百瓦级全固态连续单频 1064 nm 激光器的研究

郭永瑞[1]，卢华东[1,2]*，苏 静[1,2]，彭堃墀[1,2]

[1]山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室，山西 太原 030006；

[2]山西大学极端光学协同创新中心，山西 太原 030006

摘要 利用四块 Nd…YVO_4 晶体，采用主振荡功率放大结构对全固态连续单频 1064 nm 激光种子源进行四级放大，实现了实验级别的百瓦级连续单频 1064 nm 激光源输出。注入抽运功率为 220.00 W 时，放大级最大输出功率为 103.80 W，总的光光转化效率为 33.2%。激光放大器的输出功率为 97.73 W 时，激光放大器的长期功率稳定性在 5 小时内优于±0.53%，光束质量因子 M^2<1.38，强度噪声在 4.3 MHz 处达到了量子噪声极限。

关键词 激光器；高功率激光器；主振荡功率放大；单频；连续波

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi：10.3788/CJL201744.0601007

Investigation of Hundred-Watt All-Solid-State Continuous-Wave Single-Frequency 1064 nm Laser

Guo Yongrui[1], Lu Huadong[1,2], Su Jing[1,2], Peng Kunchi[1,2]

[1]*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*;

[2]*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*

Abstract By utilizing the master oscillator power amplifier configuration which includes a continuous-wave single-frequency 1064 nm seed laser and four-stage Nd…YVO_4 amplifier, a continuous-wave single-frequency 1064 nm laser is realized experiment ally. When the pump power is 220.00 W, the highest output power reaches 103.80 W and the total optical-optical efficiency of the amplified laser is 33.2%. When the output power of the amplified laser is 97.73 W, the long-term power stability within five hours is better than ±0.53% and the beam quality factor M^2 is less than 1.38. The intensity noise reaches the quantum noise limit of 4.3 MHz.

Key words lasers; high-power laser; master oscillator power amplifier; single-frequency; continuous-wave

OCIS codes 140.3460; 140.3570; 140.3580

1 引 言

全固态连续单频激光器具有低噪声、窄线宽、高光束质量、高稳定性等优点，在精密测量、超精细光谱、冷原子物理、量子通信、激光雷达、激光遥感和材料加工等领域得到广泛应用[1-5]。随着基础研究的深入和科学技术的发展，人们对百瓦级功率输出的低噪声全固态连续单频激光器提出了需求。例如在引力波探测以及风速非接触测量等精密测量中，提高低噪声全固态连续单频激光器的输出功率可提高整个测量系统的信噪比，进而提高测量精度。在非经典光源的制备中，高输出功率的低噪声全固态连续单频激光器可同时抽运多个光学参量振荡器(OPO)，从而获得多组份纠缠态光场，为量子计算和量子网络通信提供重要的技术基础。

收稿日期：2017-02-06；**收到修改稿日期**：2017-03-03

基金项目：国家自然科学基金(61405107，61227902)、科技部重大科学研究计划(2016YFA0301401)

作者简介：郭永瑞(1989—)，男，博士研究生，主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail：gyr_ls@163.com

导师简介：彭堃墀(1936—)，男，教授，博士生导师，主要从事激光技术及量子信息方面的研究。E-mail：kcpeng@sxu.edu.cn

*通信联系人。E-mail：luhuadong@sxu.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在冷原子物理的研究中，高输出功率的低噪声全固态连续单频激光器更易获得高势垒光阱，从而为冷原子物理研究的发展提供重要的技术手段。

