

高功率高光束质量光纤-固体混合放大激光系统

汪勇¹, 刘斌¹, 叶志斌³, 徐霜馥¹, 唐超¹, 张翔², 郑峰¹, 刘崇^{1*}, 刘东¹, 项震¹

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²江苏曙光光电有限公司, 江苏 扬州 225009;

³衢州学院电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000

摘要 高功率以及高光束质量的激光光源在激光加工等领域具有重要的应用价值。利用重复频率为 50 kHz、脉宽为 3.9 ps、平均功率为 10.9 mW 的光纤种子光源, 经过两级固体双通放大, 最终得到平均功率为 27.65 W, 峰值功率达到 65 MW 的激光输出。第一级放大器为端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级, 第二级放大器为侧面抽运 Nd:YAG 放大级。通过利用球差补偿理论设计的双通放大结构以及调节放大级中的填充因子, 控制最终激光输出的光束质量, 得到输出激光的光束质量因子 $M^2=1.30$ 。

关键词 激光器; 球差补偿; 端面抽运; 侧面抽运; 光纤-固体混合放大激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401007

High Peak Power and High Beam Quality Fiber-Solid Hybrid Amplification Laser System

Wang Yong¹, Liu Bin¹, Ye Zhibin³, Xu Shuangfu¹, Tang Chao¹, Zhang Xiang², Zheng Feng¹, Liu Chong¹, Liu Dong¹, Xiang Zhen¹

¹The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²Jiangsu Shuguang Optoelectronics Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

³College of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China

Abstract High peak power and high beam quality laser is vitally valuable for applications in laser machining and other fields. A fiber laser with repetition frequency of 50 kHz, pulse width of 3.9 ps, and average power of 10.9 mW is used as the seed source. The average output power of 27.65 W is obtained in double-passing amplifier of two stages, with the pulse peak power of 65 MW. The first amplifier stage is end-pumped Nd:YVO₄ solid amplifier, and the second is side-pumped Nd:YAG solid amplifier. The beam quality is preserved by a double-passing configuration for spherical-aberration compensation. By optimizing the beam filling factor in each solid amplifier, the M^2 factor of the output beam reaches 1.30 finally.

Key words lasers; spherical-aberration compensation; end-pump; side-pump; fiber-solid hybrid amplification laser

OCIS codes 140.3538; 140.3280; 140.3510

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61575172)、浙江省自然科学基金(LZ15F050001)、中央高校基本科研业务费专项资金、衢州市科技计划(2016Y012)、衢州学院师资队伍专项经费(BSYJ201705)

作者简介: 汪勇(1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事固体激光器方面的研究。

E-mail: wang0556yong@163.com

导师简介: 刘崇(1978—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: chongliu78@hotmail.com(通信联系人)

1 引 言

高峰值功率高光束质量的超短脉冲激光在激光频率变换、微加工、激光打标等领域有着广泛的应用^[1-3]。具有高增益介质的主振荡功率放大(MOPA)结构是进一步提高振荡器功率的有效解决方案。多级光纤激光放大器的增益可高达 60 dB,但是,功率放大过程中的高峰值功率往往会造成光纤放大器的光学损伤、产生明显的非线性效应,严重影响光纤激光器、放大器的输出性能^[4-5]。而固体激光放大器可以承受很高的峰值功率,因此被普遍采用。

光纤-固体混合放大 MOPA 激光器采用光纤激光器作为种子源,利用固体放大器作为放大级。该方案不仅能够获得非常高的增益,同时光束质量也能得到很好的控制。2012 年 Chen 等^[6]利用脉宽为 3~15 ns,重复频率为 400 kHz,平均功率为 300 mW 的光纤种子光,经过光纤和三级 Nd:YVO₄ 固体放大后得到平均功率为 120 W 的激光输出,并且通过调节放大级中的填充因子得到 $M^2 = 1.30$ 的光束质量。Délén 等^[7]利用脉宽为 22 ps,重复频率为 200 kHz,平均功率为 50 mW 的光纤种子光,经过一级单端抽运 Nd:YVO₄ 放大后得到的平均功率为 10 W,峰值功率为 2.3 MW,增益系数为 45 dB,但是没有涉及对光束质量的控制。到目前为止,国内外的光纤-固体混合放大系统均采用光纤激光器和 Nd:YVO₄ 固体的混合放大,受限于 Nd:YVO₄ 晶体的特

