

可调谐单纵模绿光 Nd:YAG 激光器

张俊旋^{1,2} 李 峰^{1,2} 毕德仓¹ 朱小磊¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了半导体激光器双端面抽运的种子注入 Nd:YAG 绿光激光器。通过优化谐振腔结构参数设计, 实现增益介质激活区域与基横模体积的良好匹配, 获得稳定的基横模输出。48 h 连续运转, 输出的脉冲能量不稳定性小于 2.9%, 并确保单频输出。在传导冷却结构中, 实现了高光束质量、高重复频率、窄脉冲宽度且可调谐的 532 nm 单频绿光的稳定输出。在重复频率为 1 kHz 时, 最大输出脉冲能量大于 4 mJ, 脉冲宽度约为 6.5 ns。激光束在水平方向和垂直方向的光束质量 M^2 值分别是 1.166 和 1.158。输出单频绿光激光的连续调谐范围可达到 15 GHz。

关键词 激光器; Nd:YAG 激光器; 种子注入; 腔内倍频; 电光调 Q

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0902009

Tunable Single Longitudinal Mode Nd:YAG Green Laser

Zhang Junxuan^{1,2} Li Feng^{1,2} Bi Decang¹ Zhu Xiaolei¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract A laser diode dual-end pumped injection-seeded Nd:YAG green laser is designed. By the reasonable design of the cavity structure parameters, the fundamental transverse mode laser is obtained because of the good match between the gain medium activation area and the fundamental transverse mode volume. In 48 hours of continuous work, the output laser which keeps good single frequency and energy fluctuation is less than 2.9%. In conductively cooled structure, the high beam quality, high repetition frequency, narrow pulse width and tunable 532 nm single-frequency green laser is implemented. The repetition frequency of the laser is 1 kHz. The output energy is more than 4 mJ, and the pulse width is around 6.5 ns. The beam quality M^2 of 1.166 in the horizontal direction and 1.158 in the vertical direction is detected. The output green laser with continuous tuning range of 15 GHz is achieved.

Key words lasers; Nd:YAG laser; seed injection; intracavity frequency doubling; electro-optic Q-switching

OCIS codes 140.3580; 140.3570; 140.3515; 140.3540

1 引 言

单频脉冲激光器在激光雷达、高分辨率激光光谱、相干通信和精密检测等领域有着广泛的应用。在直接探测多普勒测风激光雷达系统中, 单频脉冲激光器作为激光雷达的发射源, 其线宽、频率稳定性等参数直接决定整个激光雷达的测量精度和探测能

力。因此, 具有波长调谐功能的高性能单纵模窄线宽全固态激光器的研制, 对提升激光雷达的整体水平具有现实意义。

在直接探测多普勒测风雷达中, 考虑到激光波长对回波信号的影响, 一般采用 532 nm 或者 355 nm 的激光作为其发射源。2001 年, Pavel 等^[1]

收稿日期: 2013-03-27; 收到修改稿日期: 2013-05-04

作者简介: 张俊旋(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事单频脉冲激光器技术方面的研究。

E-mail: zhangjunxuan58@hotmail.com

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及激光器应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

利用三硼酸锂(LBO)晶体进行腔内倍频,得到脉冲能量为0.226 mJ,脉冲宽度为86 ns,重复频率为4.2 kHz,光束质量 M^2 为1.8的被动调Q 532 nm 绿光输出。2008年,Yoshihiko等^[2]利用LD抽运的Yb:YAG薄片,得到平均功率为73 W,重复频率为200 kHz的声光调Q绿光输出,脉冲宽度大于400 ns。2008年,Zhou等^[3]研制的用于直接探测多普勒测风激光雷达的单频Nd:YAG激光器,采用种子注入技术^[4]和电光调Q实现了能量为35 mJ的单频1064 nm基波脉冲输出。通过腔外二次倍频实现了能量为14 mJ,重复频率为500 Hz,光束质量 M^2 为2.1的532 nm绿光脉冲输出。

