

高功率可调谐 1064 nm 准连续单频激光 振荡-放大系统研究*

谢仕永^{1)†} 鲁远甫^{1)†} 薄 勇²⁾ 崔前进^{1)†} 徐一汀^{1)†} 许家林²⁾ 彭钦军²⁾ 崔大复²⁾ 许祖彦^{1)‡}

1) 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) 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)

3) 中国科学院研究生院, 北京 100190)

(2008 年 10 月 27 日收到, 2008 年 11 月 23 日收到修改稿)

研制了高功率可调谐 1064 nm 准连续单频激光振荡-放大系统. 振荡级采用三镜环形行波腔型结构的 Nd:YAG 激光器, 通过精确控制腔内标准具的温度改变标准具材质折射率和厚度实现了对激光波长的调谐, 获得了 13.2 W 调谐范围为 58 GHz 的 1064 nm 准连续单频振荡光, 其重复率为 1 kHz, 占空比为 10%. 经过由双 Nd:YAG 激光头串接构成的放大器对振荡光进行双程放大后激光最终输出功率为 44 W, 光束质量因子 $M^2 = 1.58$.

关键词: 可调谐激光, 单频激光, 标准具, 振荡-放大系统

PACC: 4260, 4260B, 4260D

1. 引言

高功率、高光束质量、可调谐的单频激光源在激光雷达、相干光通讯、高分辨激光光谱学、精确度量和非线性光学频率转换等方面有着广泛而重要的应用^[1-5]. 近年来随着半导体激光二极管技术的不断发展完善, 由其抽运的固体激光器(DPL)由于具有体积小、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单频激光源的研究热点. 采用短腔结构, 通过改变腔长来调谐波长是获取可调谐单频 DPL 激光输出的常用方法. Owyong 等^[6]采用 Nd:YAG 薄片腔结构, 通过调节加在薄片上的压力对激光发射波长进行调谐, 获得了调谐范围为 76.5 GHz 的 1 mW 1064 nm 单频光; Kane 等^[7]使用单块 Nd:YAG 非平面环形腔, 结合压电调谐的方法获得了调谐范围 100 MHz、功率为 6 mW 的 1064 nm 单纵模激光输出. 这些激光器结构紧凑, 频率稳定, 受外界干扰小, 但在腔内不能插入其他光学元件, 且很难做到大功率输出, 限制了其在很多方面的应用.

标准具法是获取可调谐单频 DPL 的另一种重

要手段, 由于其具有结构简单、易于控制、插入损耗低等优点而受到青睐. Harrison 等^[1]利用改变四镜环形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 1064 nm 单频激光输出. 这里, 我们研制了高功率可调谐 1064 nm 准连续单频振荡-放大激光系统. 振荡级采用双激光头串接的三镜环形行波腔结构, 使用自行研制的高精度温控仪控制标准具的温度从而实现对激光输出波长的精确调谐, 在激光器重复频率为 1 kHz, 占空比为 10% 的准连续方式运转下, 获得了 13.2 W、调谐范围 58 GHz 的高功率可调谐 1064 nm 单频振荡光输出. 为了获得更高功率, 振荡光经由双激光头串接构成的放大器进行双程放大, 放大级电源由振荡级电源同步触发, 最终得到 44 W 的激光输出, 实现了 12.8% 的能量提取效率, 放大系统输出激光的光束质量由振荡光的 $M^2 = 1.37$ 变为 $M^2 = 1.58$.

2. 理论分析

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^[8]

* 国家自然科学基金(批准号 60508013)资助的课题.

† E-mail: shiyong515@163.com

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

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, 一种方法是通过精细调节标准具的倾斜角 (即改变标准具内光线与法线的夹角 θ) 来实现对输出波长的精确调谐^[10]; 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, 通过精确调节标准具的温度进而改变其厚度 l 和折射率 μ 来精确调谐输出波长, 这种情况下波长调谐随温度变化关系可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{1}{l} \frac{dl}{dT} + \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} \right) \Delta T, \quad (2)$$

这时, 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.