性,其峰值功率最高只有几兆瓦。而与 Nd:YVO₄ 晶体相比,Nd:YAG 晶体可以承受更高的峰值功率,因此本文采用了 Nd:YVO₄ 晶体和 Nd:YAG 晶体的混合固体放大系统,对光纤种子光源进行放大。

为了获得更高的峰值功率和好的光束质量,本文研究了一种基于球差补偿^[8]的光纤-固体混合放大 MOPA 系统,采用重复频率为 50 kHz,脉宽为 3.9 ps 的光纤种子光源,经过端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级^[9-10]和侧面抽运 Nd:YAG 放大级进行双通放大,最终得到平均功率为 27.65 W 的激光输出,峰值功率为 65 MW,光束质量因子 $M^2 = 1.30$ 。

2 实验装置

光纤-固体混合放大 MOPA 激光器实验装置如图 1 所示,光纤种子光源先后通过端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级和侧面抽运 Nd:YAG 放大级进行双通放大,最终获得高功率高光束质量的激光输出。光纤种子光源采用立陶宛 EKSPLA 公司的 LightWire FP200 激光器。该皮秒光纤激光器的中心波长为 1064 nm,单模保偏光纤耦合输出,光束质量因子 $M^2 < 1.1$,脉宽为 3.9 ps,重复频率在 30 kHz~30 MHz 范围内可调。当重复频率为 50 kHz 时,输出的平均功率为 10.9 mW;当重复频率为 30 MHz 时,输出的平均功率为 255 mW。实验中使用的种子光的重复频率为 50 kHz,脉宽为 3.9 ps,平均功率为 10.9 mW。

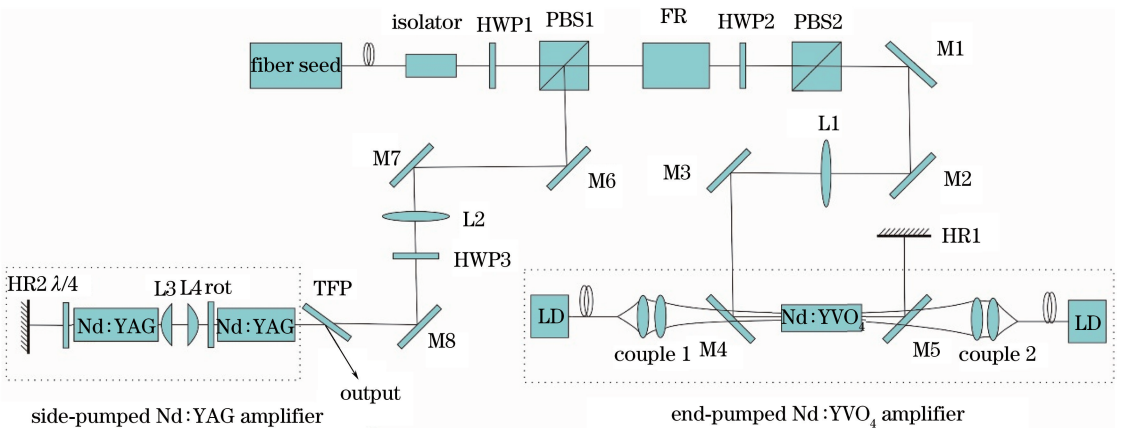


图 1 光纤-固体混合放大激光器装置图

Fig. 1 Experimental setup of the fiber-solid hybrid amplification laser

光纤种子光隔离准直后,经过半波片(HWP1)、光隔离器、偏振分光棱镜(PBS2),被透镜 L1 耦合进入端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级进行放大。光隔离器由偏振分光棱镜(PBS1)、法拉第旋光器(FR)以及