目前主要采用激光放大技术来获得连续单频激光器的百瓦级功率输出。激光放大器有行波放大器和种子源注入锁定激光放大器两大类。行波放大器采用直接放大方式，让种子光在放大晶体中单次穿过，光路主要采用主振荡功率放大(MOPA)结构。种子源注入锁定激光放大器又称再生放大器，一般在谐振腔中注入高质量的微弱信号光，并且将谐振腔的谐振频率与信号光的频率进行锁定以控制高功率的激光振荡。激光放大器有薄片式[6]、板条式[7-8]、光纤式[9-10]和固体式[11]。相对于薄片、板条以及光纤激光放大器而言，固体激光放大器更易获得低噪声、高质量的连续单频激光输出。2005 年，Takeno 等[12]将非平面环形振荡器(NPRO)作为种子源[13]，采用侧面抽运的方式，通过注入锁定激光放大技术将 2 W NPRO 种子源激光器的输出功率放大到 100 W。为获得百瓦级的输出功率，采用两组具有热致退偏补偿功能的 Nd…YAG 作为激光放大介质，每组由两块 Nd…YAG 晶体和一块 90°旋光片组成。2008 年，Willke 等[14]同样使用 2 W NPRO 激光器作为种子源，经固体激光放大器放大后，连续单频 1064 nm 激光器的输出功率可达 200 W。该装置先采用四级行波放大装置将单频激光的输出功率放大到 35 W[15]，后采用四块 Nd…YAG 增益晶体，通过注入锁定激光放大技术和端面抽运方式将连续单频 1064 nm 激光的输出功率提高到 200 W。由于采用前后两种放大装置，因此激光器系统体积庞大。此外，为提高系统稳定性和输出光束的质量，采用反馈控制系统在种子光和放大器之间进行锁定；为降低系统的强度噪声，使用光学模式清洁器来过滤放大激光的强度噪声和空间模式，这些使得整个系统更加复杂。国内目前对于高功率低噪声全固态连续单频激光器的研究主要在于提高单个谐振腔的输出功率。2014 年，在提出激光器实现单频运转的物理条件的基础上，我们组通过优化谐振腔内的线性和非线性损耗，研制出输出功率达 33.70 W 的连续单频 1064 nm 激光器。由于存在非线性损耗，激光器同时有 1.13 W 的连续单频 532 nm 激光输出[16]。之后研究了非线性损耗对激光器强度噪声的影响[17]，并设计了反馈控制回路来控制非线性损耗以提高激光器的功率和频率稳定性[18]。为提高低噪声全固态连续单频 1064 nm 激光器的输出功率，本文采用 MOPA 结构对自主生产的输出功率为 50.00 W 的单频 1064 nm 种子源激光器进行四级行波功率放大。相对于注入锁定激光放大器而言，MOPA 结构采用单次通过激光晶体实现激光放大，不需要锁定系统，更易于实现而得到广泛应用。通过优化放大系统中主振荡源光束腰斑和抽运腰斑，以及采用偏振选择和偏振补偿措施，研制出输出功率达103.80 W的全固态连续单频 1064 nm 激光器。

2　实验装置

百瓦级低噪声全固态连续单频 1064 nm 激光器的实验装置如图 1 所示。整个系统包括主振荡激光器、四级放大系统和测量系统三部分。主振荡激光器为输出功率达 50.00 W 的全固态连续单频 1064 nm 激光器。其中，抽运源为光纤耦合输出的激光二极管(LIMO 公司，德国)，中心波长为 888 nm，光纤芯径为 400 μm，数值孔径为 0.22，最大输出功率为 110.00 W。采用该激光二极管作为抽运源，抽运增益晶体不仅能有效降低由于量子亏损而产生的热能，进而减小增益晶体的热透镜效应，而且增益晶体对 888 nm 激光具有非偏振吸收特性，有利于提高激光器的转化效率和改善激光器的稳定运转特性[19]。激光二极管输出的抽运光经由两个平凸透镜(焦距分别为 $f_1=30$ mm 和 $f_2=80$ mm)组成的望远镜耦合系统聚焦到增益晶体中，实现抽运光和激光器谐振腔模之间的最佳模式匹配。主振荡源激光器谐振腔采用四镜 8 字环形谐振腔，其中输入镜 M_1 为曲率半径 $R=1500$ mm 的凹凸镜，镀有 888 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜；M_2 为曲率半径 $R=1500$ mm 的平凸镜，镀有 1064 nm 的高反膜；M_3 和输出镜 M_4 均为曲率半径 $R=100$ mm 的平凹镜，M_3 镀有 1064 nm 高反膜，M_4 镀有 532 nm 高反膜且对 1064 nm 的透射率为 $T=25\%$。增益晶体为 a 轴切割的复合晶体 $YVO_4+Nd\cdots YVO_4$，对抽运光的的吸收效率可达 89%[20]。其尺寸为 3 mm×3 mm×(3+20) mm，前段 3 mm 的非掺杂 YVO_4 基质用来减缓增益晶体的端面热效应，后段 20 mm 的 $Nd\cdots YVO_4$ 基质的掺杂原子数分数为 0.8%。增益晶体后端面设计有 1.5°的楔角，可增大 σ 偏振光的几何损耗，从而保证了 π 偏振光优于 σ 偏振光在腔内起振，最终实现主振荡激光器线偏振光的稳定输出[21]。谐振腔内插入的光学单向器由 TGG 晶体和 λ/2 波片组成，保证激光器的单向运转[20]。其中，在 M_3 和 M_4 之间的基模束腰

