

高功率窄线宽可调谐 1 064 nm 环形腔激光

谢仕永^{1,2} 鲁远甫³ 张小富¹ 杨程亮² 乐小云¹

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(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 文章采用了三镜环形腔内插入标准具获取高功率窄线宽可调谐 1 064 nm 激光。对环形腔的单向运行、标准具压窄线宽与调谐波长及激光大基模体积运转进行了理论分析与计算,结合实验优化了腔镜曲率与输出耦合率。在 808 nm 半导体激光泵浦功率 151 W 条件下,获得输出功率 33.7 W、光束质量因子 $M^2=1.28$ 、线宽 0.1 GHz 的单向 1 064 nm 激光输出,相应的光转换效率 22.3%。采用高精度控温仪对标准具进行精确温控,实现激光波长的精密调谐。改变标准具温度获得 1 064 nm 波长调谐范围 72.6 GHz,调谐精度为 220 MHz。波长调谐过程中 1 064 nm 激光输出功率变化约 10%。整个系统稳定可靠,而且相对简单,较易实现,为获得可调谐窄线宽 1 064 nm 激光提供了实用有效的技术手段。

关键词 环形腔; 可调谐波长; 窄线宽; 全固态激光

中图分类号 TN 248.1 **文献标志码** A

High-Power Ring Cavity Laser with Tunable Narrow Linewidth of 1 064 nm

XIE Shiyong^{1,2} LU Yuanfu³ ZHANG Xiaofu¹ YANG Chengliang² LE Xiaoyun¹

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(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract A high power narrow linewidth tunable 1 064 nm laser is obtained using three mirror ring cavity with an etalon. Theoretical analysis of unidirectional operation of the ring resonator, narrowing linewidth and tuning wavelength with an etalon and large volume mode operation of the laser was carried out. The mirror curvature and output coupling ratio were optimized in the experiment. Under the 808 nm laser diode pump power of 151 W, 33.7 W of unidirectional 1 064 nm laser output was obtained with beam quality factor of 1.28 and linewidth of 0.1 GHz, and the corresponding optical conversion efficiency was 22.3%. Precise tuning of laser wavelength was realized by controlling precisely temperature of the etalon. Tunable range of 72.6 GHz

收稿日期: 2016-04-05 修回日期: 2016-05-01

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金项目(37730301); 深圳市科技计划项目(CXZZ20140609162846202、JCYJ20140417113130693、GJHZ20140417113430592)

作者简介: 谢仕永, 博士后, 研究方向为全固态激光及其变频技术; 鲁远甫, 副研究员, 研究方向为激光技术及其应用; 张小富(通讯作者), 讲师, 研究方向为高能固体激光, E-mail: xfzhang@buaa.edu.cn; 杨程亮, 副研究员, 研究方向为液晶光学; 乐小云, 教授, 研究方向为脉冲粒子束产生及应用。

was achieved by varying the temperature of the etalon, and the tuning accuracy was 220 MHz. The output power of the 1 064 nm laser was changed by about 10% in wavelength tuning process. The whole system is stable and reliable, relatively simple and easy to realize. It provides a practical and effective technical mean for obtaining tunable narrow linewidth 1 064 nm laser.

Keywords ring cavity; tunable wavelength; narrow linewidth; all-solid-state laser

1 引 言

可调谐窄线宽激光在激光陀螺、激光雷达、光学计量、光谱分析及精确度量学等领域都有广泛而重要的应用^[1-5]。近年来,随着半导体激光二极管(Laser Diode, LD)技术的不断发展完善,由其抽运的固体激光器(Diode Pumped solid-state Laser, DPL)因具有体积小、寿命长、效率高、结构紧凑等优点而逐步取代气体、染料激光器成为获取可调谐窄线宽 1 064 nm 激光源的研究热点^[6-7]。当前实现窄线宽激光的方法主要包括短腔法^[8]、扭转模腔^[9]、种子源注入^[10-11]及环形腔法^[12]等,而进行激光波长调谐的技术手段有压电效应调谐、温度调谐和标准具调谐等。Owyong 等^[13]采用掺钕钇铝石榴石 Nd:YAG 薄片腔结构,调节加在薄片上的压力获得调谐范围 76.5 GHz 的 1 mW 1 064 nm 单频光; Kane 等^[14]使用单块 Nd:YAG 非平面环形腔,结合压电调谐腔长的方法获得调谐范围 100 MHz、功率为 6 mW 的单纵模激光输出;中国科学院上海光学精密机械研究所张俊旋等^[10]设计了种子源注入 Nd:YAG 驻波腔激光,通过对种子源进行温度调谐实现了调谐范围 15 GHz、功率为 8.1 W 的无跳模 1 064 nm 激光输出; Harrison 等^[12]利用改变四镜环形腔腔内标准具倾角的方法进行纵模调谐,实现了调谐范围为 50 GHz 的 600 mW 单频 1 064 nm 激光输出。