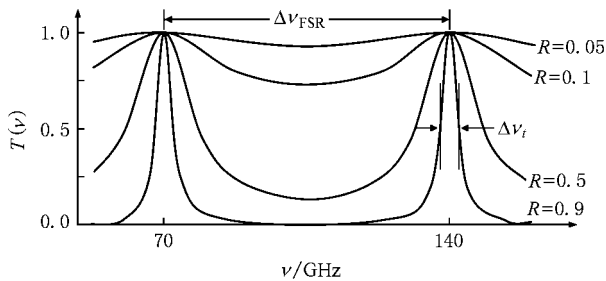


图1 标准具在不同反射率 R 下的透过率曲线 ($\Delta\nu_{\text{FSR}}$ 为标准具的自由光谱范围, $\Delta\nu_t$ 为标准具的透射谱线宽度)

标准具的透射谱线宽度为

$$\Delta\nu_t = \frac{c}{2\pi\mu l \cos\theta} \frac{1-R}{\sqrt{R}}, \quad (3)$$

其中, R 为标准具两端面的反射率. 为了更好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. 如图1所示, 标准具反射率 R 越大, 透射谱线宽度就越窄. 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, 进而不可避免的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.

将谐振腔内激光头的热透镜效应等效为焦距随抽运功率变化的厚透镜. 腔长远大于激光头长度时, 可认为厚透镜的主截面位置与抽运功率无关, 主截面距离激光棒端面的距离为 $L/2n$, 其中 L 为激光棒长度, n 为 Nd:YAG 晶体折射率. 根据上述假设^[10], 利用光束传播 ABCD 矩阵, 我们计算了稳态运转下

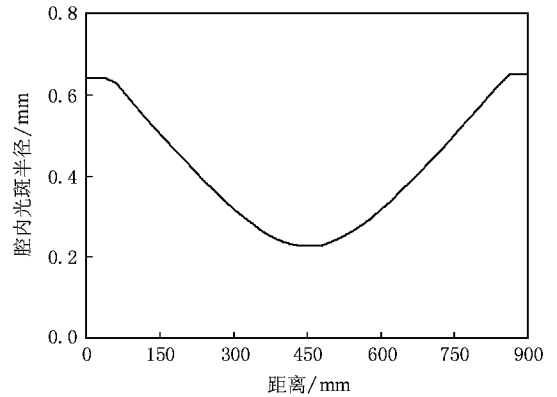


图2 利用 ABCD 矩阵理论计算的腔长 900 mm 时三镜腔内的光斑半径 (横坐标是顺时针方向距两激光头中点位置的距离, 纵坐标是不同位置处的光斑半径)

双激光头串接的三镜环形腔内激光束腰位置, 如图2所示. 考虑到光束入射到标准具表面的区域越小, 有效平面度会越高, 从而可以减小加工精度的限制; 同时, 光腰处的激光是以平面波入射到标准具, 保证了各入射光线的入射角度相等, 避免了在激光其他位置入射光线以不同的角度入射至标准具, 影响标准具的选模效果, 所以将标准具置于腔内靠近光腰的位置.

3. 实验装置

1064 nm 激光振荡-放大系统光路如图3所示. 振荡级采用由腔镜 M_1 , M_2 和 M_3 构成的环形行波腔结构, M_1 和 M_3 分别是镀有 22.5° 和 45° 1064 nm 高反膜的平面镜, M_2 是 1064 nm 透射率为 20% 的输出耦合平面镜. 激光头 Rod₁ 与 Rod₂ 中间插入的 90° 石英旋光晶体使得振荡激光角向偏振位相延迟与切向偏振位相延迟相互交换, 实时补偿由热致双折射效应带来的退偏效应. 1064 nm 偏振片 P_1 使得输出激光具有水平偏振态, 同 1064 nm 半波片、法拉第旋光器配合构成单向器, 使得激光单向运行.

Fabry-Pero (FP) 标准具厚 1.5 mm, 由高光学质量的融石英材料研磨而成, 两端面镀有对 1064 nm 反射率为 $R = 60\%$ 的膜层, 通过自行研制的高精度温控仪 (控温精度在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 对其进行温度控制. 在 1064 nm 处融石英折射率^[11] $\mu = 1.45$, 热膨胀系数 $[(1/l) \chi dl/dT]$ 为 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 折射率随温度的变化 (dn/dT) 为 $10.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. 将相关参数代入 (2) 式, 通过计算可得, 在 $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$ 时, $\Delta\lambda = 8.1 \times$