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

处插入Ⅰ类非临界相位匹配的LBO非线性晶体(3 mm×3 mm×18 mm),用来引入非线性损耗,实现激光器的稳定单频运转[16-17]。主振荡激光器的输出光束经焦距 $f_3=200$ mm 的平凸透镜进行整形,再经平面镜 S_1(45°入射)将532 nm激光(高反)和1064 nm激光(高透)分开,532 nm激光进入到功率计 PM_1 中,而绝大部分的连续单频1064 nm激光经平面镜 S_2(S_2、S_3:45°入射,1064 nm高反)两次反射后注入到行波放大系统中用于产生百瓦级的激光输出。经 S_2 透射的光束由分束镜 S_3 分为两部分,一部分光注入到 $F\text{-}P_1$ 干涉仪中用于监视主振荡激光器的单频特性,输出的光信号经由探测器 D_1 探测后转化为电信号,并由示波器 OS_1(TBS 1022, Tectronix公司,美国)来显示;另一部分光经 S_4 反射后注入到参考 $F\text{-}P_2$ 干涉仪中,根据其输出信号调节压电陶瓷(PZT)用于主振荡激光器的频率锁定,进一步提高主振荡激光器的频率稳定性。$\lambda/4$ 波片用来修正主振荡激光器输出光束的偏振度,光隔离器(IO-5-TAG-HP,OPTICS FOR RESEARCH,美国)用来隔离放大级系统的反射光,避免放大级系统的反射光损坏主振荡激光器。主振荡激光器的输出光束(直径为1400 μm)经焦距 $f_4=100$ mm 和 $f_5=50$ mm 平凸透镜组成的望远镜聚焦系统1整形之后进入到放大级系统。

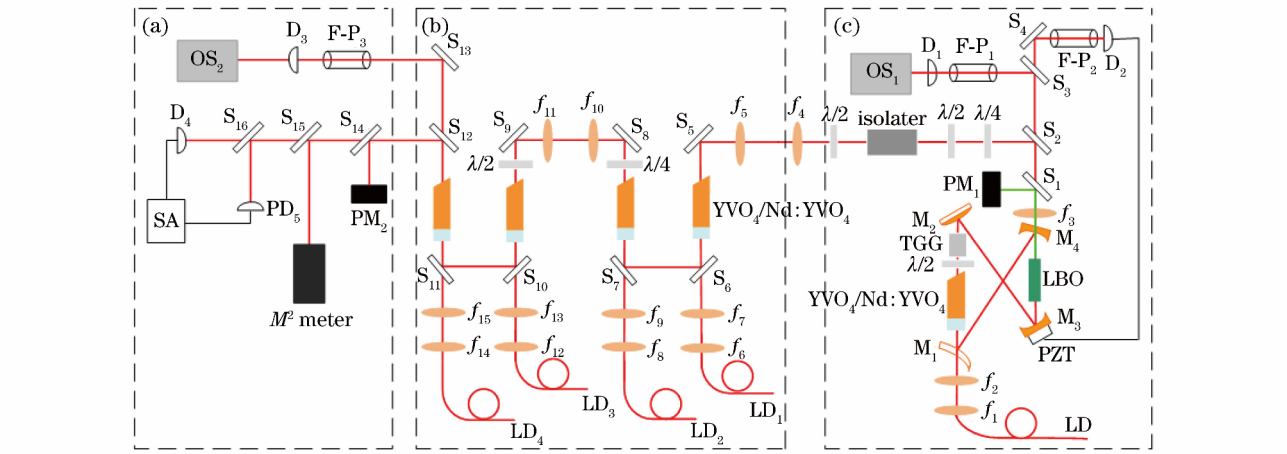

图1　实验装置图。(a)测量系统;(b)四级放大系统;(c)主振荡激光器

Fig. 1　Schematic of experimental setup. (a) Measuring system; (b) four-stage amplification system; (c) master oscillator laser