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

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,其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,本文在此应用背景下进行了高功率窄线宽 1 064 nm Nd:YAG 激光研究。四镜环形腔是获取可调谐窄线宽激光的有效腔型结构,且腔内产生一很小光腰,有利于通过腔内倍频获得高效率的二次谐波输出^[15]。与四镜环形腔相比,三镜环形腔腔内光腰较大,不利于高效二次谐波的产生。但对基于 Nd:YAG 晶体的 1 064 nm 激光来说,选用三镜环形腔的方案,相比四镜环形腔所用光学元器件较少,光路调节相对容易,系统稳定性更高。本课题组对三镜环形腔获得窄线宽激光进行了大量研究,2009 年利用双激光头串接的三镜环形腔产生了 4.8 W 连续波 1 319 nm 激光^[16]; 同年在准连续运转条件下通过三镜腔实现 13.2 W 1 064 nm 输出,波长调谐范围为 58 GHz^[5]; 2010 年采用了四激光头串接的三镜腔方案获得 16.8 W 1 319 nm 激光^[17]。本文采用四激光头串接的三镜环形腔内插入标准具获取高功率窄线宽可调谐 1 064 nm 激光。对环形腔的单向运行和标准具压窄线宽与调谐波长进行了理论分析,通过 ABCD 矩阵对环形腔腔型进行了设计。实验中优化了腔镜曲率与输出耦合率,获得输出功率 33.7 W、光束质量因子 $M^2=1.28$ 、线宽 0.1 GHz 的单向 1 064 nm 激光输出。通过改变标准具温度实现波长调谐范围 72.6 GHz,相应的调谐精度为 220 MHz,整个系统相对简单,较易实现。

2 三镜环形腔激光器的理论设计

2.1 环形腔激光器的单向运行

对于环形腔, 由于腔内存在两束沿相反方向传播的光会同时起振, 理论上, 两束光有着相同的强度。组合使用法拉第旋光器、半波片、薄膜偏振片形成“光学二极管”, 以此获得环形腔单向运转是最为普遍的方式^[16]。法拉第旋光器对偏振光产生一定角度的偏振旋转, 半波片给予相同量的补偿性的反向旋转, 薄膜偏振片增强两束沿反方向传播光的损耗差。法拉第旋光器、半波片、偏振片的组合使用使得沿相反方向传播的两束光损耗差足够大, 从而保证单向运转的获得。不过由于腔内插入了较多元件, 其损耗也较大, 当在实验中加入“光学二极管”后, 单向输出功率并非会成倍增加, 仅能提高约 20%。

2.2 标准具压窄线宽与调谐波长

由于驻波腔内存在空间烧孔效应, 造成腔内光强分布的空间纵向不均匀性, 随着泵浦功率的增加, 会导致多纵模振荡。采用高精细度的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。环形行波腔结构可以消除空间烧孔效应, 被广泛用以获得窄线宽激光输出。对于均匀加宽的 Nd:YAG 激光增益介质, 本实验采用了三镜环形腔结构来获得窄线宽输出, 通过腔内插入标准具来进一步压窄线宽并对波长进行调谐。由物理光学可知, 标准具对不同频率的光束具有不同的透过率, 透射率取极大值时, 入射光波长满足:

$$m\lambda = 2\mu l \cos\theta \quad (1)$$

其中, m 为任意整数; λ 为光波的波长; μ 为标准具材料的折射率; l 为标准具的厚度; θ 是标准具内光线与法线的夹角。根据上式, 标准具法调谐波长一般有两种方法, 一种方法是通过调节标准具的倾斜角实现对输出波长的调谐:

$$\Delta\lambda = -\lambda \cdot \tan\theta \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

另一种方法是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调谐输出波长。这种情况下波长调谐随温度变化关系可表示为:

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{1}{l} \frac{dl}{dT} + \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} \right) \Delta T \quad (3)$$

