo Yong³⁾
Wang Peng-Yuan⁴⁾ Xu Zu-Yan³⁾

1) (School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (State Key Laboratory of applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

3) (Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

4) (Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

(Received 25 March 2016; revised manuscript received 19 May 2016)

Abstract

The 1319 nm lasers have important applications in the fields of optical fiber communication, laser medical treatment and laser color display. The Nd:YAG laser pumped by 808 nm laser diode is an efficient alternative to achieving 1319 nm laser output. In recent years, direct pump technology using 885 nm laser diodes has become more promising due to the dramatically reduced thermal effect and improved optical conversion efficiency. Quasi-continuous sodium beacon laser with microsecond pulse duration generated by the sum-frequency of 1319 nm and 1064 nm lasers can provide a gatable pulse format to eliminate the interference of atmospheric Rayleigh scattering and mitigate the spot elongation of sodium guide star to improve imaging accuracy. However, relaxation oscillation in the microsecond pulse could cause the damage to the nonlinear crystal and reduce the efficiency of sum-frequency generation. It is effective to suppress the relaxation by taking advantage of second harmonic generation, in which a nonlinear crystal is utilized to reduce the pulse peaks with higher intensity.

In this paper, we demonstrate a high-power relaxation-oscillation-free quasi-continuous microsecond pulse 1319 nm laser by using the dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity. Intra-cavity etalon and customized mirror coating are employed to prevent the 1064 nm and 1338 nm line of Nd:YAG laser crystal from oscillating. A power tuning device, including a thin-film polarizer and a halfwave plate is implemented as the output mirror of ring cavity, which enables continuous adjustment of the out coupling ratio. The output power of the 1319 nm polarized laser is 22.5 W pumped by 150 W 885 nm laser diode. The repetition rate is 800 Hz and pulse width is 150 μ s. The corresponding optical conversion efficiency is 15%. The beam quality factor M^2 is measured to be $M_x^2 = 1.35$ and $M_y^2 = 1.24$.

By precisely adjusting the temperature of etalon viz. adjusting refractive index as well as thickness of the etalon material, laser wavelength is tuned from 1318.888 nm to 1319.358 nm, corresponding to a tunable range of 470 pm and tuning accuracy of 0.7 pm. A 1319 nm frequency doubling crystal KTiOPO_4 (5 mm \times 5 mm \times 15 mm, $\theta = 59.8^\circ$ and $\phi = 0^\circ$) is inserted into the cavity to suppress the relaxation oscillation. The pulse waveform quickly reaches a smooth

* Project supported by the State Key Laboratory of Applied Optics, National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205101) and Shenzhen Science and Technology Project (Grant Nos. GJHZ20140417113430592, JCYJ20140417113130693, JCYJ20150925163313898).

† Corresponding author. E-mail: xfzhang@buaa.edu.cn

regime, followed by a pulse spike at the initial stage and the loss of laser output power is only 1%. It is proved that it can be efficiently suppressed by inserting a frequency doubling crystal with negligible power loss. In conclusion, this paper provides a practical and effective technical means for achieving the high-power relaxation-oscillation-free quasi-continuous 1319 nm laser with microsecond pulse duration.

Keywords: 885 nm dual-end pump, ring cavity, relaxation oscillation, tunable wavelength

PACS: 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.60.Rn, 42.60.Fc

DOI: [10.7498/aps.65.154205](https://doi.org/10.7498/aps.65.154205)