四级行波放大系统的放大级抽运源为光纤耦合输出的激光二极管(LIMO公司,德国),中心波长为808 nm,光纤芯径为400 μm,数值孔径为0.22,平均输出功率为55.00 W。四级放大系统的抽运光经焦距分别 f_6、f_8、f_{12}、f_{14} 为30 mm和 f_7、f_9、f_{13}、f_{15} 为80 mm的透镜组成的望远镜聚焦系统聚焦到放大级增益晶体中,输入镜 S_6、S_7、S_{10}、S_{11} 为45°入射的平面镜,镀有808 nm高透膜和1064 nm高反膜。放大级采用808 nm的抽运波段,Nd…YVO_4 晶体对该波段具有高吸收率,从而使放大级的增益晶体获得高增益系数[22]。增益晶体为a轴切割的复合晶体 $YVO_4+Nd\cdots YVO_4$,其尺寸为3 mm×3 mm×(3+20) mm,前段3 mm的非掺杂 YVO_4 基质用来减缓增益晶体的端面热效应,后段20 mm的低掺杂 $Nd\cdots YVO_4$(掺杂原子分数为0.2%)用来减缓增益晶体的热效应[20]。放大级增益晶体后端面有1.5°的楔角用来避免寄生振荡效应,提高放大效率。这是因为对于两端面平行的放大级增益晶体,在高增益高抽运功率的条件下,容易存在寄生振荡效应,影响激光放大器增益晶体的增益特性[22-23]。二级放大系统的输出光束经焦距 $f_{10}=50$ mm 和 $f_{11}=40$ mm透镜组成的望远镜聚焦系统2再次整形(光束束腰直径为700 μm)注入三级和四级放大光路中,实现三级和四级放大处的种子光与抽运光的最佳模式匹配,而引入的 $\lambda/4$ 波片使二级放大系统的输出光束由椭圆偏振光变为线偏振光,结合 $\lambda/2$ 波片,调节该线偏振光的偏振方向为水平偏振。

测量装置中四级放大系统的输出光束经 S_{12} 和 S_{14} 两次反射后注入到功率计 PM_2(LabMax-Top, Coherent公司,美国)中,测量其输出功率。经 S_{12} 透射的一小部分光经 S_{13} 反射后注入由 $F\text{-}P_3$ 干涉仪中用于监视激光放大器的单频特性,输出的光信号经探测器 D_3 探测后转化为电信号,并由示波器 OS_2(TBS 1022, Tectronix公司,美国)来显示。而经 S_{14} 透射的一小部分光用分束镜 S_{15} 分为两部分,其中的一部分进入到光束质量分析仪(BP209-VIS/M, Thorlabs公司,美国)中,测量四级放大系统输出光束的光束质量因子,另一

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

部分光经 50/50 分束器 S_{16} 分为两部分进入到光电二极管 PD_4 和 PD_5（ETX 500，JDSU 公司，美国）中将光信号转化为电信号，再通过频谱分析仪 SA（N9010A，Agilent Tecknologies 公司，美国）来分析其强度噪声。

3　实验结果与分析

当主振荡激光器中非线性晶体的温度处于最佳相位匹配温度 149.0 ℃时，注入抽运功率 110.00 W，获得了输出功率分别为 50.00 W 和 0.90 W 的 1064 nm 和 532 nm 双波长激光输出，光光转换效率为 45.5%，实验中 F-P_1 干涉仪的精细度为 120，自由光谱区（FSR）为 750 MHz。由示波器 OS_1 记录的 F-P_1 干涉仪透射曲线如图 2 所示，其中红色曲线对应归一化的透射率，蓝色直线对应 PZT 的扫描电压值，黑色直线代表 F-P_1 干涉仪的自由光谱区范围，由图 2 可以看出，主振荡激光器处于稳定的单频运转状态。未注入抽运光时，主振荡激光器经四级放大系统后输出功率为 30.68 W，系统损耗较大，这是因为所用光隔离器的透过率较低（81%）以及光路系统中镜片存在反射损耗。在放大系统中，为了实现各级抽运光和种子光之间的模式匹配，获得较高的转化效率，实验中利用 ABCD 矩阵数值模拟了主振荡源输出光束的空间传输特性。以前两级放大为例，以平凸镜 f_4 为参考，正向行波的等效薄透镜系列如图 3 所示。