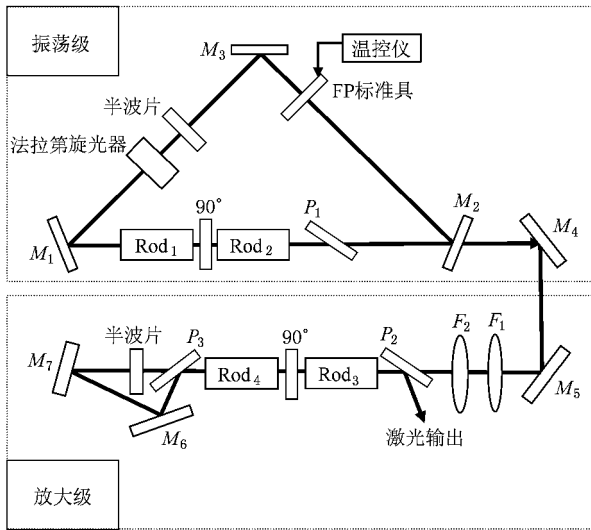


图3 三镜环形腔激光振荡-放大系统光路示意图

10^{-4} 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. 振荡级的单频可调谐激光经由 M_4 反射后进入放大级.

在放大级中, M_5 和 M_6 均是 45° 1064 nm 高反平面镜. 焦距为 75 mm, 300 mm 的两透镜 F_1 , F_2 构成望远镜系统, 将振荡光扩束到适当的口径后入射到激光头 Rod_3 和 Rod_4 中. 对 1064 nm 水平偏振态高透、垂直偏振态高反的偏振片 P_2 与 P_3 一方面用于滤去杂散光, 提高出射光的偏振度; 另一方面使激光可以往返两次通过放大级, 提高能量提取效率. 激光头 Rod_3 与 Rod_4 之间的 90° 石英旋光晶体同样是用来补偿热致双折射, 减缓激光退偏效应. M_7 是 11° 1064 nm 高反平面镜.

激光振荡-放大系统中的四个激光头均采用 LD 侧泵结构. 位于石英冷却水套中心的 Nd:YAG 激光棒, 由对称环绕的 LD 阵列对其进行三向抽运. 每一 LD 阵列包含四个 Bar 条, 可以提供最大 40 W 的 808 nm 抽运功率. 四个激光头内的 Nd:YAG 棒直径均为 3 mm, 长度均为 80 mm, Nd^{3+} 掺杂浓度 0.6 atm%, 较低的掺杂浓度易于实现较均匀的抽运增益分布, 从而有利于光束质量的提高; 四个激光棒端面均镀有 1064 nm 增透膜, 以降低激光棒端面的反射损耗. 去离子水在激光棒和石英水冷套之间高速流动, 以带走抽运过程中所产生的废热.

4. 实验结果与讨论

三镜环形结构振荡系统腔长为 900 mm. 将激光

头 Rod_1 与 Rod_2 靠近腔镜 M_1 放置, 此时束腰分布于 M_2 , M_3 之间. 实验中, 首先腔内未插入标准具, 测得在不同 LD 抽运功率下的振荡激光输出功率; 然后在腔内的束腰位置将标准具插入, 观测振荡输出光功率变化, 如图 4 所示. 插入标准具前后的激光最大输出功率由 13.5 W 降为 13.2 W, 可见标准具插入损耗很小, 激光最大输出功率仅降低 2%.

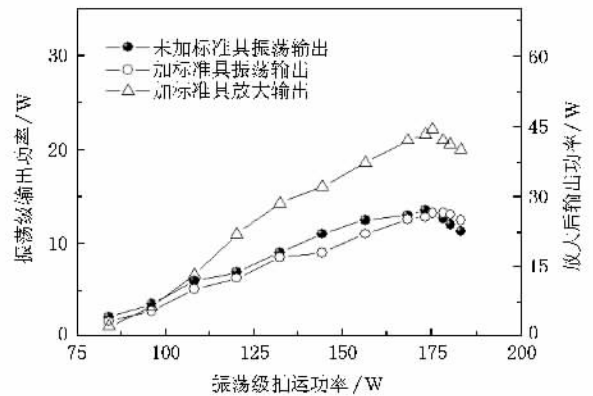


图4 输出功率随抽运功率的变化关系(“—●—”表示腔内未加标准具, 振荡级激光输出功率随抽运功率的变化关系; “—○—”表示腔内插入标准具后振荡级激光输出功率随抽运功率的变化关系; “—△—”表示腔内插入标准具, 放大级以 240 W 功率抽运时, 振荡-放大系统输出功率随抽运功率的变化关系)