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。温度调谐波长具有较好的重复性, 本实验中通过自行研制的高精度温控仪对标准具进行精确控温获得激光波长的精密调谐。在波长 1 064 nm 处标准具材料融石英折射率 $\mu = 1.45$, 热膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 折射率随温度的变化为 $10.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。将相关参数代入公式(3), 通过计算可得, 在 $\Delta T = 0.1^{\circ}\text{C}$ 时, $\Delta\lambda = 8.1 \times 10^{-4} \text{ nm}$, 达到了 215 MHz 的调谐精度, 从而可以实现对输出波长的精确调谐。

标准具的透射谱线宽度为:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi\mu l \cos\theta} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \quad (4)$$

其中, ν 为光波的频率; c 为光速; R 为标准具两端面的反射率。为了更好地抑制不需要的激光纵模起振, 标准具透射谱线宽度越窄越好。然而, 伴随大的反射率 R 而来的是标准具两端面反射膜厚度增加, 进而不可避免地增大光波在反射膜上的吸收和散射损耗, 致使振荡光功率下降, 通常标准具反射率 R 取适当低的值, 使不需要的纵模反射损耗略大于腔的增益即可。本实验中采用的标准具厚度为 0.7 mm, 反射率为 60%。当激光正入射标准具即 $\theta = 0$ 时, 计算得透射谱线宽度 $\Delta\nu = 24 \text{ GHz}$ 。

2.3 环形腔腔型设计

激光器工作时, 希望通过腔型设计等手段使得激光介质上的基模体积尽可能地大, 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理论计算。基于 ABCD 矩阵的基模半径 ω 为:

$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} |B|^{1/2} \left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad (5)$$

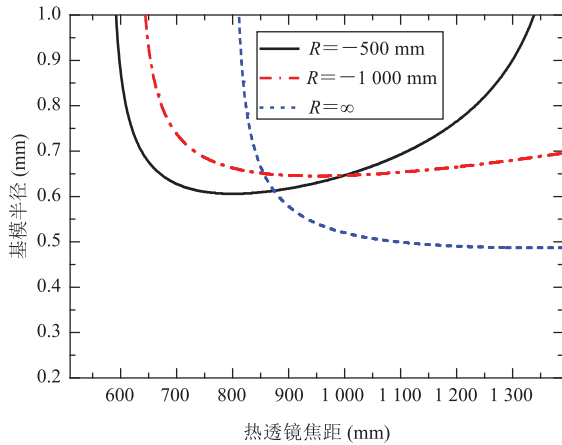


图1 腔镜不同曲率下激光棒中心光斑半径随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 1 Variation curve of spot radius at the center of the laser rod with thermal focal length under different curvature of cavity mirror

其中, A 、 B 和 D 分别是 ABCD 矩阵的对应元素。对于腔长(整个腔周长) $L=1\ 014\ \text{mm}$, 分别计算了腔镜不同曲率下激光棒中心基模光斑半径随热透镜焦距的变化曲线, 如图 1 所示。可以看出, 当腔镜曲率 $R=\infty$ 、 $-1\ 000\ \text{mm}$ 和 $-500\ \text{mm}$ 时, 基模半径分别为 $0.5\ \text{mm}$ 、 $0.55\ \text{mm}$ 和 $0.63\ \text{mm}$, 依次递增, 可以推断 $R=-500\ \text{mm}$ 时会获得较高的功率输出和光束质量。

3 三镜环形腔激光器的实验

3.1 实验装置

1 064 nm Nd:YAG 三镜环形腔光路如图 2 所示, 包括腔镜 M_1 、 M_2 及 M_3 , 激光头 LH_1 、 LH_2 、 LH_3 和 LH_4 , 1 064 nm 90° 旋光晶体 QR, 法拉第旋光器 FR, 1 064 nm 半波片 HW, 标准具 FP 以及温控仪 TC。其中, M_1 镀 1 064 nm 高反膜; M_2 为输出耦合镜; M_3 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。法拉第旋光器 FR 对光的旋转角度是 15° , 与偏振片及半波片组合使得环形腔内两运转方向激光的损耗不同, 从而形成一个“光学二极管”, 实现激光单向运转。标准具 FP 放置在紫铜材料的热沉上, 通过四周缠绕的加热丝均匀加热, 一紫铜封盖将标准具密封起来, 使标准具处于一密闭腔室内,