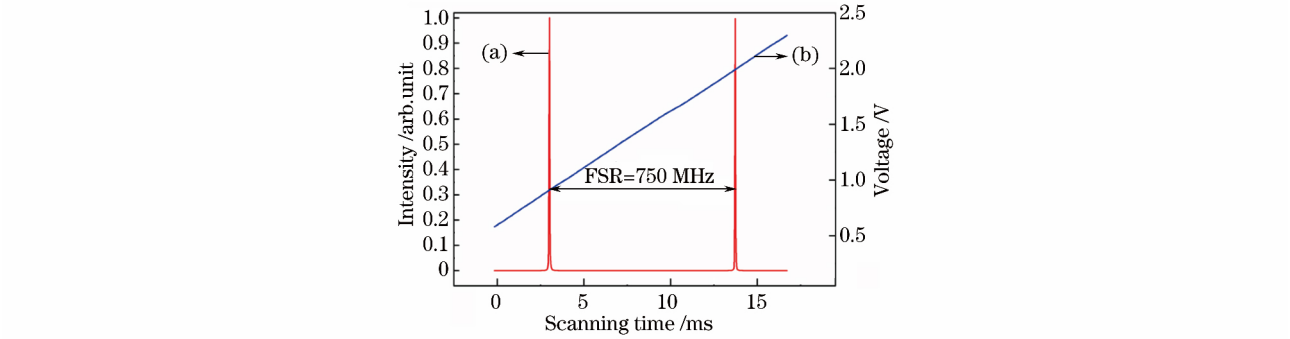

图 2　主振荡激光器的单频特性。（a）归一化透射曲线；（b）扫描电压

Fig. 2　Single frequency characteristic structure of the master oscillator laser. (a) Normalized transmission curve; (b) scanning voltage value

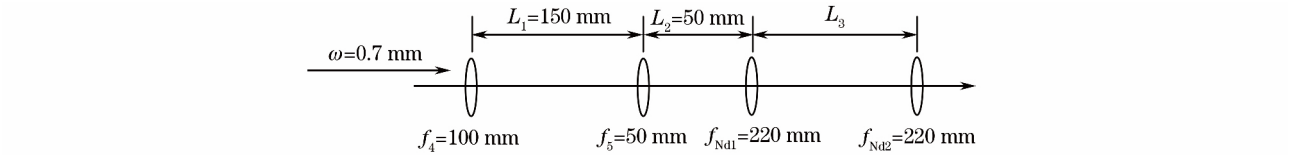

图 3　前两级放大的等效薄透镜序列

Fig. 3　Equivalent thin lens sequence of the front two amplified stages

由此可得种子光的光束传输矩阵为

$$\boldsymbol{m}=\begin{pmatrix}a & b\\ c & d\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{f_{\mathrm{Nd2}}} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1 & L_3\\ 0 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{f_{\mathrm{Nd1}}} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1 & L_2\\ 0 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{-f_5} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1 & L_1\\ 0 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{-f_4} & 1\end{bmatrix},\quad(1)$$

由于种子光入射到平凸镜 f_4 时为近平行光，光斑半径 ω 约为 0.70 mm，经平凸镜 f_4 和 f_5 组成的望远镜系统出射后的光束也为近平行光，光斑半径压窄到约 0.35 mm。此时放大系统中种子源与抽运光的光束束腰半径比应在 0.8 附近[24]，据此实验中采用由焦距 30 mm（透镜 f_6、f_8、f_12 和 f_14）和 80 mm（透 f_7、f_9、f_13 和 f_15）的透镜组成的望远镜系统对抽运光的腰斑进行变换。而在后两级的放大过程中，为了实现和前两级相同的模式匹配，采用由焦距 $f_{10}=50$ mm 和 $f_{11}=40$ mm 透镜组成的望远镜系统进行变换。由谐振腔的模式匹配效率公式，得到放大系统中种子光与抽运光的模式匹配效率公式为[24]

$$\eta_{\mathrm{m}}=\frac{\left[\iiint s_1(x,y,z)r_{\mathrm{p}}(x,y,z)\mathrm{d}v\right]^2}{\iiint s_1^2(x,y,z)r_{\mathrm{p}}(x,y,z)\mathrm{d}v},\quad(2)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中 $s_1(x,y,z)$ 和 $r_p(x,y,z)$ 分别为归一化的种子光强度分布和抽运光强度分布。实验中通过精细调节望远镜整形系统和放大级中抽运耦合系统两透镜之间的距离，并配合调节放大系统中抽运光的束腰腰斑在增益晶体中的位置，放大系统的模式匹配效率达到了 85%。

实验中通过调节放大系统前端的 $\lambda/2$ 波片调整主振荡源光束的偏振方向为水平偏振，从而使放大系统获得较高的增益。这是因为 Nd…YVO_4 晶体在 808 nm 处对 π 偏振光的吸收系数大于对 σ 偏振光的吸收系数，且对 π 偏振光的受激发射截面为 σ 偏振光的 3.6 倍[25]。实验中用光束质量分析仪观察了经二级放大系统放大之后输出光束的光斑，发现有退化现象，此为增益晶体的热效应导致。增益晶体的热效应还导致主振荡源经二级放大系统后的输出光束由线偏振光退化为椭圆偏振光，而在二级放大系统之后的光路中引入的 $\lambda/4$ 波片可有效地将椭圆偏振光变为线偏振光，再结合调节 $\lambda/2$ 波片使该线偏振光水平偏振注入到三级和四级放大光路。图 4 是激光放大系统的输出功率随注入四级行波放大系统的抽运功率的变化曲线。其中，横坐标为各放大级的注入抽运功率，纵坐标为总放大系统的输出功率。由图 4 可知，当总抽运光为 220.00 W时，单频 1064 nm 激光的输出功率由最初的 30.68 W 经四级放大器放大到 103.80 W，四级放大器的光光转化效率为 33.2%。为进一步研究该激光放大系统的放大能力，还需计算各级放大器的增益。由连续激光放大器的增益定义[26]