在双端抽运的电光调Q腔内倍频Nd:YAG激

光器中,利用单振荡级获得重复频率为1 kHz的单纵模532 nm绿光激光输出。通过对谐振腔进行合理的设计,提高了谐振腔的稳定性,获得了高光束质量、高重复频率、窄脉冲宽度和可调谐的单频脉冲532 nm波长激光输出。

2 理论分析及实验装置

2.1 谐振腔设计

激光器在高功率工作时,增益介质的热效应很严重。所以设计光学谐振腔时,增益介质的热焦距是一个很重要的参数^[5]。Nd:YAG热焦距的理论计算公式^[6-7]为

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph}} \left\{ [1 - \exp(-\alpha l)] \frac{dn}{dT} + [1 - \exp(-\alpha l)] 2d C_{r,\varphi} n_0^3 + [1 - \exp(-\alpha r_0)] \frac{d r_0 2(n_0 - 1)}{l} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

式中 K_c 是增益介质的热导率, ω_p 为抽运光束半径, P_{ph} 是介质耗散的总热量, α 是介质对抽运光的吸收系数, $\frac{dn}{dT}$ 是折射率随温度的变化量, d 是热膨胀系数, $C_{r,\varphi}$ 是光弹系数, r_0 是介质半径, n_0 是介质折射率, l 是介质长度。(1)式中第一部分是温度梯度对热焦距的影响,第二部分是端面效应的影响,第三部分是应力对热焦距的影响。

激光器谐振腔采用平行平面腔设计。在双端面抽运结构中,当808 nm激光平均抽运功率达到55 W时,键合YAG晶体棒的热焦距约为233 mm。理论仿真将腔内Nd:YAG晶体视为焦距为233 mm的正透镜,同时插入焦距 $f_c = -800$ mm的负透镜来补偿热透镜效应。当腔内同时存在热透镜及补偿负透镜时,其等效腔结构如图1所示,则其单程变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_c} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中, L_1 、 L_2 、 L_3 分别是后腔镜M1和晶体、晶体和负透镜以及负透镜和输出镜M2之间的距离。谐振腔的稳定性条件为

$$-1 < (A + D)/2 < 1. \quad (3)$$

取 $L_1 = 270$ mm, $L_2 = 50$ mm,得腔稳定性和腔长的

变化曲线如图2所示。为了使结构紧凑,实验中腔长选为540 mm。

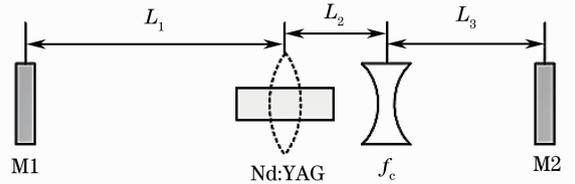


图1 谐振腔等效结构示意图

Fig. 1 Schematic of resonant cavity

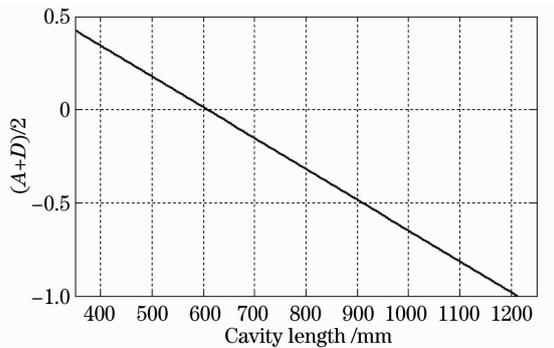


图2 腔稳定性和腔长的关系

Fig. 2 Relationship between stability of cavity and cavity length

键合Nd:YAG晶体棒可以等效成一个焦距随抽运功率动态变化的热透镜^[8-9]。将Nd:YAG介质的各参数代入(1)式,可以得到增益介质热透镜焦距随抽运功率的变化如图3所示。显然,当抽运功率小于55 W时,晶体的热焦距值大于233 mm。