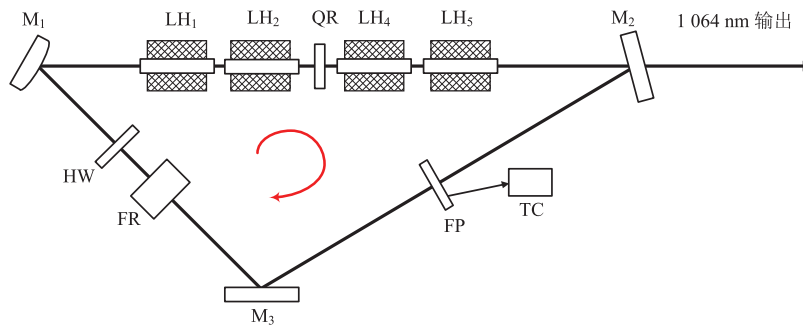


图2 1 064 nm 三镜环形腔实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device of 1 064 nm three mirror ring cavity

减少其与外界的热量交换, 从而保证标准具温度均匀与恒定, 有利于实现窄线宽波长精密调谐的 1 064 nm 激光。4 个激光头均采用侧面泵浦, 每个激光头包括 9 个平均功率为 5 W (500 Hz, 200 μ s) 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 180 W 的 808 nm 泵浦, 激光棒长 65 mm, 直径为 2 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 棒双面镀 1 064 nm 高透膜, 以降低激光棒端面反射损耗。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。标准具放置在一个精细设计的光具座上, 以保证能进行精密角度和温度控制, 实现对激光线宽的压窄及波长的精密调谐。

3.2 实验结果

采用以上实验装置, 首先研究了在 M₂ 镜输出耦合率为 20% 时, M₁ 镜不同曲率条件下的激光功率输出情况, 如图 3 所示。当腔镜 M₁

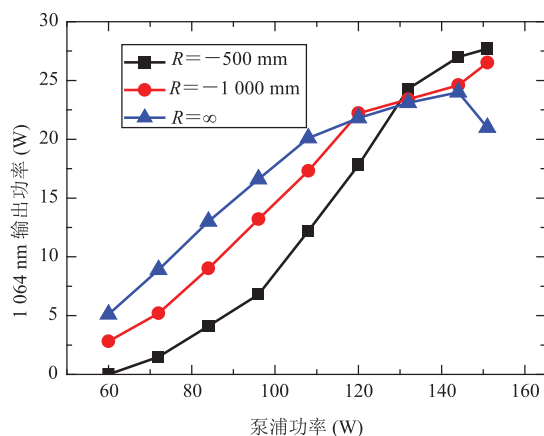


图 3 M₁ 镜不同曲率下 1 064 nm 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of 1 064 nm laser output power with pump power under different curvature of M₁ mirror

曲率 $R=\infty$ 、-1 000 mm 和 -500 mm 时, 获得 1 064 nm 激光最高输出分别为 24 W、26.5 W 和 27.7 W, 相应的 LD 泵浦功率为 144 W、151 W 和 151 W, 对应的光-光转换效率为 16.7%、17.5% 和 18.3%。实验结果较好地符合了图 1 中的理论模拟。腔镜 M₁ 曲率 $R=\infty$ 的情况下, 在 LD 泵浦功率超过 144 W 时, 由于激光棒的热透镜效应使激光运转偏离稳区而进入了非稳区, 从而导致 1 064 nm 输出功率大幅下降。

其次, 当 M₁ 镜曲率 $R=-500$ mm 时, 对 M₂ 镜的输出耦合率进行了优化。不同输出耦合率条件下的 1 064 nm 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 4 所示。在 LD 泵浦功率为 151 W 时, 输出耦合率 $T=20\%$ 、 30% 和 40% , 对应的 1 064 nm 最高输出分别为 27.7 W、33.7 W 和 32.1 W, 相应的光-光转换效率为 18.3%、22.3% 和 21.2%。因此, 最佳输出耦合率为 $T=30\%$ 。

在 $R=-500$ mm、 $T=30\%$ 条件下, 插入标准具前后的激光最大输出功率由 34.3 W 降为 33.7 W, 可见标准具插入损耗很小, 激光输出功率仅降低 2%。利用光束质量分析仪 (M²-200, Spiricon Inc.) 对输出功率为 33.7 W 时