$$G = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}, \tag{3}$$

式中 P_{out} 为各级激光放大器的输出功率，P_{in} 为注入各级激光放大器的功率。通常情况下将 (3)式表示为

$$g = 10\lg G。 \tag{4}$$

利用(4)式及实验测量数据，得到各级激光放大器的增益如图 5 所示。各级激光放大器的增益分别为 2.273 dB、1.147 dB、0.911 dB 和 0.585 dB。由图 5 可知，随注入种子光光强的不断增大，各放大级的增益趋于饱和，说明在可预见范围内通过增加行波放大器的级数来提高输出功率的效果已不再明显。实验中，在主振荡源未锁定时测试了激光放大器在输出功率为 97.73 W 时的稳定性，如图 6 所示，该激光放大器在 5 h 内功率稳定性优于±0.54%。进一步测试比较主振荡激光器在锁定和未锁定到 F-P_2 参考腔时的激光器运转稳定性，使用的 F-P_3 干涉仪的精细度为 120，自由光谱区为 750 MHz，得到结果如图 7 所示。由图 7 可知，将主振荡激光器的腔长锁定后，放大系统输出功率的波动由未锁定情况下的±0.48%降低到±0.35%(1 h)，图示单频曲线和图 2 一致，这表明激光经放大器放大后仍然处于稳定的单频运转状态。由于 F-P_3 的线宽为 6.25 MHz，大于主振荡激光器输出光束的线宽(小于 1 MHz)，因此用该干涉仪难以检测主振荡激光器的频谱在放大过程中的变化。输出功率为 97.73 W 时，激光放大器在 x 和 y 方向上的光束质量因子 M^2 分别为 1.35 和 1.38，其散焦曲线以及光场分布如图 8 所示。与主振荡源的光束质量(在 x 和 y 方向上的光束质量因子 M^2 分别为 1.07 和 1.10)相比有退化现象，这是增益晶体中的热效应和光路系统中镜面边缘的衍射效应所致[27]。在实验中测量了激光放大器的强度噪声，如图 9 所示，可见激光放大器的强度噪声在 4.3 MHz 处达到了量子噪声极限(QNL)。

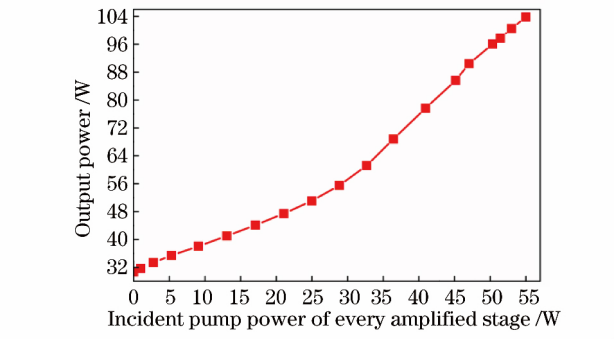

图 4　1064 nm 激光放大器的输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4　Output power of the amplified 1064 nm laser varying with the incident pump power