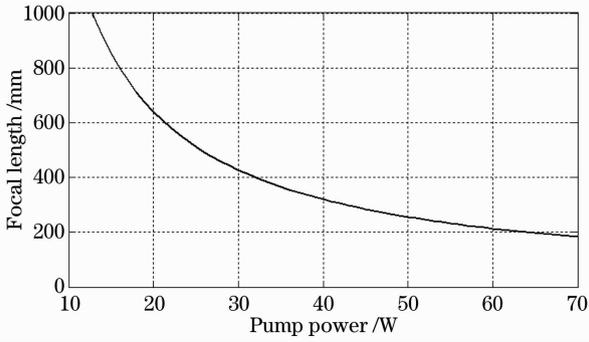


图 3 增益介质热透镜焦距随抽运功率的变化

Fig. 3 Focal length of thermal lens versus pump power

图 4 为 Nd:YAG 晶体处振荡模光斑半径随晶体热透镜焦距值变化的仿真曲线。显然,当热透镜焦距值大于 200 mm 时,腔内振荡模光斑半径变化相对平缓,利于能量稳定输出。实验中,LD 抽运模块输出功率小于 55 W,晶体热焦距值满足大于 200 mm 的设计要求,因此,能够确保激光器处于稳定工作区域。

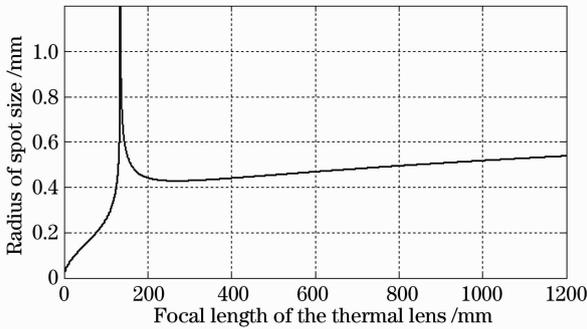


图 4 热透镜处振荡模光斑半径随热焦距的变化

Fig. 4 Radius of oscillation mode's spot size versus focal length

2.2 实验装置

图 5 是种子注入单频激光器的光学示意图 PD 为光电探测器, PZT 为压电陶瓷, AC 为绿光吸收

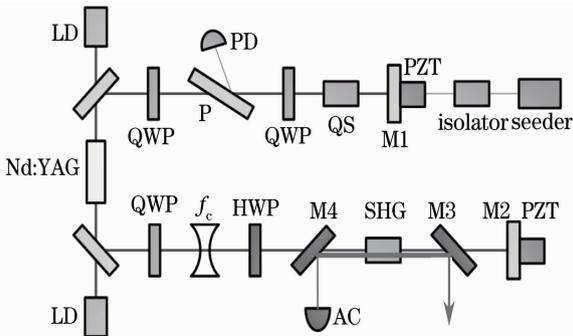


图 5 单频 532 nm 脉冲激光器装置示意图

Fig. 5 Schematic setup of the single frequency 532 nm laser

池, M1 是后腔镜, M2 是 1064 nm 激光透射率为 5% 的输出镜。电光调 Q 开关由 KD*P 电光调制器 (QS), $\lambda/4$ 波片 (QWP) 和起偏器 (P) 组成。采用长度为 12 mm 的 I 类相位匹配的 LBO 作为倍频晶体 (SHG)^[10]。旋转 $\lambda/2$ 波片 (HWP) 将基波入射光的偏振方向调到符合 LBO 的要求。分光镜 M3 将腔内 532 nm 的倍频光导出谐振腔。考虑到倍频晶体在高重复率高功率工作时的温升引起的相位失配会降低输出功率, 采用半导体制冷片 (TEC) 对倍频晶体进行温控, 温控精度为 0.1 °C。

单频种子注入采用谐振探测方法实现^[3,11]。所用单频种子源是课题组研制的 Nd:YAG 非平面环形腔 (NPRO) 激光器, 激光束在水平方向和竖直方向的光束质量 M^2 值分别为 1.12 和 1.07^[12]。腔内 Nd:YAG 晶体两端的两个 QWP 用来消除腔内的空间烧孔效应^[13]。