利用 HighFinesse 公司的 WS-7 型波长计对振荡光线宽进行了测量, 在标准具插入前后各自最大输出功率处测得激光线宽分别是 0.6 GHz 和 0.1 GHz, 可以看出, 标准具的插入很明显地起到了压窄线宽的作用. 0.1 GHz 的线宽显然小于 0.3 GHz 的激光纵模间隔, 从而证实了激光是单纵模振荡运转的.

在激光稳态运转下, 通过设定温控仪的温度来精确控制标准具的温度. 当标准具温度由 28°C 调节

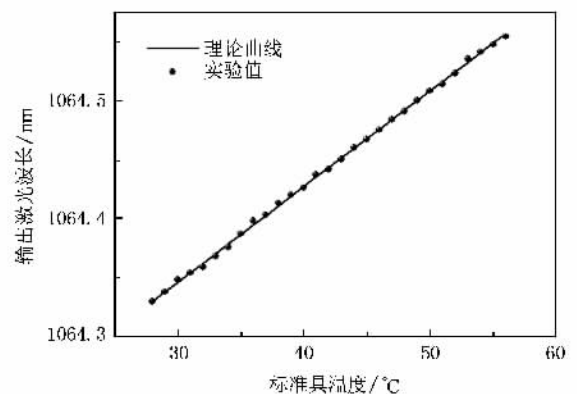


图5 1064 nm 附近的波长调谐(“●”表示实验测得的在不同温度下的波长值; “—”表示理论计算的波长随温度变化曲线)

到 56 °C 时, 利用 WS-7 型波长计对振荡光的波长进行了测量, 得到了从 1064.33 nm 到 1064.55 nm 的输出激光波长, 实现了 58 GHz 的调谐范围. 1064 nm 附近的波长调谐如图 5 所示, 图中“●”表示实验测得的在温度调谐间隔为 1 °C 时的波长值; “—”表示理论计算的波长随温度变化曲线, 可见, 实验数据较好地符合了理论计算结果. 当标准具温度超过 56 °C 时, 波长稳定性变差; 继续升高温度, 激光波长返回到最初的 1064.33 nm, 完成了一个自由光谱范围的扫描.

激光输出功率为 13.2 W 时, 采用 Spiricon 公司的 M^2 -200 光束质量分析仪测量了插入标准具后振

荡级输出激光的 M^2 因子, 其中 $M_x^2 = 1.42$, $M_y^2 = 1.31$. 光束在 X, Y 方向的二维光强分布如图 6 (a) 所示.

放大级抽运电源由振荡级抽运电源同步触发. 改变由 P_3, M_6, M_7 组成的三角形的长度, 使通过双程放大后的输出光与入射光构成自成像关系. 在放大级以 240 W 功率抽运时, 放大系统的激光输出功率随振荡级抽运功率的变化如图 4 中 \triangle 点所示. 放大后系统最大输出功率为 44 W, 相应的能量提取效率为 12.8%, 此时输出激光的二维光强分布如图 6 (b) 所示, $M_x^2 = 1.59$, $M_y^2 = 1.57$.

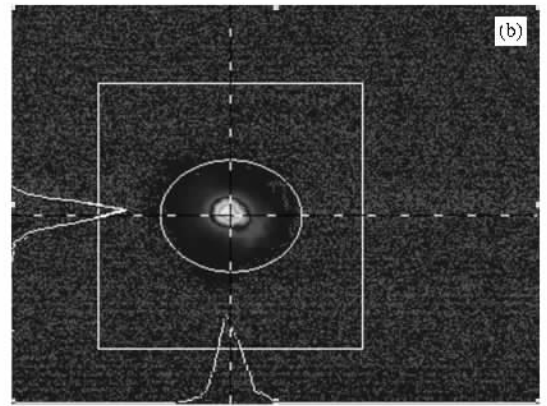
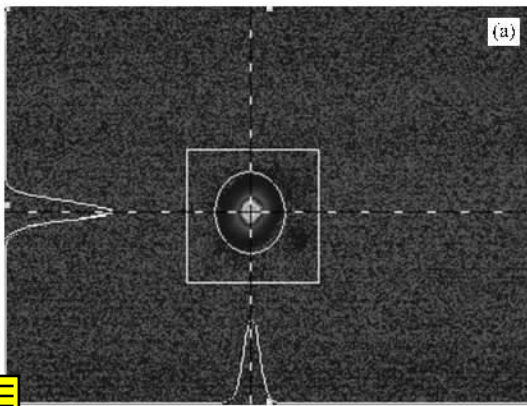