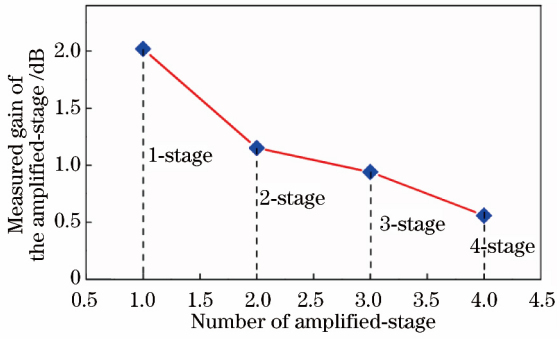

图 5　1064 nm 激光放大器各级增益的实验结果

Fig. 5　Experimental result of every stage gain of the amplified 1064 nm laser

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

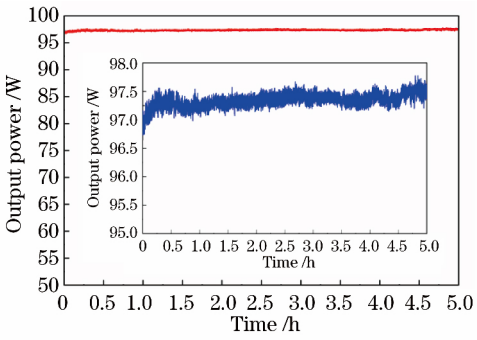

图 6　1064 nm 激光放大器的长期功率稳定性

Fig. 6　Long-term power stability of amplified 1064 nm laser

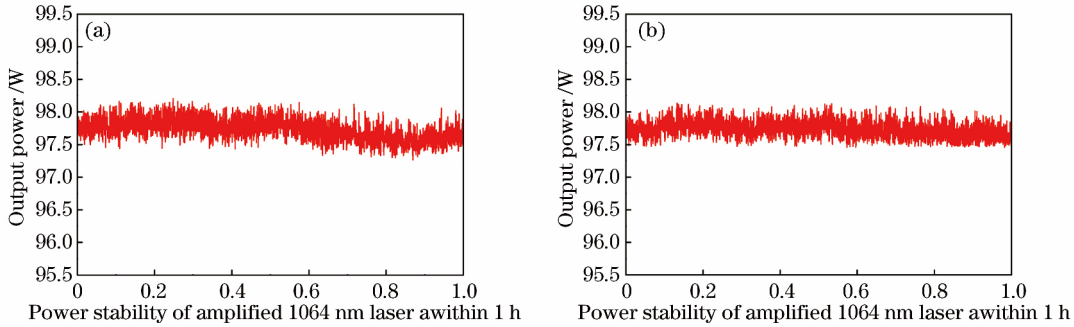

图 7　激光放大器输出功率稳定性比较。(a)未锁定状态;(b)锁定状态

Fig. 7　Comparison of power stability of the amplified laser. (a) Without locking scheme; (b) with locking scheme

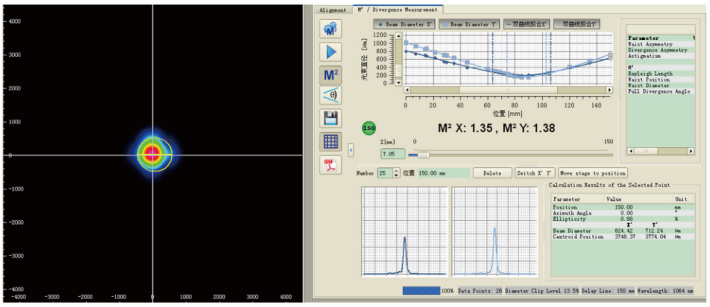

图 8　1064 nm 激光放大器的光束质量测量结果

Fig. 8　Measured result of the beam quality of the amplified 1064 nm laser

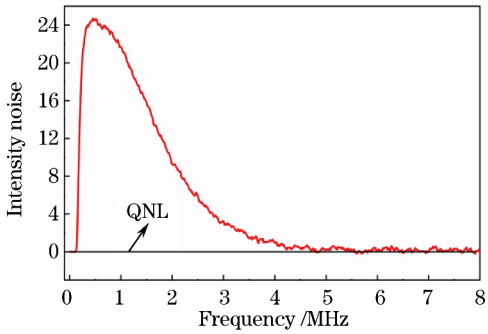

图 9　1064 nm 激光放大器的强度噪声

Fig. 9　Intensity noise of the amplified 1064 nm laser

4　结　　论

采用结构较为简单的四级行波放大装置,实现了实验级别输出功率达百瓦量级的全固态低噪声连续单

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

频 1064 nm 激光放大，激光放大器的最高输出功率为 103.80 W，四级放大器总的光光转换效率为 33.2%。当输出功率为 97.73 W 时，激光放大器的长期功率稳定性在 5 h 内优于±0.53%，在 x 和 y 方向光束质量因子 M^2 分别为 1.35 和 1.38，强度噪声在 4.3 MHz 处达到量子噪声极限。通过选用高透过率的光隔离器来增大种子光功率，提高激光放大器的输出功率。通过优化光学元件的固定装置，优化光路系统，保证光束的平行度，进一步改善激光放大器的光束质量。但是，由于多级行波放大系统存在增益饱和效应，难以通过该技术来实现更高功率的激光输出，因此需要采取新的措施来实现百瓦级以上的高质量低噪声全固态连续单频 1064 nm 激光器输出。

参　考　文　献

[1] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al*. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108005.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108005.