抽运源是两个高功率激光二极管 (LD), 其峰值功率均为 150 W, 输出波长为 808 nm。抽运光通过尾纤输出, 经准直聚焦后, 从端面进入增益介质。激光增益介质采用 YAG/Nd:YAG/YAG 键合结构晶体棒, 其中 Nd^{3+} 的掺杂原子数分数为 0.3%。晶体直径为 4 mm, 掺杂部分长度为 30 mm。激光器工作时晶体的温度变化会引起腔长的改变, 进而引起激光器的纵模频率漂移。频率漂移与温度变化的关系为

$$\Delta\nu = -\frac{c}{\lambda_0 L_0} \Delta L = -\frac{c}{\lambda_0 L_0} \left[n(d\Delta T)l + \frac{dn}{dT} \Delta T l \right], \quad (4)$$

式中 L_0 是谐振腔腔长, λ_0 是基波波长, n 是晶体的折射率, l 是晶体的几何长度, d 为晶体的热膨胀系数。由 (4) 式可得 Nd:YAG 晶体温度变化引起的纵模频率漂移, 如图 6 所示。40 mm 长的 Nd:YAG 晶体温度变化 1 °C 会引起接近两个自由光谱范围的

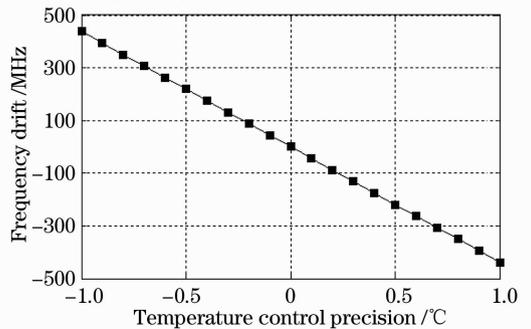


图 6 温控精度与纵模漂移频率的关系

Fig. 6 Relationship between temperature control precision and frequency drift

纵模频率漂移。为了减小激光器工作时谐振腔长的漂移,将晶体安装在 TEC 制冷的紫铜热沉中,通过温控系统将温度控制在 23 ℃,温控精度为 0.1 ℃。

3 实验结果及讨论

1064 nm 激光和 532 nm 激光脉冲的输出能量随抽运能量的变化曲线如图 7 所示。当抽运能量达到 54.9 mJ 时,对应的绿光脉冲输出能量为 4.0 mJ,此时,激光器光-光转换效率为 7.3%,斜效率为 12%。用激光透射率为 60% 的 1064 nm 输出耦合镜代替平面镜 M2,基波输出能量为 8.1 mJ,对应的倍频效率达到 50%。

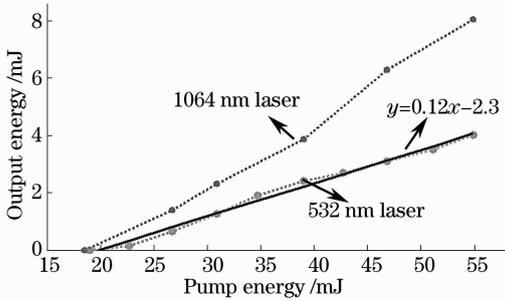


图 7 输出能量与抽运能量之间的关系

Fig. 7 Relationship between output energy and pump energy

激光器进行 48 h 连续运转,监测其输出能量的稳定性以及在长时间工作过程中的单频性能。输出能量变化曲线见图 8。脉冲能量均值 $E_M = 2.97$ mJ,脉冲宽度约 6.5 ns,脉冲能量不稳定性 $\sigma_{RMS} = 2.9\%$ 。使用高速 PIN 管探测绿光的散射光,将信号连接到高速示波器上来显示脉冲时间波形。种子注入不成功时,脉冲波形如图 9(a),此时波形存在调制,输出脉冲存在不只一个纵模。种子注入成功并单纵模输出时,脉冲波形如图 9(b)所示,此时脉冲波形光滑,没有尖峰噪声出现^[14]。在激光器连续运转过程中,监测示波器显示脉冲波形光滑且重复性很好,说明单频输出稳定可靠。