半波片(HWP2)构成,用于隔离双通返回的激光,防止对种子源造成损伤。半波片 HWP1 用来调节种子光的功率,以实现对不同种子光功率增益的研究。种子光在端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级单通放大后,

在晶体右端全反镜 HR1 的作用下,放大后的激光沿原路返回到 Nd:YVO₄ 晶体内,再次放大。双通放大后的激光从偏振分光棱镜(PBS1)输出,接着被透镜 L2 耦合进入侧面抽运 Nd:YAG 放大级双通放大,并从薄膜偏振片(TFP)输出,最终输出的激光平均功率最高可达 35 W(种子光重复频率为 400 kHz 时),峰值功率最高为 65 MW(种子光重复频率为 50 kHz 时)。

光纤激光器输出的种子光功率为 10.9 mW,为了使得皮秒种子光能够获得高增益而迅速放大,采用了双端抽运 Nd:YVO₄ 放大器双通放大作为第一级放大级。耦合透镜 L1 将激光光斑直径调整为 600 μm 并入射到第一级固体放大器,填充因子(种子光直径与抽运光直径的比值)为 0.75。第一级放大器采用的增益介质为 *a* 向切割的 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体,尺寸为 3 mm × 3 mm × 15 mm, Nd³⁺ 掺杂离子数分数为 0.3%, 晶体双端镀有 808 nm 和 1064 nm 增透膜,透射率大于 99%。Nd:YVO₄ 晶体是一种有效的四能级激光增益介质,峰值吸收波长在 808 nm 左右,输出激光的中心波长为 1064 nm。将晶体包裹 0.1 mm 厚的铝箔后放在铜热沉中,通过 20 °C 恒温水冷却。激光晶体两端各有一个 DILAS 的激光二极管(LD)抽运,抽运波长为 808 nm,最大输出功率为 50 W。LD 抽运激光通过芯径 400 μm 的光纤导入 Nd:YVO₄ 晶体,光纤的数值孔径为 0.22。左右两端面光纤输出的 808 nm 抽运光分别由耦合透镜组 1 和 2 调整光斑大小,使得入射到晶体端面时的光斑直径为 800 μm。双色镜 M4 和 M5 镀有对 808 nm 高透和 1064 nm 高反的介质膜。在两端抽运 LD 功率均为 30 W 的情况下,种子光经过一级双端抽运双通放大后,功率为 7.62 W。

为了获得更高功率的激光输出,第二级放大器采用了侧面抽运双 Nd:YAG 棒串接的放大模块进行双通放大并输出,利用耦合透镜 L2 将激光耦合到第二级固体放大器。Nd:YAG 激光晶体的直径为 3 mm,长度为 65 mm,采用激光二极管阵列侧面抽运,激光棒侧面通水冷却。Nd:YAG 晶体为光学各向同性晶体,具有热致双折射效应。热致双折射的主轴是呈径向和切向的,通过激光晶体的线偏振光会出现很大的退偏,严重影响输出激光光束质量和功率。因此,在两个 Nd:YAG 晶体之间加了 4*f*

成像系统(L3、L4)和 90° 的石英旋光器(rot),用来补偿 Nd:YAG 晶体的热致双折射效应。Nd:YAG 晶体具有优良的热学性能,在高功率激光系统中得到广泛应用。最后利用薄膜偏振片(TFP)保证线偏振激光输出。

3 实验结果及分析

3.1 光束质量控制

为了获得高功率的激光输出,在两级激光放大器上加载了很高的抽运功率(第一级为 60 W,第二级为 387 W),且为双通放大。在高功率抽运条件下,由于抽运光集中在激光增益介质很小的体积内,会形成强烈的热透镜效应,热透镜的球差效应会严重影响输出光的光束质量,尤其是在双通放大器中。因此,必须要对放大器中引入的球差进行补偿。关于端面抽运 Nd:YVO₄ 和侧面抽运 Nd:YAG 激光系统中的球差自补偿理论^[11-12],之前已有过详细报道。