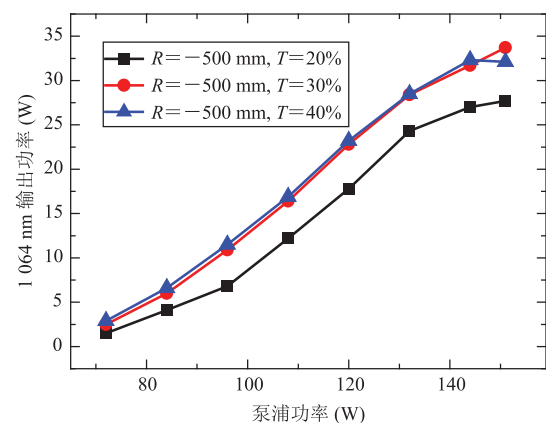


图 4 不同输出耦合率下 1 064 nm 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of 1 064 nm laser output power with pump power under different output coupling ratio

的 1 064 nm 激光进行了光束质量测量, 测量结果如图 5 所示, 测量到的 1 064 nm 激光的光束质量因子 $M_x^2=1.25$ 和 $M_y^2=1.30$, 对应的光束质量 $M^2=1.28$ 。

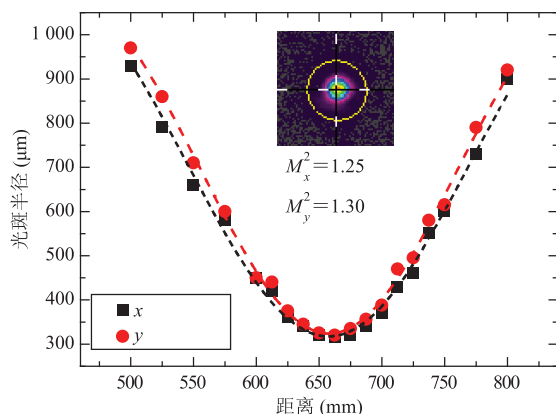


图 5 1 064 nm 激光的光束质量测量结果

Fig. 5 Measurement of beam quality of 1 064 nm laser

根据公式(3), 本实验采用自行研制的半导体制冷(Thermoelectric Cooling, TEC)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 1 064 nm 激光波长可使用波长计(WS-7, HighFinesse GmbH)进行测量, 波长调谐结果如图 6 所示。当标准具的温度以 0.1 °C 间隔在 40~70 °C 变化时, 1 064 nm 激光的波长可以从 1 064.304 nm 精细调谐到 1 064.578 nm, 调谐范围为 274 pm(72.6 GHz),

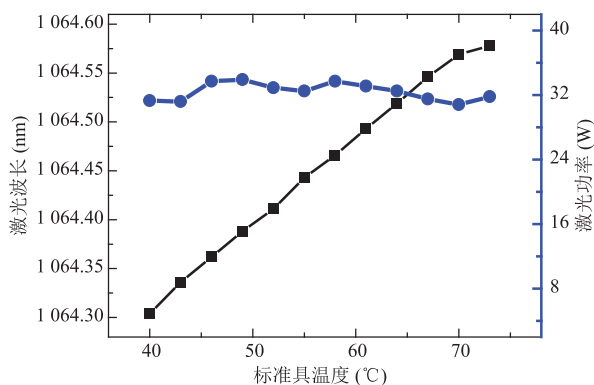


图 6 激光波长随标准具温度变化曲线

Fig. 6 Variation curve of wavelength of laser with temperature of etalon

相应的调谐精度约为 0.83 pm(220 MHz), 较好地符合了理论计算结果。波长调谐过程中还对激光输出功率进行了监测, 在标准具温度调至 55 °C 时, 产生的激光波长为 1 064.388 nm, 此时输出功率最高, 为 33.9 W; 在标准具温度调至 90 °C 时, 产生的激光波长为 1 064.569 nm, 此时输出功率最低, 为 30.8 W。可以看出, 整个波长调谐过程中 1 064 nm 激光输出功率变化约 10%。

使用高精度(精度 0.1 GHz)波长计(WS-7, HighFinesse GmbH)对 1 064 nm 激光线宽进行了测量。激光最高输出功率时, 时长 600 s 的线宽测量结果如图 7 所示, 激光的线宽为 0.1 GHz。实验测得的激光线宽远小于理论计算的标准具透射谱线宽度, 这是由于激光线宽不仅取决于标准具对各纵模引入的损耗差, 还与激光介质的增益谱线有关, 同时环形行波腔消除空间烧孔效应也大大有利于窄线宽激光输出。因此, 标准具的相关参数还需与实验相结合进行优化。