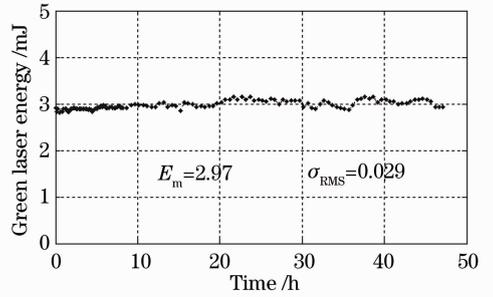


图 8 48 h 连续运转激光器输出能量图

Fig. 8 Output energy fluctuation in 48 h continuous work

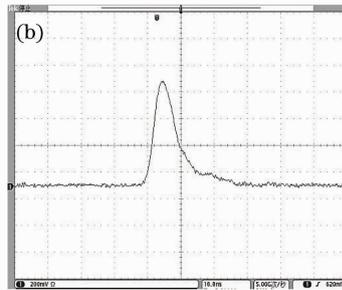
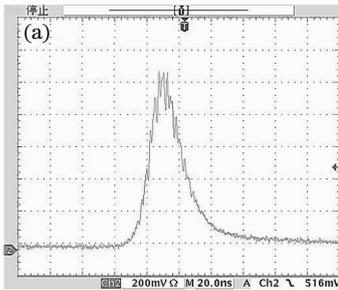


图 9 脉冲波形。(a) 非单频输出脉冲;(b) 单频输出脉冲

Fig. 9 Laser pulse profile. (a) Non-single-frequency mode; (b) single-frequency mode

采用 Spiricon M²-200 型光束质量分析仪测量激光光束质量,如图 10 所示。水平方向和竖直方向测得的光束质量 M² 值分别为 1.166 和 1.158,其中腰斑尺寸分别为 0.794 mm 和 0.779 mm,发散角分别为 0.994 mrad 和 1.007 mrad。可见,所设计的双端抽运腔内倍频 Nd:YAG 激光器,较好地实现了增益介质热效应的补偿,实现了高光束质量单频绿光脉冲输出。

通过对种子源进行温度调谐,实验实现了单频绿光激光脉冲输出的波长调谐。图 11 为使用高精度波长计获得的波长调谐测量曲线,将单频种子源的温度进行反向扫描,获得谐振腔两个纵模区域的

连续调谐单频输出,波长调谐范围为 0.028 nm,换算为频率,整个扫频范围约为 30 GHz。实验中让激光器工作在其中的一个无跳模区调谐输出,即: 532.251~532.265 nm,使用碘吸收池碘分子吸收光谱的 1109 线进行检频,实验获得的碘蒸汽 1109 线吸收谱曲线揭示输出绿光激光具有良好的光谱纯度,且能稳定地工作在 532.260 nm 处。实验中,以 532.260 nm 为中心,很容易地实现了从碘分子吸收光谱的 1107 线到 1111 线无跳模连续调谐输出,调谐范围达到 15 GHz。