通常情况下,侧面冷却激光晶体可以等效为带正球差的正透镜。在多级激光放大过程中,光束通过多个带正球差的晶体后,正球差不断累积,光束质量将会持续恶化。需要指出的是带有球差的光束在自由空间中传播时,球差值是会变化的,并且在一定条件下可能发生球差反号(即正球差变成负球差或者负球差变成正球差)的情况。当激光通过带有正球差的晶体后,带有了正球差,光束在自由空间经过适当的传播后球差反号,此时若光束通过一个正球差晶体,光束的负球差就能被带正球差的晶体补偿。之前的研究表明大约在两倍焦距位置处光束球差恰好发生反转,同时球差绝对值保持不变^[13]。以两级放大器为例说明,如图 2 所示,将光束质量较好的待放大激光准直后射入激光放大器 1,放大后激光的光束质量必将恶化,在大约两倍焦距(指晶体热透镜焦距)位置处放置放大器 2。根据球差演化特性,该放大器可以补偿光束球差,优化光束质量,同时由于两个放大器位置的对称性,放大器 2 的输出光束将被重新准直。双通补偿球差的过程与图 2 中的两级放大器球差补偿过程类似,将反射镜(对应于图 1 中的 HR1 和 HR2)放置在激光放大器的焦点处,那么单通出来的激光几乎以相同的光分布返回到放大器中,这样,热透镜的球差效应引起的光束质量恶化,将完全由增益介质本身来补偿。

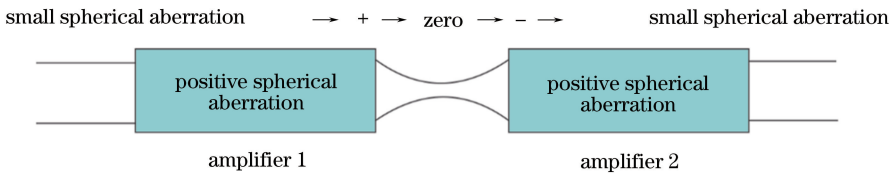


图 2 基于球差补偿理论的组合激光放大器示意图

Fig. 2 Sketch of the combined laser amplifier based on spherical aberration compensation theory

本文端面抽运 Nd:YVO₄ 激光放大器和侧面抽运 Nd:YAG 激光放大器均利用球差补偿理论,设计了双通放大,在提高了输出功率的同时,还改善了输出光的光束质量。光束质量因子 M^2 通过双曲线拟合光束传播方向上不同位置处的光斑直径获得。图 3 所示为种子光经过两级放大器单双通放大后的光束质量与远场光斑图。如图 3(a)所示,在图 1 所示的高反镜 HR1 处测得种子光经过 Nd:YVO₄ 激光放大器单通放大后的光束质量因子 M^2 为 $M_x^2 = 1.38$ 、 $M_y^2 = 1.34$;如图 3(b)所示,在图 1 的 45° 反射镜 M6 处测得一级双通放大后的光束质量因子 M^2

为 $M_x^2 = 1.27$ 、 $M_y^2 = 1.21$;如图 3(c)所示,在图 1 的高反镜 HR2 处测得一级双通放大后的激光经过 Nd:YAG 激光放大器单通放大后的光束质量因子 M^2 为 $M_x^2 = 1.64$ 、 $M_y^2 = 1.53$;如图 3(d)所示,在图 1 的薄膜偏振片(TFP)处测得最终双通放大后的光束质量因子为 $M_x^2 = 1.30$ 、 $M_y^2 = 1.28$ 。由图 3 可以看出,单通放大热透镜的球差效应引起的光束质量的恶化,可以通过双通放大来补偿。因此,基于球差补偿理论的组合激光放大器可以很好地控制最终输出激光的光束质量。