[2] Qu Qiuzhi, Wang Bin, Lü Desheng, *et al*. Principle and progress of cold atom clock in space[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42 (9): 0902006.
屈求智, 汪　斌, 吕德胜, 等. 空间冷原子钟原理样机地面测试结果[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902006.

[3] Liu Lei, Li Xiao, Xiao Hu, *et al*. Mid-infrared, singly resonant and continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a single-frequency fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0201001.
刘　磊, 李　霄, 肖　虎, 等. 单频光纤激光器抽运的中红外连续单谐振光学参变振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0201001.

[4] Wang Fei, Shen Deyuan, Long Jingyu, *et al*. High-power widely-tunable Tm:fiber master oscillator power amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602009.
汪　飞, 沈德元, 龙井宇, 等. 高功率、宽调谐掺 Tm 光纤主振荡功率放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602009.

[5] Jiang Jiaxin, Li Shiguang, Ma Xiuhua, *et al*. Investigation on spectral purity of injection seeding single frequency pulsed optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702011.
姜佳欣, 李世光, 马秀华, 等. 种子注入单频脉冲光参量振荡器的光谱纯度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702011.

[6] Antognini A, Schuhmann K, Amaro F D, *et al*. Thin-disk Yb…YAG oscillator-amplifier laser, ASE, and effective Yb…YAG lifetime[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(8): 993-1005.

[7] Sheng Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigang, *et al*. Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing lncidence Nd…YVO_4 slab geometry[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1101104.
沈利沣, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射 Nd…YVO_4 板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101104.

[8] Chen X M, Xu L, Hu H, *et al*. High-efficiency, high-average-power, CW Yb…YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24517-24523.

[9] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al*. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power.[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.

[10] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, *et al*. Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502002.
王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.

[11] Frede M, Wilhelm R, Fallnich C, *et al*. 213 W linearly polarized fundamental mode Nd…YAG ring laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004: 1001-1002.

[12] Takeno K,Ozeki T, Moriwaki S, *et al*. 100 W, single-frequency operation of an injection-locked Nd…YAG laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2110-2112.

[13] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd…YAG ring laser[J]. Optics Letters, 1985, 10(2): 65-67.

[14] Willke B, Danzmann K, Frede M, *et al*. Stabilized lasers for advanced gravitational wave detectors[J]. Classical and Quantum Gravity, 2008, 25: 114040.

[15] Frede M, Schulz B, Wilhelm R, *et al*. Fundamental mode, single-frequency laser amplifier for gravitational wave

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

detectors[J]. Optics Express, 2007, 15(2): 459-465.

[16] Lu H D, Su J, Zheng Y H, *et al*. Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1117-1120.

[17] Lu H D, Guo Y R, Peng K C. Intensity noise manipulation of a single-frequency laser with high output power by intracavity nonlinear loss[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5196-5199.

[18] Jin P X, Lu H D, Su J, *et al*. Scheme for improving laser stability via feedback control of intracavity nonlinear loss[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3478-3482.

[19] Mcdonagh L, Wallenstein R, Knappe R, *et al*. High-efficiency 60 W TEM_{00} Nd⋯YVO_4 oscillator pumped at 888 nm [J]. Optics Letters, 2006, 31(22): 3297-3299.

[20] Wang Y J, Zheng Y H, Shi Z, *et al*. High-power single-frequency Nd⋯YVO_4 green laser by self-compensation of astigmatisms[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(7): 506-510.

[21] Zheng Y H, Li F Q, Wang Y J, *et al*. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd⋯YVO_4 as a polarizing beam splitter[J]. Optics Communications, 2010, 283(2): 309-312.

[22] Délen X, Balembois F, Georges P. Design of a high gain single stage and single pass Nd⋯YVO_4 passive picosecond amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(9): 2339-2346.

[23] Délen X, Balembois F, Georges P. Direct amplification of a nanosecond laser diode in a high gain diode-pumped Nd⋯YVO_4 amplifier[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 997-1000.

[24] Chen Y F, Huang T M, Kao C F, *et al*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(8): 1424-1429.

[25] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. 6th ed. America: Springer-Verlag, 2006: 54-73.

[26] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al*. Laser theory[M]. 6th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 188.

周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. **第** 6 **版, 北京: 国防工业出版社**, 2010, 188.

[27] Han K Z, Ning J, Zhang B T, *et al*. High power single-frequency Innoslab amplifier[J]. Applied Optics, 2016, 55(20): 5341-5344.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net