参 考 文 献

- 1 N Pavel, J Saikawa, T Taira. Diode end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser intra-cavity frequency doubled by LBO crystal[J]. Opt Commun, 2001, 195(1-4): 233-240.
- 2 Yoshihiko Fujihira, Tomohiro Imahoko, Tetsumi Sumiyoshi, et al.. 200 kHz, 73 W highly stable Yb:YAG thin disk green laser [C]. CLEO, 2008, 2008: CTuQ6.
- 3 Jun Zhou, Huaguo Zang, Dan Liu, et al.. Frequency doubled single longitudinal mode Nd:YAG laser for remote sensing[C]. 24th International Laser Radar Conference, 2008. S01P_27.
- 4 Y K Park, G Giuliani, R L Byer. Single axial mode operation of a Q-switched Nd:YAG oscillator by injection seeding[J]. IEEE J Quantum Electron, 1984, 20(2): 117-125.
- 5 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602011. 郑耀辉, 王雅君, 彭昱辉. 输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO₄/LBO 单频激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602011.
- 6 W Koehnner. Solid State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl. Beijing: Science Press, 2002. 363-364. W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002. 363-364.
- 7 Yang Yongming, Wen Jianguo, Wang Shiyu, et al.. The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1769-1772. 杨永明, 文建国, 王石语, 等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1769-1772.
- 8 V Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. Appl Opt, 1986, 25(1): 107-117.
- 9 Li Feng, Wang Juntao, Yin Suyong, et al.. Electro-optical Q-switched double-pulse output Nd:YAG all-solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802005. 李峰, 王君涛, 殷苏勇, 等. 电光调 Q 双脉冲输出 Nd:YAG 全固态激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802005.
- 10 Lu Tingting, Wang Juntao, Huang Minjie, et al.. Single-end pumping, simultaneous multi-wavelength pulsed laser in diode-end-pumped Nd:YLF/Nd:YAG [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902002. 陆婷婷, 王君涛, 黄敏捷, 等. LD 端面抽运 Nd:YLF/Nd:YAG 多波长脉冲激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902002.
- 11 W W Henderson, E H Yuen, E S Fry. Fast resonance-detection technique for single-frequency operation of injection-seeded Nd:YAG lasers[J]. Opt Lett, 1986, 11(11): 715-717.
- 12 Zhu Ren, Zhou Jun, Liu Jiqiao, et al.. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102011. 朱韧, 周军, 刘继桥, 等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102011.
- 13 V Evtuhov, A E Siegman. A twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Appl Opt, 1965, 4(1): 142-143.
- 14 Wang Juntao. Research on High Repetition Rate of Injection Seeded Single Frequency DPSSL [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 50-51. 王君涛. 种子注入高重复单纵模全固态激光器技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012. 50-51.

栏目编辑:张 腾

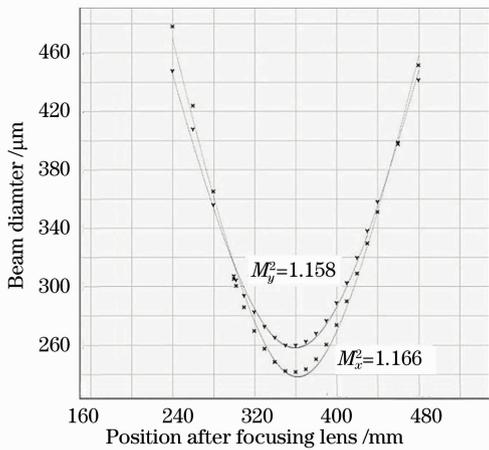


图 10 光束质量测量

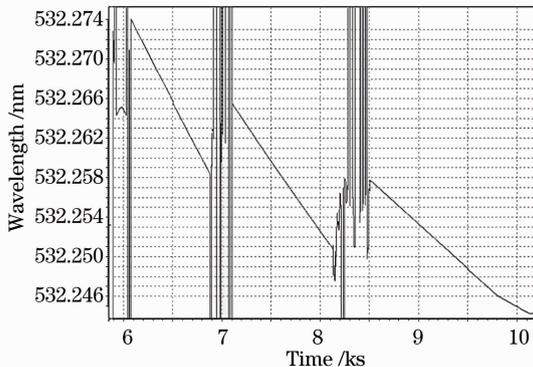
Fig. 10 Measurement of M^2 

图 11 调谐波长输出

Fig. 11 Output of tuning wavelength laser

4 结 论

在双端抽运的重复频率为 1 kHz 的 Nd:YAG 绿光激光器中,通过对谐振腔进行合理的设计,达到了有效补偿增益介质热效应的目的,获得了光束质量接近衍射限的单频绿光脉冲序列输出,单脉冲能量大于 4 mJ,脉冲宽度约为 6.5 ns。该激光器输出最大平均功率可大于 4 W,在平均输出功率为 3 W 时,连续 48 h 输出的功率起伏小于 2.9%,并保证 100% 的单频输出。通过对单频种子激光器进行温度调谐,单频绿光激光输出单个无跳模区的连续调谐范围可达到 15 GHz,可以与碘分子吸收光谱的 1109 线实现匹配。该激光器已成功用于多普勒测风激光雷达系统中。