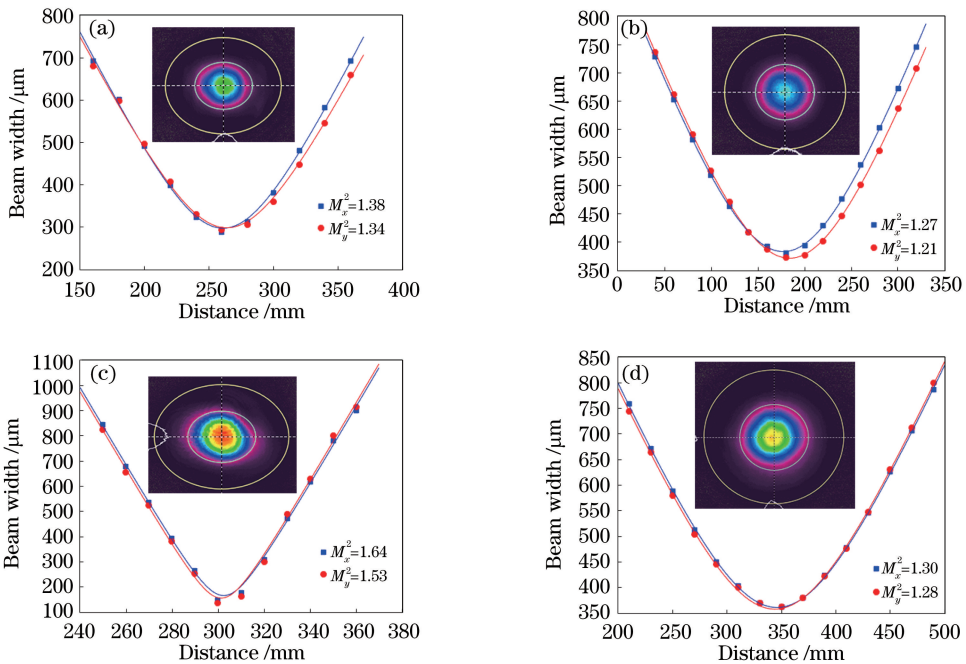


图 3 每级单双通放大后光束质量及远场光斑图。(a)第一级单通放大;(b)第一级双通放大;(c)第二级单通放大;(d)第二级双通放大

Fig. 3 Beam quality and far-field beam profile of the output from each amplifier with single-passing and double-passing configuration. (a) 1st amplifier stage with single-passing configuration; (b) 1st amplifier stage with double-passing configuration; (c) 2nd amplifier stage with single-passing configuration; (d) 2nd amplifier stage with double-passing configuration

3.2 功率放大

在端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级中,为了尽可能减小晶体的热效应造成的光束质量的恶化,需要选

择合适的填充因子^[14-15]。当填充因子较小时,抽运光不能得到充分利用,这使得光光转换效率降低,从而降低放大后的输出功率;而当填充因子过大时,虽

然信号光的提取效率有所增加,但是放大后的光束质量会变差。对于基模运转的激光器,填充因子通常选择 $0.7 \sim 0.8$ ^[16-17]。通过调节种子光耦合透镜(L1)和抽运光耦合透镜组(couple1 和 couple2)来调节放大级的填充因子,最终种子光直径为 $600 \mu\text{m}$,抽运光直径为 $800 \mu\text{m}$,此时填充因子为 0.75 。在双端抽运功率各 30 W 的情况下, 10.9 mW 的种子光经过一级端面抽运 Nd:YVO₄ 放大器双通放大为 7.62 W 。