图 6 (a) 为插入标准具, 振荡输出激光功率为 13.2 W 时, 光束在 X, Y 方向的二维光强分布 (b) 为系统输出功率为 44 W 时, 光束在 X, Y 方向的二维光强分布

5. 结 论

采用了三镜环形行波腔作为振荡级, 串接的双激光头作为放大级, 经过双程放大后, 在重复率为 1 kHz、占空比为 10% 的条件下, 最终得到了输出功率为 44 W, $M^2 = 1.58$ 的高功率高光束质量准连续单

频 1064 nm 激光输出. 通过改变腔内标准具的温度对波长进行调谐, 获得了 58 GHz 的调谐范围. 采取了 90°石英旋光晶体补偿热致双折射和偏振片抑制荧光放大等措施, 使振荡光放大后仍能保持较高的光束质量. 通过优化放大级, 今后有望得到更高功率的单频可调谐 1064 nm 激光输出.

- [1] Harrison J, Finch A, Flint J H, Moulton P F 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 1123
- [2] Brandi F, Velchev I, Neshev D, Hogervorst W, Ubachs W 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 32
- [3] Okhapkin M V, Skvortsov M N, Belkin A M, Kvashnin N L, Bagayev S N 2002 *Opt. Commun.* **203** 359
- [4] Stothard D J M, Lindsay I D, Dunn M H 2004 *Opt. Express* **12** 502
- [5] Eickhoff M L, Hall J L 1995 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **44** 155
- [6] Owyong A, Esherick P 1987 *Opt. Lett.* **12** 999
- [7] Kane T J, Cheng E A P 1988 *Opt. Lett.* **13** 970

- [8] Lan X J 2005 *Laser Technology* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [蓝信钜 2005 激光技术 (北京: 科学出版社)]
- [9] Ma Y, Wang W M 2005 *High Power Laser And Particle Beams* **17** 151 (in Chinese) [马毅、王卫民 2005 强激光与粒子束 **17** 151]
- [10] Yang X D 2006 *Doctoral Dissertation* (in Chinese) [杨晓东 2006 博士学位论文]
- [11] Li J Z 1986 *Handbook of Optics* (Xi'an: Shaanxi Science Press) (in Chinese) [李景镇 1986 光学手册 (西安: 陕西科学技术出版社)]

High power tunable single-frequency 1064 nm quasi-continuous-wave laser oscillator-amplifier system *

Xie Shi-Yong^{1)†} Lu Yuan-Fu^{1)†} Bo Yong²⁾ Cui Qian-Jin^{1)†} Xu Yi-Ting^{1)†} Xu Jia-Lin²⁾
Peng Qin-Jun²⁾ Cui Da-Fu²⁾ Xu Zu-Yan^{1)†}

1) *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

2) *Research Center for Laser Physics and Technique, Technique Institute of Chemistry and Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

3) *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

(Received 27 October 2008 ; revised manuscript received 23 November 2008)

Abstract

We have developed a high power tunable single-frequency 1064 nm quasi-continuous-wave laser oscillator-amplifier system. By controlling precisely the temperature of etalon in the three-mirror ring traveling-wave oscillating cavity viz. adjusting refractive index and thickness of material to tune laser wavelength, 13.2 W 1064 nm single-frequency quasi-continuous-wave oscillating light with tunable range of 58 GHz is obtained, at repetition rate of 1 kHz and duty ratio of 10%. After the laser beam from the oscillator transfers through the amplifier with two laser heads, the output of the oscillator is amplified to be 44 W and the beam quality factor M^2 is measured to be 1.58.

Keywords : tunable laser, single-frequency laser, etalon, oscillator-amplifier system

PACC : 4260, 4260B, 4260D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60508013).

† E-mail :shiyong515@163.com