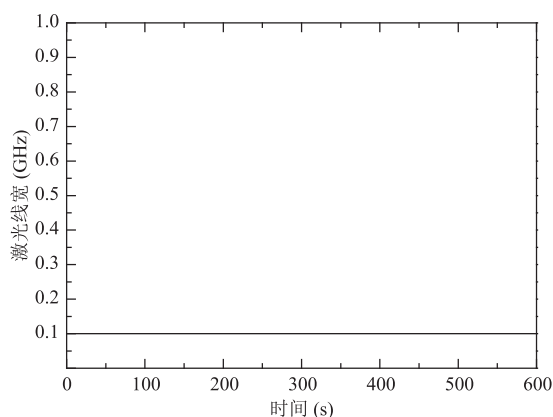


图 7 10 分钟内激光线宽测量结果

Fig. 7 Measurement of linewidth of 1 064 nm laser in ten minutes

4 结论

文章理论分析了环形腔的单向运行和标准具压窄线宽与调谐波长, 基于 ABCD 矩阵对环形腔腔型进行了计算设计。实验中组合使用法拉第旋光器、半波片、薄膜偏振片形成“光学二极管”

获得环形腔单向运转, 优化了腔镜曲率与输出耦合率。在 LD 泵浦功率 151 W 条件下, 获得输出功率 33.7 W、光束质量因子 $M^2=1.28$ 、线宽 0.1 GHz 的单向 1 064 nm 激光输出, 相应的光-光转换效率为 22.3%。采用控温精度为 0.1 °C 的 TEC 控温仪对标准具进行精确温控, 实现激光波长的精密调谐。通过改变标准具温度实现 1 064 nm 波长调谐范围 72.6 GHz, 相应的调谐精度为 220 MHz, 波长调谐过程中 1 064 nm 激光输出功率变化约 10%。本实验在输出功率和波长调谐范围方面较本组之前研究均有较大提升, 输出功率由 13.2 W 提升至 33.7 W, 波长调谐范围从 58 GHz 扩展至 72.6 GHz。整个系统稳定可靠, 而且相对简单、较易实现, 为获得可调谐窄线宽 1 064 nm 激光提供了实用有效的技术手段。

参 考 文 献

- [1] 万顺平, 毛献辉, 孙利群, 等. 半导体泵浦固体激光陀螺的研究进展 [J]. 应用光学, 2002, 23(2): 22-25.
- [2] 林志锋, 张云山, 高春清, 等. LD 抽运 Cr, Tm, Ho:YAG 微片激光器单纵模运转特性的研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1689-1693.
- [3] Brandi F, Velchev I, Neshev D, et al. A narrow-band wavelength-tunable laser system delivering high-energy 300 ps pulses in the near-infrared [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 32-37.
- [4] Okhapkin MV, Skvortson MN, Belkin AM, 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(3-6): 359-362.
- [5] 谢仕永, 鲁远甫, 薄勇, 等. 高功率可调谐 1 064 nm 准连续单频激光振荡-放大系统研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4659-4663.
- [6] Wang PY, Xie SY, Bo Y, et al. 33 W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D2a laser by sum-frequency generation in LBO [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(9): 238-241.
- [7] Bienfang JC, Denman CA, Grime BW, 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.
- [8] Lin Z, Gao C, Gao M, et al. Diode-pumped single-frequency microchip CTH:YAG lasers using different pump spot diameters [J]. Applied Physics B, 2009, 94(1): 81-84.
- [9] 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): 214003.
- [10] 张俊旋, 李锋, 毕德仓, 等. 可调谐单纵模绿光 Nd:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 46-50.
- [11] Fugate RQ, Denman CA, Hillman PD, et al. Progress toward a 50-watt facility-class sodium guide star pump laser [C] // Proceedings of SPIE: Advancements in Adaptive Optics, 2004, 5490: 1010-1020.
- [12] Harrison J, Finch A, Flint JH, et al. Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1123-1130.
- [13] Owyong A, Esherrick P. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 1988, 12(12): 999-1001.
- [14] Kane TJ, Cheng EA. Fast frequency tuning and phase locking of diode-pumped Nd:YAG ring lasers [J]. Optics Letters, 1988, 13(11): 970-972.
- [15] 孙桂侠, 刘涛, 钱金宁, 等. 可调谐全固态 Nd:YVO₄/LBO 倍频连续 671 nm 环形激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 92-96.
- [16] 鲁远甫. 高功率高光束质量全固态黄光激光技术研究 [D]. 北京: 中科院物理所, 2009.
- [17] Xie SY, Lu YF, Ma QL, et al. High power high beam quality diode-pumped 1 319-nm Nd:YAG oscillator-amplifier laser system [J]. Chinese Physics B, 2010, 19(6): 334-338.