侧面抽运 Nd:YAG 放大模块所使用的 Nd:YAG 晶体为直径 $\phi = 3 \text{ mm}$,长度 $d = 65 \text{ mm}$ 的圆柱形晶体,采用三个激光二极管 bar 条抽运,bar 条互成 120° 角分布在圆棒状 Nd:YAG 的侧面,这种抽运方式抽运不够均匀,其增益区域要比棒状 Nd:YAG 小。为了得到最佳输出,也需要选择合适的填充因子。图 4 所示为侧面抽运 Nd:YAG 放大级在经过第一级双通放大 7.62 W 的种子光直径 D_{seed} 分别为 $1.0, 1.2, 1.4 \text{ mm}$ 情况下,双通放大后的输出功率与抽运功率的关系图。可以发现,种子光直径 D_{seed} 从 1.0 mm 增大到 1.2 mm 时,双通输出功率明显增大,这是由于在增益区域内,随着填充因子的增大,信号光的提取效率也增大;而当种子光直径 D_{seed} 从 1.2 mm 增大到 1.4 mm 时,输出功率却变小,这是因为直径 1.4 mm 的种子光中部分超出了增益区域,这部分种子光被浪费掉。参考之前的实验结果^[10],选择种子光直径 $D_{\text{seed}} = 1.2 \text{ mm}$,此时提取效率最高,而晶体中的热效应相对较小,放大后激光的光束质量也较好。一级放大输出的 7.62 W 的激光,在侧面抽运放大模块抽运功率为 387 W 时,最终得到 27.65 W 的激光输出。由于第二级放

大级是采用三个激光二极管侧面抽运圆棒状 Nd:YAG 晶体的模块,这种抽运方式不够均匀,因此其光光转化效率较低。后续若要进一步提高光光转换效率,进而提高峰值功率,可考虑采用抽运更加均匀的侧面抽运模块。

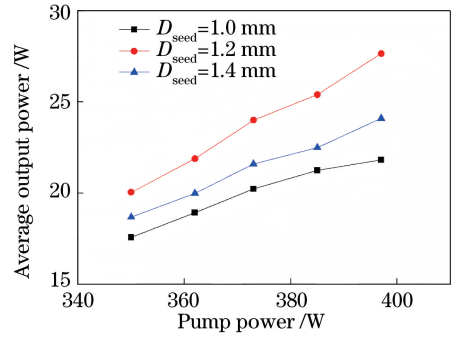


图 4 侧面抽运 Nd:YAG 放大级中不同抽运直径下输出功率与抽运功率的关系
Fig. 4 Output power as a function of pump power with different seed diameters in side-pumped Nd:YAG amplifier

种子光重复频率分别为 $50, 100, 200, 300, 400 \text{ kHz}$ 时,光纤-固体混合放大系统输出光的特性如图 5 所示。图 5(a) 给出了第一级和第二级放大级在种子光不同重复频率下的输出功率图;图 5(b) 给出了不同重复频率下光纤-固体混合放大激光器的总增益。可以发现,随着种子光重复频率的增大,系统的最终输出功率也在增大,但是,光纤-固体混合放大系统的总增益在下降,由 34 dB 降到了 31 dB 。通过计算得出,第二级侧面抽运 Nd:YAG 放大级的放大倍率随着种子光功率的增大基本不变,维持在 3.5 倍左右,而第一级端面抽运 Nd:YVO₄ 激光放大器的放大倍率随着种子光功率的增

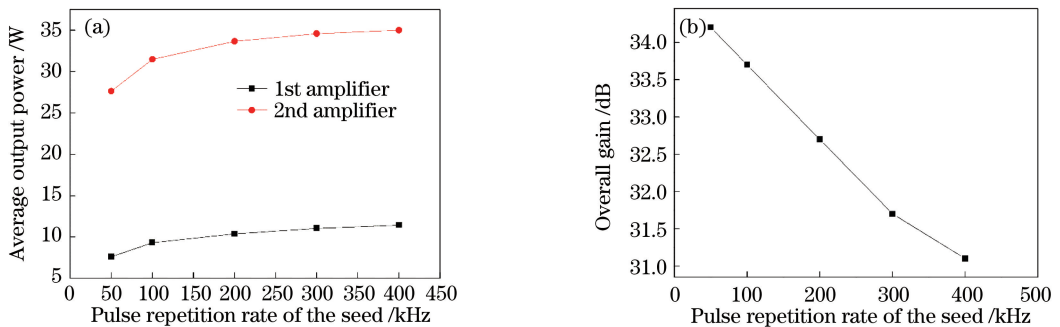


图 5 不同重复频率下输出光特性。(a)不同重复频率下第一级、第二级双通放大后的输出功率;
(b)不同重复频率下光纤-固体混合放大激光器的总增益

Fig. 5 Output characteristics with different pulse repetition rates of the seed. (a) Output power from the 1st and 2nd double-passing amplifier stage with different pulse repetition rates of the seed; (b) gain of the fiber-solid hybrid amplification laser with different pulse repetition rates of the seed

大而急剧减小,从最高的 724 倍降低到 420 倍。因此,系统总增益下降的原因在于第一级端面抽运 Nd:YVO₄ 激光放大级的增益饱和。

3.3 光纤固体混合

Nd:YAG 晶体的主发射峰波长为 1064.5 nm 而谱线较窄, Nd:YVO₄ 晶体的主发射峰波长为 1064.3 nm 且谱线较宽, Nd:YVO₄ 晶体在 1064 nm 附近的发射谱线可以完全覆盖 Nd:YAG 晶体的发射谱线。因此,需要调节种子光源的中心波长为 1064.5 nm,使得光纤-固体混合放大 MOPA 系统的放大效率最高。

与 Nd:YVO₄ 晶体相比, Nd:YAG 晶体的机械强度高,导热性能好,具有良好的散热性能,饱和光强更大,可以承受更高的峰值功率,适用于高功率的激光系统。另外,采用侧面抽运的抽运方式,抽运光

从激光晶体侧面抽运,抽运面积大,抽运功率高,很容易实现高功率输出,因此为了获得更高的峰值功率,本文采用了端面抽运 Nd:YVO₄ 和侧面抽运 Nd:YAG 的混合放大系统。

由于增益窄化效应,放大器的增益宽度会影响种子光的脉宽与线宽。Nd:YVO₄ 晶体增益宽度几乎是种子光光谱线宽的两倍,其对放大后的激光的脉宽与线宽影响较小。而 Nd:YAG 晶体的增益宽度较小,增益窄化效应明显,拓宽了脉冲宽度,同时谱线会发生窄化现象。使用自相关仪测得最终输出光的脉宽为 8.5 ps,归一化脉冲强度拟合出其脉宽如图 6(a)所示,使用光谱仪测得最终输出光的谱线宽度为 0.33 nm,归一化光谱强度拟合出其谱线如图 6(b)所示。

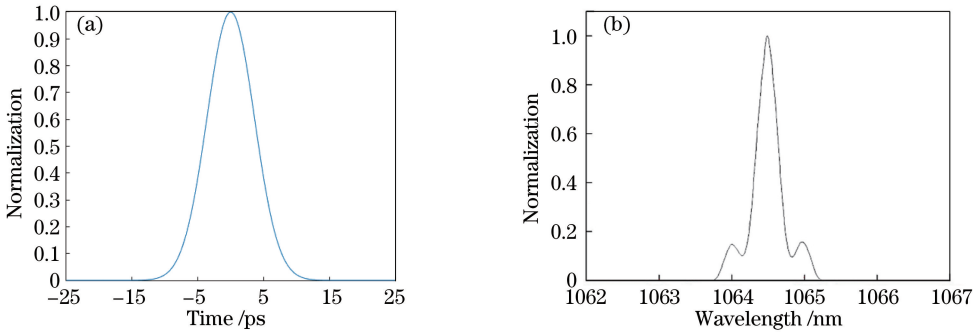


图 6 最终输出光的(a)脉宽与(b)线宽

Fig. 6 (a) Pulse width and (b) spectral linewidth of the final output

4 结 论

利用光纤激光器输出的重复频率在 30 kHz~30 MHz 范围内可调、脉宽为 3.9 ps 的脉冲光束作为种子光,先后经过端面抽运 Nd:YVO₄ 放大级和侧面抽运 Nd:YAG 放大级进行双通放大。详细研究了种子光不同重复频率、不同填充因子对放大效果的影响,最终在种子光重复频率为 50 kHz、第一级放大级中填充因子为 0.75、第二级放大器中种子光直径为 1.2 mm 时,得到平均功率为 27.65 W 的激光输出,峰值功率达到 65 MW,此时的峰值功率最高。应用激光放大器的球差补偿理论,达到对光束质量的有效控制,最终光束质量因子 $M^2 = 1.30$ 。

参 考 文 献

[1] Natawa K, Okida M, Furuki K, *et al.* MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9123-9128.

[2] Ma Y F, Yu J, Niu G, *et al.* Research on 21 W and 56 MHz Nd:YVO₄ picosecond pulse laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0302010.
麻云凤, 余锦, 牛岗, 等. 21 W、56 MHz Nd:YVO₄ 皮秒脉冲激光放大器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302010.

[3] Shen L F, Jiang H B, Zhao Z G, *et al.* Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd:YVO₄ slab geometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1101004.
沈利洋, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射 Nd:YVO₄ 板条结构皮秒激光放大器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101004

[4] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.

[5] Jin L, Li S C, Zhao X, *et al.* Multi-modulation Yb³⁺ doped megawatt fiber laser system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201016.
金亮, 李四川, 赵鑫, 等. 复合调制 Yb³⁺ 兆瓦级光纤

- 激光系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201016.
- [6] Chen H L, Liu Q, Wang X L, *et al.* Beam transformation in hybrid fiber-bulk amplifier system [J]. Applied Physics Express, 2012, 5 (11): 112703.
- [7] Délen X, Balembois F, Georges P. Design of a high gain single stage and single pass Nd:YVO₄ passive picosecond amplifier [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(9): 2339-2346.
- [8] Hu M, Zheng Y Y, Cai J, *et al.* CW dual-frequency MOPA laser with frequency separation of 45 GHz [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9881-9889.
- [9] Liu C, Wang Y, Ye Z B, *et al.* Beam wavefront dynamical compensation by aberrations of the gain medium in laser amplifiers for beam quality improvement [J]. Optics Letters, 2014, 39 (9): 2537-2540.
- [10] Qi Y X, Zhao Z G, Liu C, *et al.* Beam quality management in multi-stage side-pumped Nd:YAG MOPA laser systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21 (1): 1600506.
- [11] Yan X P, Liu Q, Fu X, *et al.* Gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO₄ MOPA lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27 (6): 1286-1290.
- [12] Wang C H, Liu C, Shen L F, *et al.* 1.6 MW peak power, 90 ps all-solid-state laser from an aberration self-compensated double-passing end-pumped Nd:YVO₄ rod amplifier [J]. Applied Optics, 2016, 55 (9): 2399-2403.
- [13] Ye Z B, Wang Y, Zhao Z G, *et al.* Method to improve beam quality by compensating spherical aberrations in master oscillator power amplifier laser systems [J]. Applied Optics, 2014, 53(33): 7963-7967.
- [14] Qin X Z, Ye Z B, Xiang Z, *et al.* 32 W 100 MHz high repetition rate lasers with narrow bandwidth and tunable wavelength [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2807-2810.
秦薪镇, 叶志斌, 项震, 等. 32 W 百兆赫兹高重频可调谐单频激光光源 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (11): 2807-2810.
- [15] Xiang Z, Wang D, Pan S Q, *et al.* Beam quality improvement by gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO₄ laser amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(21): 21060-21073.
- [16] Laporta P, Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27 (10): 2319-2326.
- [17] Chen Y F, Liao T S, Kao C F, *et al.* Optimization of fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers: influence of pump-beam quality [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(11): 2010-2016.